

水体表观光学特性测量系统的研制与定标

陈胜利^{1,2}, 郑小兵^{1*}, 李新^{1**}, 韦玮¹, 刘恩超¹¹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, 安徽合肥 230031;²中国科学技术大学, 安徽合肥 230026

摘要 为满足海洋水色卫星遥感在轨定标与真实性检验需求,研制了一套三通道同色散光路、同系统定标、同步观测的水体表观光学特性测量系统(WAOPAS)。WAOPAS的光谱范围覆盖350~900 nm,光谱分辨率优于3 nm,具备自动调节观测几何、自动增益积分时间、数据远程传输和自动预处理功能,可实现全天候无人值守观测。3台传感器采用相同的色散采集单元设计,使WAOPAS具有相同的光谱范围和采样间隔,分辨率最大差异为0.26 nm,保证了光谱测量匹配性。海面辐亮度、天空辐亮度及海面入射辐照度的快速同步多次采集,最小化了天空光变化和海面波动对测量精度的影响。辐亮度与辐照度采用同一定标系统、近同步定标方案,遥感反射比测量不确定度同步降低了0.34%~0.83%(比例系数 $K=1$)。开展了与国际主流测量仪器的户外比对试验,结果验证了所研制系统的测量可行性。

关键词 海洋光学; 表面之上法; 遥感反射比; 传感器

中图分类号 TP722.4

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS230584

1 引言

随着我国水色遥感技术的不断发展,自主研发的海洋一号C星和海洋一号D星陆续发射,共同承担起了我国海洋水色观测的使命^[1-2]。水色卫星在轨定标和真实性检验技术是卫星数据量化应用的前提保障和关键环节,其首要任务是获取现场高精度的水体表观光学特性,包括离水辐亮度 L_w 和遥感反射比 R_{rs} ^[3]。 L_w 和 R_{rs} 是水色学的基本参数,可以进一步反演水体叶绿素浓度、悬浮物浓度及黄色物质吸收等水色要素^[4]。

目前,水体表观光学特性的测量方法主要分为水下剖面法、天空光遮挡法和水面之上法^[5]。水面之上法由于其无阴影干扰、操作便捷以及维护难度低等优点,在现场测量中得到广泛的应用^[6-7]。现有水面之上法自动观测系统主要以CE318-SeaPRISM通道式辐射计和RAMSES(Radiation Measurement Sensor with Enhanced Spectral resolution)系列高光谱传感器为主。法国Cimel Electronique公司研制的CE318-SeaPRISM是一种典型的全自动多波段水体光度计^[8-9],视场角为 1.2° ,带宽为10 nm,通过滤光片转盘的方式,最多可配置9个水色波段,这较为适合多光谱传感器的检验。CE318-SeaPRISM按照 40° 的观测角度和 90° 的相对方位角的观测几何要求依次对水面辐亮度和天空光辐亮度进行测量,太阳直射辐照度通过

辐射传输模型结合天空扫描测量结果估算获得。德国Trios公司研制的RAMSES系列传感器是一种主流的水面高光谱传感器,包括RAMSES_ARC辐亮度传感器和RAMSES_ACC辐照度传感器。核心光学技术采用德国蔡司Zeiss研制的微型模块MMS1(Monolithic Miniature Spectrometer),光谱校准范围覆盖320~950 nm,光谱分辨率为10 nm,采样间隔为 $3.3\text{ nm}^{[10]}$ 。基于RAMSES系列传感器,欧洲空间局开发了两通道式高光谱辐射计(PANTHYR),它由一个水平旋转台和一个垂直旋转台组成,可以同时测量水面或天空辐亮度和辐照度,并可以自动调整观测角度^[11]。此外,广州水色海洋技术有限公司使用RAMSES系列传感器和三维自适应平衡装置研发了自动光谱测量系统(CruiseAOP),可以实现水面与天空的同步测量,并满足在固定平台及船舶走航情况下保持固定观测几何观测^[12-13]。

随着水色卫星遥感朝着高光谱、高分辨趋势发展^[14],CE318-SeaPRISM通道数的限制不完全适用于高光谱遥感的在轨定标与真实性检验,依次分时观测水面-天空的工作模式也会将水面波动的影响引入水体表观光学特性的测量误差中。RAMSES系列传感器虽具有较高的实用性,其10 nm的分辨率只能满足如MODIS、MERIS等光谱分辨率在几十至几百纳米范围的多光谱传感器的检验测量需求。对于国际

收稿日期: 2023-02-22; 修回日期: 2023-04-17; 录用日期: 2023-05-31; 网络首发日期: 2023-06-28

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(42105139)、中国科学院合肥物质科学研究院院长基金(YZJJ202208-CX)

通信作者: *xbzheng@aiofm.ac.cn; **xli@aiofm.ac.cn

先进高光谱遥感器,如搭载于国际空间站上的第一颗针对近岸海洋遥感的高光谱成像仪(HICO)、我国高分五号卫星上的可见短波红外高光谱相机(AHSI)以及 NASA 即将执行的 PACE (Plankton, Aerosol, Cloud, ocean Ecosystem) 任务中搭载的海洋水色仪(OCI),可见光至短波红外光谱范围内的光谱分辨率均达到了 5 nm 左右^[15-17]。对于这些高光谱遥感器的在轨定标与真实性检验,RAMSES 系列传感器无法满足需求,需要研制更高光谱分辨率的水面高光谱传感器以获取更精细的水体的光谱特征。此外,辐亮度与辐照度的相对独立辐射定标,也可能累加 R_{rs} 不确定度。

为满足海洋水色遥感不断提升的应用需求,获取高精度高光谱水体表面观光学特性数据,结合国内外海洋光学规范和相关仪器的研制经验^[18-20],提出了一种三通道同色散光路设计、同系统定标、同步观测的高光谱水色辐射计设计方案,研制了一套水体表面观光学特性测量系统(WAOPAS)。采用自动增益积分时间、自动调节观测几何、数据远程传输、自动预处理和仪器一体化密封等设计,以适应水面波动引起的水面光场快速动态变化、水体类型差异造成的宽动态范围和仪器对盐雾环境引起的耐候性。本文将详细介绍该测量系统的设计原理、结构组成、定标测试和比对试验,为开展水色卫星遥感器高精度在轨定标与产品真实性检验提供技术支持。

2 测量原理

水面信号组成如图 1 所示,进入水体的太阳下行

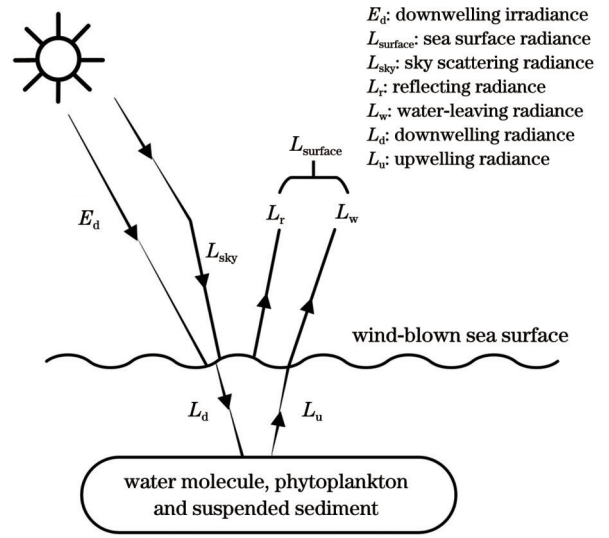


图 1 水面信号示意图

Fig. 1 Schematic diagram of surface signal

辐射,经水分子、浮游植物和悬浮泥沙等物质的后向散射,再次通过水-气界面进入大气的辐射亮度即为离水辐亮度 L_w ^[21]。

遥感反射比 R_{rs} 的定义^[22]为

$$R_{rs}(\lambda) = \frac{L_w(\lambda)}{E_d(\lambda)}, \quad (1)$$

式中: E_d 为海面下行总辐照度。相比 L_w , R_{rs} 对太阳角度和天空条件等外界环境变化的敏感度较低,又能用于有效地区分不同水体的光学特性,在实际应用中更为广泛。获得 R_{rs} 的关键在于 L_w 与 E_d 的测量,目前主要有图 2 所示的 3 种测量方法。

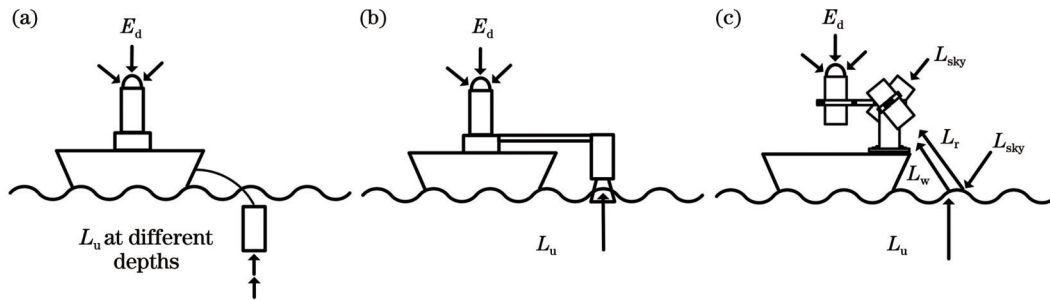


图 2 3 种测量方法。(a)水下剖面法;(b)天空光遮挡法;(c)水面之上法

Fig. 2 Three measurement methods. (a) Under-water profiling method; (b) skylight-blocked method; (c) above-water method

水下剖面法通过分层测量水下光场,外推得到水表面的辐射信号。该方法受环境因素的影响较小,对于水深大于 10 m 的一类水体的测量精度较高。浅海和较浑浊水域的水体分层分布较为复杂,外推测量误差较大^[23]。天空光遮挡法在传感器前增加一个遮光锥,测量时传感器在水面之上,遮光锥的另一端插入水面直接测量。该方法可以剔除水面反射的天空辐亮度,直接得到 L_w ,避免了后期复杂的计算。天空光遮挡法存在水面波动、遮光器件自阴影校正等问题,精度

评估较为复杂^[24-25]。我国水域主要以二类水体和浅海水域为主,水面之上法更加适用。

水面之上法是在海面上方通过严格的观测几何(一般采用 40° 观测角和 135° 方位角),采用经过严格标定的传感器,获得上下行辐射的测量方法^[26],具体可以表示为

$$L_w(\lambda) = L_{surface}(\lambda) - \rho L_{sky}(\lambda) - L_{wc}(\lambda) - L_g(\lambda), \quad (2)$$

式中: ρ 为气-水界面的反射率系数,在风速低于 5 m/s 或者阴天时,可取 0.028; L_{wc} 为水面白帽贡献,与风

速有关,在风速较低时,可以忽略不计; L_g 为太阳耀斑的贡献,观测时通过控制观测几何避开耀斑影响。

式(1)可以进一步简化为

$$R_{rs}(\lambda) = \frac{L_{\text{surface}}(\lambda) - \rho L_{\text{sky}}(\lambda)}{E_d(\lambda)} \quad (3)$$

由式(3)可知,为获得高精度 R_{rs} 数据,需要获得 L_{surface} 、 L_{sky} 和 E_d 等现场测量数据,并保证现场测量结果具有较高的辐射定标精度,同时对于气-水界面反射率系数 ρ 需进行一定程度的评估。

3 系统研制

3.1 总体设计

结合 NASA 发布的海洋光学调查规范、国际水色协调组织 IOCCG 推荐的水色卫星现场测量协议及国家海洋技术中心发布的《海洋光学调查技术规程》^[18-20],提出了水色卫星遥感器系统定标及现场验证中所使用的现场测量仪器的技术指标要求,如表 1 所示。

表 1 WAOPAS 技术指标
Table 1 Technical parameters of WAOPAS

Parameter	Value
Wavelength range / nm	350-900
Full width at half maximum (FWHM) / nm	3
Wavelength accuracy / nm	0.5
Stability / %	0.5
Cosine response / %	5 (0°-65°)

海洋环境复杂多变,天空光变化和水体的波动等因素都会影响观测系统的测量。为保证测量一致性、提高测量效率,采用同色散光路、同系统定标设计,使用快门同步和 GPS 定位跟踪技术,以保证 3 台传感器能够同步快速多次进行数据采集。

海洋环境具有多样性,不同光照条件和水体类型的变化,以及不同海域和季节的差异都会影响仪器水体光学特性的测量。为保证观测系统的适应性和通用性,采用自动增益积分时间设计,根据环境光照强度和水体透明度自动调节参数,积分时间在 50~400 ms 之间自动调节,以适应水面、天空不同的动态变化范围。积分时间的选择既要保证能够跨越一个波浪周期,减少浪涌影响,达到足够的信噪比,又要能够使不同积分时间测量的数据具有较好的线性关系。

太阳耀斑难以测量和估算,水面之上法采用调整观测几何的方式避开耀斑影响。NASA 推荐(40°, 135°)观测几何,即保持辐亮度传感器的观测角度与海面法线的夹角为 40°,观测平面与太阳主平面呈 135° 夹角,辐照度传感器竖直向上观测。通过 GPS 获得定位

信息,根据经纬度信息和测量时间,由天文公式计算得到当前太阳的理论位置,包括太阳高度角和方位角,进而获得转台转动角度^[27-28]。对于后期的测量数据处理,需要设定严格的质量控制,包括太阳角度限制、风速限制、云判断条件以及异常数据剔除等,以提高数据的有效性。

海洋环境较为恶劣,海水和多雾的海洋大气侵蚀较为严重。为保证观测系统的稳定性和可靠性,采用仪器壳体一体化和多重防护设计。仪器外壳采用氧化及喷塑处理,入光孔前置防护玻璃。仪器内置干燥剂,保持内部干燥环境,结构件连接部分增加密封圈,并采用密封胶在外部进行加固,以隔离水汽进入仪器内部。

WAOPAS 整体结构如图 3 所示,3 台传感器通过 T 型支架安装在跟踪控制转台上,实现竖直朝上观测下行辐照度、40°朝上观测天空光辐亮度以及 40°朝下观测海面辐亮度。

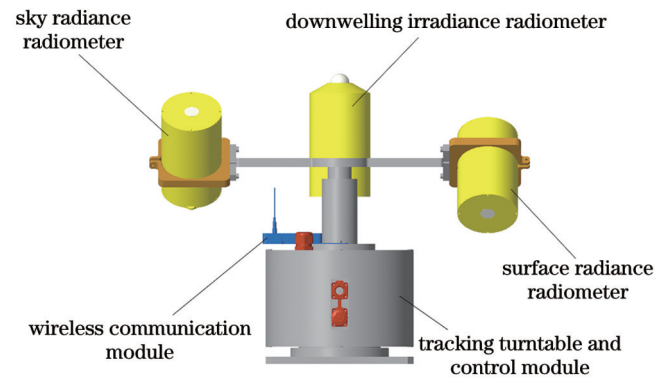


图 3 WAOPAS 三维结构示意图

Fig. 3 3D structure diagram of WAOPAS

观测系统功能组成图如图 4 所示,WAOPAS 主要由传感器模块、电源模块、跟踪模块、主控模块和无线通信模块等部分组成。采用 220 V 交流电供电,通过电源模块给整个系统提供稳定电源。跟踪控制转台由步进电机、减速器和电器驱动器组成,实现测量系统观测主平面达到设定的观测几何要求。主控模块是控制系统的核心,实现各模块之间的指令发送与数据接收。入射信号到达探测器面的光信号先后经过光电转换、数模转换和数字放大,最终保存到单片机中并通过 CAN 总线传输到主控模块进行存储和处理,并通过无线传输模块实现数据远程传输功能。

3.2 光学系统设计

传感器是观测系统的核心,由前置光学单元、色散单元和探测单元组成。如图 5 所示,视场内入射光经过前置光学单元均匀照射在狭缝端面上,经光谱色散单元的色散分光到达探测器光敏面。探测器单元通过探测器驱动电路、差分放大电路以及 A/D 转换电路输出信号值。

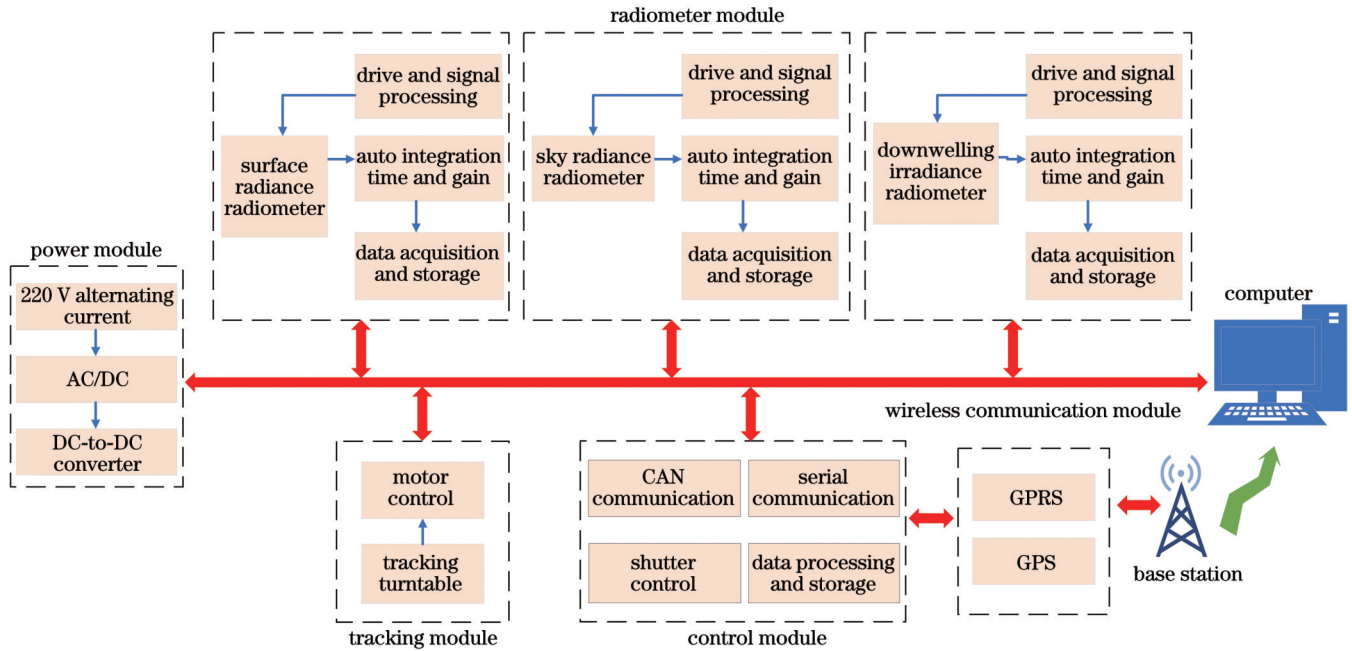


图 4 WAOPAS 功能组成图
Fig. 4 Composition diagram of WAOPAS

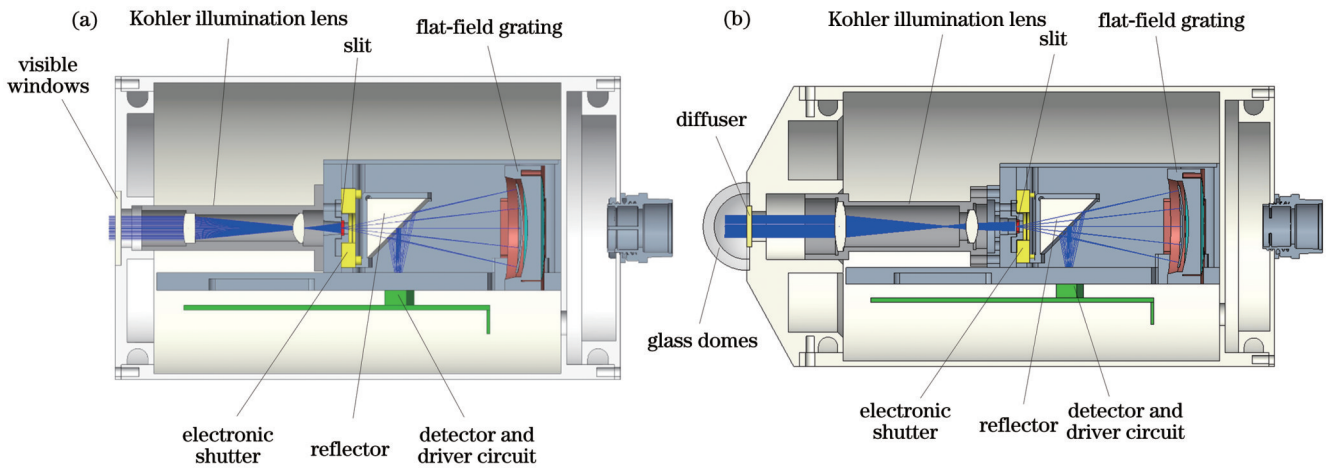


图 5 传感器光路图。(a) 辐亮度传感器；(b) 辐照度传感器
Fig. 5 Optical path diagrams of radiometer. (a) Radiance radiometer; (b) irradiance radiometer

为保证传感器之间的一致性,采用相同的色散单元和探测单元;为避免单元相互间的干扰,采用反射镜折反出射光的形式,将光学部分与电子学部分分开,且结构更加紧凑。图 6 为色散单元光路,采用像差校正平

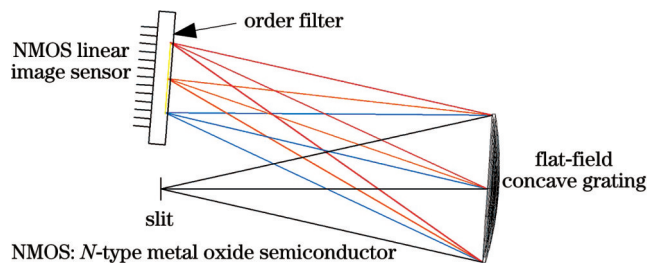


图 6 色散单元光路
Fig. 6 Optical path of dispersion unit

场全息凹面光栅,该设计集色散与会聚功能为一体,简化了光路,便于光学系统的装调和小型化设计。

光栅 $F_{\#}$ 选取 2.2, 光谱范围覆盖 300~900 nm, 光谱宽度为 12.7 mm, 平均色散率为 47.24 nm/mm。与光栅参数相适应的探测器, 采用 HAMAMATSU 公司生产的 512 pixel 硅光电二极管阵列, 光谱响应范围为 200~1050 nm, 满足光谱响应波段需求, 单个像元尺寸为 25 $\mu\text{m} \times 2.5 \text{ mm}$, 光敏面宽度为 12.8 mm, 可以覆盖光栅光谱宽度。同时, 为了消除二级光谱的影响, 在探测器表面采用线变滤光片消除二级光谱。滤光片过滤范围为 600~900 nm 范围内叠加的 300~450 nm 波段的二级光谱。

狭缝的宽度 w 直接影响仪器的光谱分辨率, 狭缝宽度与光谱带宽 $\Delta\lambda$ 的关系可表示为

$$\Delta\lambda = K\omega \frac{d\lambda}{d\lambda}, \quad (4)$$

式中: K 为比例系数; $d\lambda/d\lambda$ 为光栅色散率。根据光栅参数以及分辨率要求, 选取狭缝宽度为 $50 \mu\text{m}$, 对应约 2 个探测器的像元宽度, 因此, 在忽略像差 ($K=1$) 时, 传感器的平均带宽为 2.36 nm , 满足 3 nm 的分辨率要求。

由于观测目标不同, 辐亮度传感器与辐照度传感器需采用不同的前置光学系统。辐亮度传感器采用前置镜头限制视场以进行探测。海洋光学规范表明一般传感器的视场角设置为 $2^\circ \sim 18^\circ$, 考虑到仪器的入射光通量、观测目标区域大小, 以及前置光学系统的设计, 折中选择了 10° 视场作为设计指标。如图 7 所示, 辐亮度传感器前置光学系统采用科勒照明式设计, 能够将亮度不均匀或呈现明显的灯丝结构的光源均匀成像在狭缝端面上。

图 7 中 θ 为半视场角, U 为边缘主光线与像面的夹角, f, f' 分别为物镜焦距和场镜工作距离, D 为入瞳直径, d 为像高, α 为边缘光线与主轴光线的角度。由几

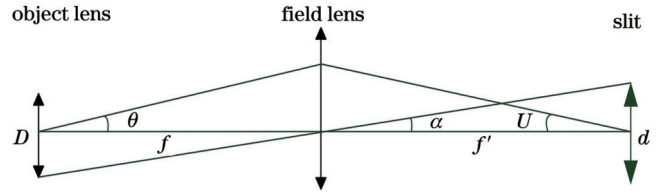


图 7 科勒照明镜头示意图

Fig. 7 Schematic diagram of Kohler illumination lens

何关系可得:

$$f \tan \theta = f' \tan U. \quad (5)$$

为保证探测效率, U 应与 $F_\#$ 相匹配, 即 $U = \arcsin[1/(2F_\#)] = 12.71^\circ$ 。

通过限制边缘视场的主光线在像面的高度, 对透镜焦距进行优化, 优化结果取物镜焦距为 40 mm , 场镜焦距为 11.18 mm 。焦距确定后, 通过对透镜的焦距进行限制, 分别优化设计两个透镜参数, 镜头光路优化结果如图 8 所示。物镜 $R_1=24.383 \text{ mm}, R_2=151.377 \text{ mm}$; 场镜 $R_3=6.548 \text{ mm}, R_4=26.952 \text{ mm}$ 。

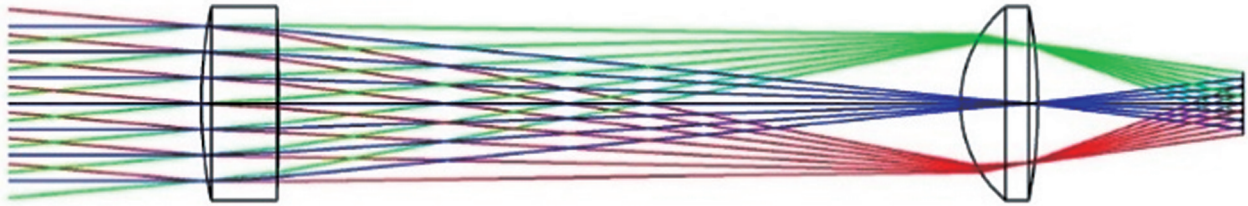


图 8 10° 镜头光路图

Fig. 8 Optical path diagram of 10° lens

图 9 为像面的点列图, 弥散斑近似为圆形, $\pm 5^\circ$ 视场的最大偏心距离为 0.36 mm , 保证了全视场的入射光可以均匀地照射在狭缝端面上。

根据辐照度余弦定律, 太阳光入射至探测平面时, 其产生的辐照度与入射角度有关, 并按照余弦规律变

化。为保证辐照度传感器具有较好的余弦特性, 采用前置余弦收集器接收 180° 半球空间辐射能量。常见的余弦收集器主要有基于积分球和漫射材料两种方式, 考虑到空间结构及使用环境, 选用半透明漫射玻璃作为辐照度传感器中余弦收集器的主体。

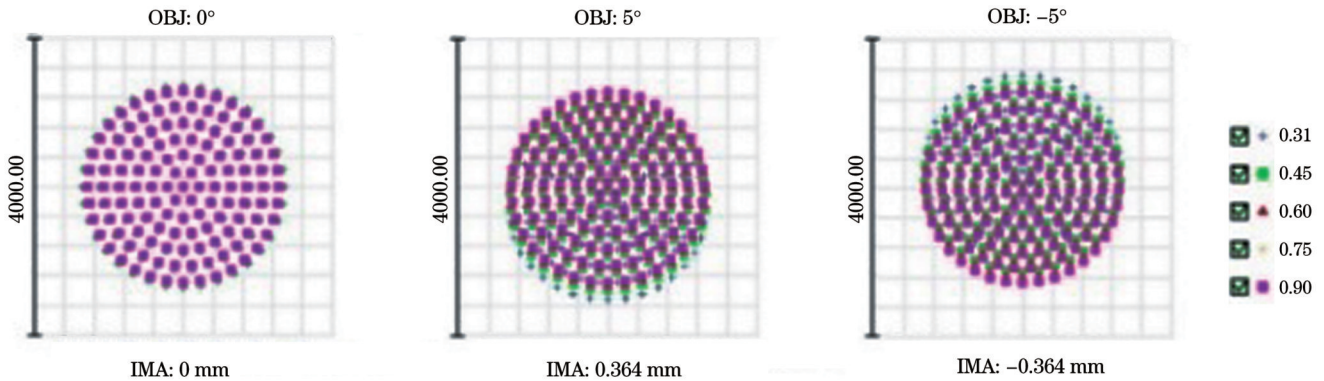


图 9 10° 镜头点列图

Fig. 9 Diffuse spots of 10° lens

为了评价漫射玻璃的余弦特性, 利用标准灯结合电控旋转台, 对辐照度传感器的余弦响应度进行测试, 测试结果如图 10 所示。 $\pm 30^\circ$ 内的测试结果与标准余弦值的相对差异在 2% 内, 随着角度的增大, 相对差异

逐渐增大, 在 $\pm 65^\circ$ 附近相对差异达到 5% , 满足表 1 中的指标要求。整体均方根误差 (RMSE) 优于 0.035 , 与标准余弦曲线较为接近, 表明漫射玻璃具有较好的余弦特性。

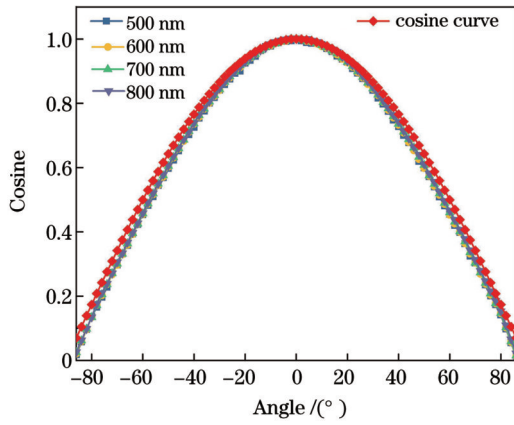


图 10 辐照度传感器的余弦响应图

Fig. 10 Cosine response of irradiance radiometer

3.3 采集软件

针对设备控制、数据传输与自动预处理功能,设计了如图 11 所示的配套采集软件。软件功能主要分为三个部分:第一部分是实现对观测系统的控制,包括传感器数据的采集、快门开关以及跟踪转台的转动;第二部分是基于 TCP/IP 协议的 GPRS 通信,实现数据远程无线传输;第三部分是对于上传的观测数据进行预处理、显示及存储。

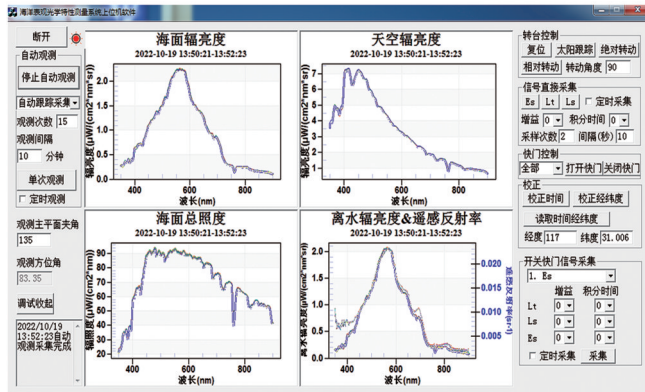


图 11 WAOPAS 采集软件

Fig. 11 Acquisition software of WAOPAS

4 实验室定标

为了获得高精度的测量数据,确定观测系统的光谱范围、光谱分辨率和响应度系数,按照国家计量检定规程^[29-30],对辐亮度与辐照度传感器进行实验室定标,包括光谱定标和辐射定标。

4.1 光谱定标

AvaLight-CAL 波长校准光源是常用的可见光波段光谱定标光源^[31],可以提供 253.6~922.5 nm 范围内所有 Hg 和 Ar 的特征谱线,其中 300~900 nm 之间共有 21 个特征峰。将汞氩灯光源分别导入三个传感器,可得如图 12 所示的特征峰曲线。

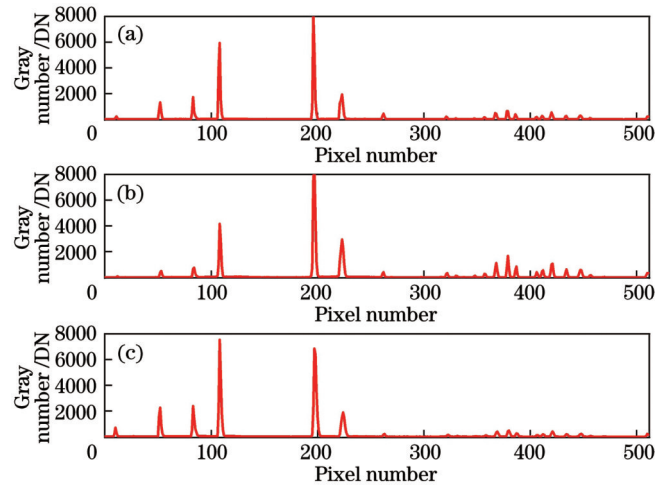


图 12 光谱特征峰曲线。(a)海面辐亮度传感器;(b)天空辐亮度传感器;(c)下行辐照度传感器

Fig. 12 Spectral characteristic peak curves. (a) Surface radiance radiometer; (b) sky radiance radiometer; (c) downwelling irradiance radiometer

将获得的特征峰值进行高斯拟合,得到对应特征波长的中心像元值和 FWHM,并通过多项式拟合确定传感器的光谱范围。光谱定标结果如表 2 所示,3 台传感器的光谱范围均在 297~915 nm 内,光谱分辨率均优于 3 nm,波长精度均优于 0.5 nm,满足应用需求。

表 2 光谱定标结果

Table 2 Results of wavelength calibration

Radiometer	Spectral range / nm	FWHM / nm	Sampling interval / nm
Surface radiance radiometer	298.52–914.58	2.67	1.2
Sky radiance radiometer	297.81–912.43	2.80	1.2
Downwelling irradiance radiometer	299.76–914.79	2.93	1.2

3 台传感器由于采用了相同的色散采集模块,光谱定标范围差异较小,最大 FWHM 差异为 0.26 nm,单像元采样间隔均为 1.2 nm,一致性较好。为了便于后期数据计算方便,将 3 台传感器插值到 350~900 nm 范围内,间隔为 1 nm,从而保证了 3 台传感器具有相

同的波长范围和采样间隔,并保证了光谱测量匹配性。

4.2 辐射定标

根据式 (3), R_{rs} 测量不确定度 $u(R_{rs})/R_{rs}$ 可表示为

$$\left[\frac{u(R_{rs})}{R_{rs}} \right]^2 = \left[\frac{u(N_{Lsurface})}{N_{Lsurface}} \right]^2 + \left[\frac{u(R_{Lsurface})}{R_{Lsurface}} \right]^2 + \left[\frac{u(N_{Lsky})}{N_{Lsky}} \right]^2 + \left[\frac{u(R_{Lsky})}{R_{Lsky}} \right]^2 + \left[\frac{u(\rho)}{\rho} \right]^2 + \left[\frac{u(N_E)}{N_E} \right]^2 + \left[\frac{u(R_E)}{R_E} \right]^2, \quad (6)$$

式中： $u(N_{Lsurface})/N_{Lsurface}$ 为海面辐亮度传感器的测量信号的不确定度； $u(R_{Lsurface})/R_{Lsurface}$ 为海面辐亮度传感器响应度的不确定度； $u(N_{Lsky})/N_{Lsky}$ 为天空辐亮度传感器的测量信号不确定度； $u(R_{Lsky})/R_{Lsky}$ 为天空辐亮度传感器响应度的不确定度； $u(\rho)/\rho$ 为气-水界面反射率系数的不确定度； $u(N_E)/N_E$ 为辐照度传感器的测量信号的不确定度； $u(R_E)/R_E$ 为辐照度传感器响应度的不确定度。

根据海洋行业标准《海洋水色光谱仪检测方法》^[32]，辐亮度传感器与辐照度传感器通常使用标准灯与漫反射参照板装置，通过相对独立定标获得各自的响应度。辐照度传感器在距离标准灯 d_1 距离处的响应

度 R_E ，以及辐亮度传感器在漫反射参照板距标准灯 d_2 处的响应度 R_L ^[33]可分别表示为

$$R_E(\lambda) = \frac{E_0(\lambda) d_0^2}{N_{E0}(\lambda) d_1^2}, \quad (7)$$

$$R_L(\lambda) = \frac{E_0(\lambda)}{N_{L0}(\lambda)} \rho_{panel}(\lambda) \frac{d_0^2}{\pi d_2^2}, \quad (8)$$

式中： E_0 为标准灯标定的辐照度值； N_{E0} 为辐照度传感器的测量信号值； ρ_{panel} 为中国计量科学研究院标定的漫反射参照板反射比因子； N_{L0} 为辐亮度传感器的测量信号值。

辐射定标的响应度不确定度 $u(R_E)/R_E$ 和 $u(R_L)/R_L$ 可分别表示为

$$\frac{u(R_E)}{R_E} = \sqrt{\left[\frac{u(E_0)}{E_0} \right]^2 + \left[\frac{u(N_{E0})}{N_{E0}} \right]^2 + \left[\frac{2u(d_1)}{d_1} \right]^2 + \left[\frac{u(\lambda_E)}{\lambda_E} \right]^2}, \quad (9)$$

$$\frac{u(R_L)}{R_L} = \sqrt{\left[\frac{u(E_0)}{E_0} \right]^2 + \left[\frac{u(\rho_{panel})}{\rho_{panel}} \right]^2 + \left[\frac{u(N_{L0})}{N_{L0}} \right]^2 + \left[\frac{2u(d_2)}{d_2} \right]^2 + \left[\frac{u(\lambda_L)}{\lambda_L} \right]^2}. \quad (10)$$

标准灯的不确定度 $u(E_0)/E_0$ 与漫反射参照板的不确定度 $u(\rho_{panel})/\rho_{panel}$ ，可通过中国计量科学研究院的校准证书直接获得；辐照度传感器的测量信号不确定度 $u(N_{E0})/N_{E0}$ 与辐亮度传感器的测量信号不确定度 $u(N_{L0})/N_{L0}$ 与仪器性能有关；定标距离的不确定度 $u(d_1)/d_1$ 与 $u(d_2)/d_2$ 通过激光测距仪的多次测量计算获得；光谱定标的不确定度 $u(\lambda_E)/\lambda_E$ 与 $u(\lambda_L)/\lambda_L$ 通过光谱定标结果获得。

定标所采用的光谱辐照度标准灯为溯源于中国计

量科学研究院的 1000 W 石英卤钨灯，测量范围为 250~2500 nm，300~900 nm 的不确定度为 0.8%~1.2% ($K=1$)。标准漫反射板采用反射率为 99% 的漫反射发泡白板，尺寸为 400 mm×400 mm。通过中国计量科学研究院的校准，可获得 250~2500 nm 范围内的光谱反射比，校准不确定度为 0.5% ($K=1$)。

根据式(9)、(10)，传统辐亮度传感器与辐照度传感器相对独立的定标计算方法得到的响应度测量结果如图 13 所示，各项不确定度如表 3 所示。

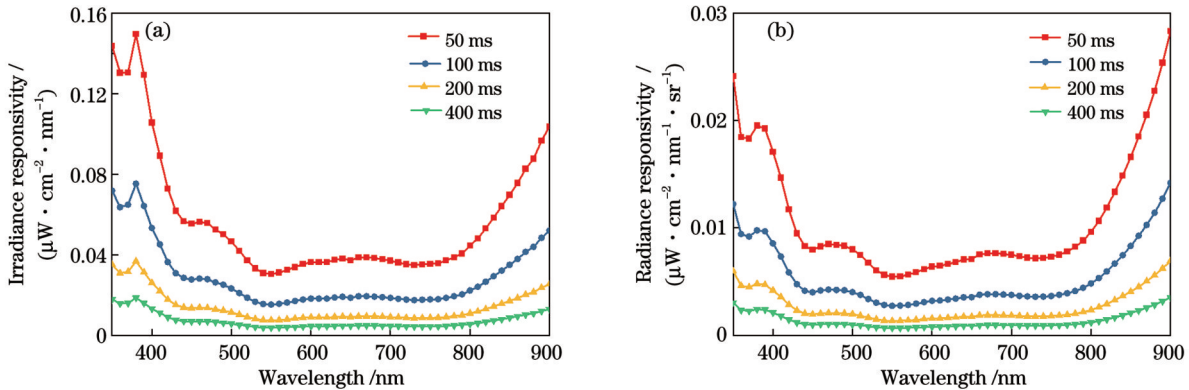


图 13 WAOPAS 响应度曲线。(a) 辐照度传感器；(b) 辐亮度传感器

Fig. 13 Responsivity of WAOPAS. (a) Irradiance radiometer; (b) radiance radiometer

相对独立定标方法会将标准灯自身的不确定度以及不同时刻标准灯的系统误差引入到测量结果中。为了提高观测系统的定标精度、消除定标光源带来的误差，采用如图 14 所示的同一定标光源、近同步定标

方案。

辐照度传感器与漫反射板位于标准灯两侧，使用激光投线仪结合平面镜的方式保证各中心高度和中心平面位于同一直线上。激光投线仪通过发射激光束，

表 3 辐射定标不确定度
Table 3 Uncertainty of radiance calibration

Sources of uncertainty	$u(R_E)/R_E$ for $K=1$ / %	$u(R_L)/R_L$ for $K=1$ / %
Irradiance of standard lamp	0.8-1.2	0.8-1.2
Calibration distance	0.1	0.1
Uncertainty introduced by wavelength calibration	0.02-1.31	0.02-1.31
Output digital number	0.01-0.68	0.01-0.54
Uncertainty introduced by reflectance factor	-	0.5
Combined uncertainty	0.82-1.91	0.96-1.93

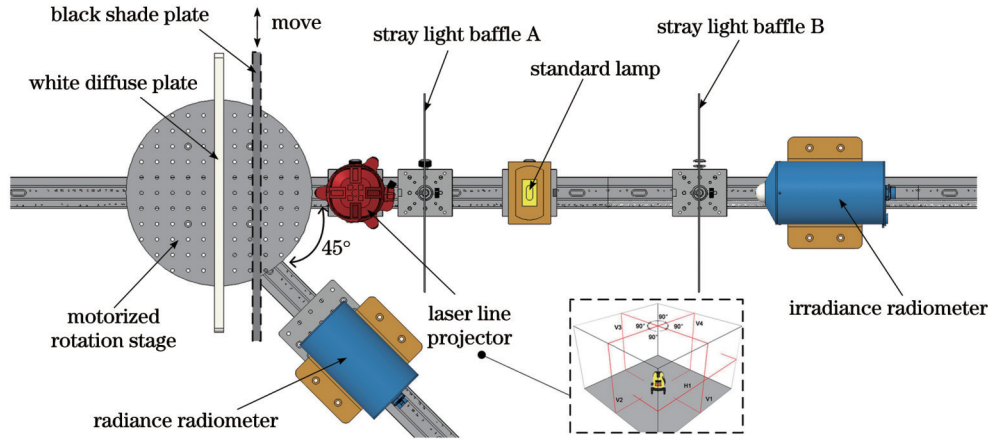


图 14 辐射定标示意图

Fig. 14 Schematic diagram of radiometric calibration

并通过棱镜导光系统投射出水平和铅垂的激光线,能够达到±0.2 mm/m的水平垂直精度和90°±40"的正交精度,短距离内的装调可以满足定标需求^[34]。为避免光污染,辐照度传感器定标时,使用黑色挡光板遮挡住漫反射板。辐亮度传感器定标时,迅速移开挡板,以减少切换时间,保证定标的同时性。采用该定

标方案的优势是:调整完相对位置后,无需再移动待定标传感器,可以反复对辐亮度或辐照度传感器进行定标,且当切换时间较短时,标准灯的变化可以忽略不计,辐亮度与辐照度定标达到同一定标光源近同步定标的效果。

式(6)可以进一步简化为

$$\left[\frac{u(R_{rs})}{R_{rs}} \right]^2 = \left[\frac{u(N_{L,surface})}{N_{L,surface}} \right]^2 + \left[\frac{u(N_{L,sky})}{N_{L,sky}} \right]^2 + \left[\frac{u(\rho)}{\rho} \right]^2 + \left[\frac{u(N_E)}{N_E} \right]^2 + \left[\frac{u(\lambda_E)}{\lambda_E} \right]^2 + 2 \left[\frac{u(\lambda_L)}{\lambda_L} \right]^2 + \left[\frac{u(\rho_{panel})}{\rho_{panel}} \right]^2 + \left[\frac{2u(d_1)}{d_1} \right]^2 + \left[\frac{2u(d_2)}{d_2} \right]^2, \quad (11)$$

此时 $u(R_{rs})/R_{rs}$ 与定标光源的强度无关,除仪器测量自身信号的测量不确定度及光谱定标不确定度外,只与辐照度传感器与标准灯的距离 d_1 、标准参照板与标准灯的距离 d_2 和漫反射参照板反射比因子 ρ_{panel} 相关。

假设传感器的测量环境一致,仪器自身的测量不确定度在实验室与在户外相同,根据式(6)和式(11)分别计算出相同设备在相同环境下两种不同定标方法的 R_{rs} 相对不确定度。气-水界面的反射率系数不确定度参考 AERONET-OC 站点 SeaPRISM 测量评估结果^[8]。遥感反射比的不确定度如表 4 所示,在 5 个主要波长处,传统独立定标方法的 $u(R_{rs})/R_{rs}(K=1)$ 范围为 1.82%~2.98%,同步定标方法的 $u(R_{rs})/R_{rs}(K=1)$

表 4 遥感反射比的不确定度
Table 4 Uncertainty of remote sensing reflectance

Wavelength / nm	$u(R_{rs})/R_{rs} (K=1)$		Absolute difference / %
	Independent calibration / %	Synchronous calibration / %	
412	2.75	2.41	0.34
443	2.28	1.77	0.51
488	1.92	1.19	0.73
551	1.82	0.99	0.83
667	2.98	2.58	0.40

范围为 0.99%~2.58%，表明同一定标系统的同步定标方法可以有效降低 R_s 的测量不确定度。

4.3 户外比对试验

2022 年 11 月 11 日,在中国科学院安徽光学精密机械研究所进行与 HR-1024i 地物光谱仪和 RAMSES 传感器的同步比对试验。HR-1024i 为美国 SVC 公司 (Spectra Vista Corporation) 生产的地物光谱仪,光谱范围覆盖 350~2500 nm,其中 350~1000 nm 范围内的分辨率为 3.5 nm,采样间隔为 1.5 nm,配有 4° 的前置镜头。辐亮度传感器的探测目标选用 99% 反射率的标准白板和 20% 反射率的灰板,以比对不同辐射范围之间的差异;辐照度传感器竖直向上收集半球空间内的下行辐照度,现场测试如图 15 所示。

观测目标的辐亮度范围为 $0.45\sim 13.00\ \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{sr}^{-1}$,完全覆盖了水体表面辐亮度的变化范围。由于太阳天顶角较大,辐照度值范围只有 $8\sim 45\ \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{nm}^{-1}$,但不影响照度对

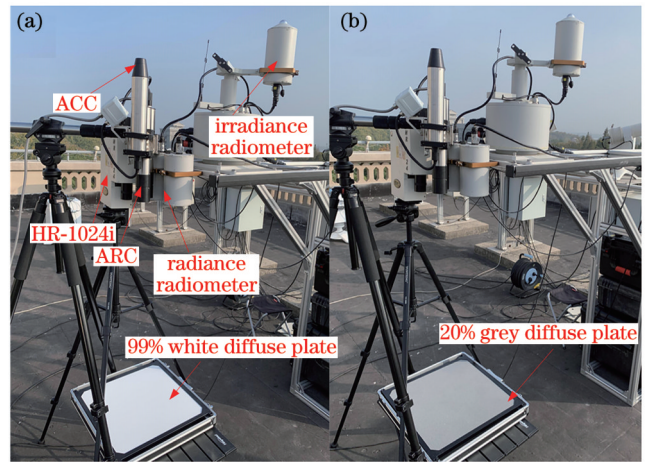


图 15 户外比对试验。(a)99% 白板;(b)20% 灰板

Fig. 15 Outdoor comparison experiment. (a) 99% white diffuse panel; (b) 20% grey diffuse panel

比。计算传感器的测量结果与均值之间的相对差异,结果如图 16 所示。

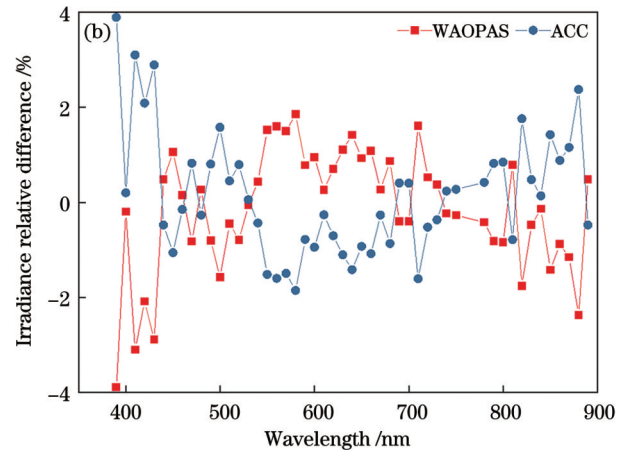
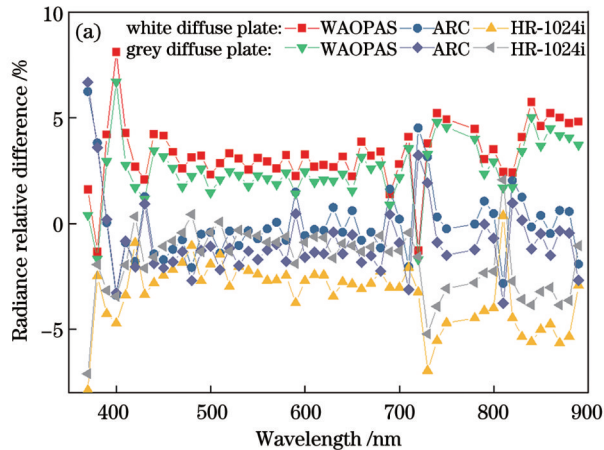


图 16 相对差异。(a)辐亮度相对差异;(b)辐照度相对差异

Fig. 16 Relative difference. (a) Radiance relative difference; (b) irradiance relative difference

从图 16 中可以看出,400~900 nm 范围内辐亮度传感器和辐照度传感器的整体一致性较好。WAOPAS 辐亮度传感器的测量相对差异均在 0~5.5% 内,平均相对差异为 2.5%;辐照度传感器的测量相对差异范围均在 0~2.4% 内,平均相对差异为 0.5%。这些结果初步证明 WAOPAS 与国际主流仪器的差距较小,具有较高的测量精度。

5 结 论

本文设计了一种新型的 WAOPAS,其能够准确、同步、快速地测量海面辐亮度、天空辐亮度和海面入射辐照度,并通过计算得到水面辐亮度和遥感反射比产品。WAOPAS 的主要特点包括:1)辐照度和辐亮度传感器采用相同的色散光路设计,保证了观测光谱范围和光谱分辨率的一致性;2)采用溯源于中国计量科学研究所的同一系统、近同步测量的辐射定标方

案,降低了 R_s 测量不确定度;3)采用快门同步和无线远程传输技术,实现了 3 台传感器快速同步采集,以适应水面测量目标的动态变化;4)采用自动增益积分时间设计,根据环境光强度和水质透明度自动调整参数,以适应水体类型变化造成的宽动态范围;5)采用 GPS 定位跟踪技术,自动调整观测几何,以避免太阳耀斑的影响;6)采用壳体一体化和密封设计,提高仪器的稳定性和可靠性,避免盐雾环境对仪器造成的腐蚀。通过与 HR-1024i 和 RAMSES 在室外的比对试验,初步验证了 WAOPAS 具有较高的测量精度。

参 考 文 献

- [1] 刘建强, 蒋兴伟, 王丽丽, 等. 海洋一号 C、D 卫星组网观测与应用[J]. 卫星应用, 2021(9): 19-26.
Liu J Q, Jiang X W, Wang L L, et al. Observation and application of Haiyang-1 C and D satellite network[J]. Satellite Application, 2021(9): 19-26.

- [2] 王丽丽, 赵鸿志, 张可立. 海洋水色卫星的发展现状及趋势[J]. 航天器工程, 2021, 30(6): 44-51.
- Wang L L, Zhao H Z, Zhang K L. Current status and developing trends of ocean color satellites[J]. Spacecraft Engineering, 2021, 30(6): 44-51.
- [3] 潘德炉, 林明森, 毛志华, 等. 海洋遥感基础及应用[M]. 北京: 海洋出版社, 2017: 206-220.
- Pan D L, Lin M S, Mao Z H, et al. Fundamentals and applications of ocean remote sensing[M]. Beijing: Ocean Press, 2017: 206-220.
- [4] Gilerson A, Carrizo C, Foster R, et al. Variability of the reflectance coefficient of skylight from the ocean surface and its implications to ocean color[J]. Optics Express, 2018, 26(8): 9615-9633.
- [5] Ruddick K G, Voss K, Boss E, et al. A review of protocols for fiducial reference measurements of water leaving radiance for validation of satellite remote-sensing data over water[J]. Remote Sensing, 2019, 11(19): 2198.
- [6] 汪小勇, 李铜基, 唐军武, 等. 二类水体表观光学特性的测量与分析: 水面之上法方法研究[J]. 海洋技术, 2004, 23(2): 1-6, 23.
- Wang X Y, Li T J, Tang J W, et al. Measurement and analysis of AOPs in case II waters with above-water method[J]. Ocean Technology, 2004, 23(2): 1-6, 23.
- [7] 汪小勇, 唐军武, 李铜基, 等. 水面之上法测量水体光谱的关键技术[J]. 海洋技术, 2012, 31(1): 72-76.
- Wang X Y, Tang J W, Li T J, et al. Key technologies of water spectra measurements with above-water method[J]. Ocean Technology, 2012, 31(1): 72-76.
- [8] Zibordi G, Mélin F, Berthon J F, et al. AERONET-OC: a network for the validation of ocean color primary products[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2009, 26(8): 1634-1651.
- [9] Johnson B C, Zibordi G, Brown S W, et al. Characterization and absolute calibration of an AERONET-OC radiometer[J]. Applied Optics, 2021, 60(12): 3380-3392.
- [10] Alikas K, Vabson V, Ansko I, et al. Comparison of above-water seabird and TriOS radiometers along an Atlantic meridional transect[J]. Remote Sensing, 2020, 12(10): 1669.
- [11] Vansteenwegen D, Ruddick K, Cattrijse A, et al. The pan-and-tilt hyperspectral radiometer system (PANTHYR) for autonomous satellite validation measurements: prototype design and testing[J]. Remote Sensing, 2019, 11(11): 1360.
- [12] 李铜基, 马超飞, 朱建华, 等. 牟平观测平台水体表观光学特性测量功能设计与实现[J]. 海洋技术学报, 2021, 40(6): 1-8.
- Li T J, Ma C F, Zhu J H, et al. Design and implementation of the measurement function of water apparent optical properties of Muping observation platform[J]. Journal of Ocean Technology, 2021, 40(6): 1-8.
- [13] Song Q J, Chen S G, Hu L B, et al. Introducing two fixed platforms in the Yellow Sea and East China Sea supporting long-term satellite ocean color validation: preliminary data and results[J]. Remote Sensing, 2022, 14: 2894.
- [14] 周拥军, 羌丽, 李元祥. 国外高分辨率对地成像观测系统现状与发展趋势[J]. 飞控与探测, 2021, 4(5): 1-8.
- Zhou Y J, Qiang L, Li Y X. Status and development trends of foreign space-borne high-resolution imaging remote sensing systems[J]. Flight Control & Detection, 2021, 4(5): 1-8.
- [15] Lucke R L, Corson M, McGlothlin N R, et al. Hyperspectral imager for the coastal ocean: instrument description and first images[J]. Applied Optics, 2011, 50(11): 1501-1516.
- [16] 孙允珠, 蒋光伟, 李云端, 等. “高分五号”卫星概况及应用前景展望[J]. 航天返回与遥感, 2018, 39(3): 1-13.
- Sun Y Z, Jiang G W, Li Y D, et al. GF-5 satellite: overview and application prospects[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2018, 39(3): 1-13.
- [17] NASA. Plankton, aerosol, cloud, ocean ecosystem[EB/OL]. (2023-03-30)[2023-04-10]. <https://pace.gsfc.nasa.gov>.
- [18] Mueller J L, Fargion G, McClain C, et al. Ocean optics protocols for satellite ocean color sensor validation, revision 4, volume II: instrument specifications, characterization and calibration[EB/OL]. [2023-04-10]. https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/docs/technical/protocols_ver4_volii.pdf.
- [19] Zibordi G, Voss K J, Johnson B C, et al. Protocols for satellite ocean colour data validation: *in situ* optical radiometry[EB/OL]. [2023-04-10]. <https://ioccg.org/wp-content/uploads/2018/09/draft-protocols-for-satellite-ocean-color-data-validation.pdf>.
- [20] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 海洋调查规范 第 5 部分: 海洋声、光要素调查: GB/T 12763.5—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Specifications for oceanographic survey: Part 5: survey of acoustical and optical parameters in the sea: GB/T 12763.5—2007[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [21] Groetsch P M M, Gege P, Simis S G H, et al. Validation of a spectral correction procedure for Sun and sky reflections in above-water reflectance measurements[J]. Optics Express, 2017, 25(16): A742-A761.
- [22] Zibordi G, Ruddick K, Ansko I, et al. *In situ* determination of the remote sensing reflectance: an inter-comparison[J]. Ocean Science, 2012, 8(4): 567-586.
- [23] 张兵, 李俊生, 王桥, 等. 内陆水体高光谱遥感[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 37-44.
- Zhang B, Li J S, Wang Q, et al. Hyperspectral remote sensing of inland water bodies[M]. Beijing: Science Press, 2012: 37-44.
- [24] 田礼乔, 李森, 孙相哈, 等. 天空光遮挡法水体光谱测量便携版漂浮式光学浮标研发与应用[J]. 遥感学报, 2022, 26(1): 211-220.
- Tian L Q, Li S, Sun X H, et al. Development and application of a portable floating optical buoy based on the skylight-blocked approach[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2022, 26(1): 211-220.
- [25] Lee Z P, Pahlevan N, Ahn Y H, et al. Robust approach to directly measuring water-leaving radiance in the field[J]. Applied Optics, 2013, 52(8): 1693-1701.
- [26] Zibordi G, Donlon C J, Parr A C. Optical radiometry for ocean climate measurements[M]. Waltham: Academic Press, 2014.
- [27] Reda I, Andreas A. Solar position algorithm for solar radiation applications[J]. Solar Energy, 2004, 76(5): 577-589.
- [28] 王炳忠, 汤洁. 几种太阳位置计算方法的比较研究[J]. 太阳能学报, 2001, 22(4): 413-417.
- Wang B Z, Tang J. Comparison of the different methods for solar position calculation[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2001, 22(4): 413-417.
- [29] 国家质量监督检验检疫总局. 光谱辐射亮度、光谱辐射照度计量器具: JJG 2083—2005[S]. 北京: 中国计量出版社, 2005.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Measuring instruments for spectral radiance and spectral irradiance: JJG 2083—2005[S]. Beijing: China Metrology Publishing House, 2005.
- [30] 国家质量监督检验检疫总局. 光谱辐射照度标准灯检定规程: JJG 384—2002[S]. 北京: 中国计量出版社, 2004.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Verification regulation of spectral irradiance standard lamp: JJG 384—2002[S]. China Metrology Publishing House, 2004.
- [31] 张权, 李新, 翟文超, 等. 可见-短波红外波段光谱模块光机装调及分析[J]. 应用光学, 2019, 40(2): 193-201.
- Zhang Q, Li X, Zhai W C, et al. Opto-mechanical assembly and analysis of spectral module in visible-short wave infrared band[J]. Journal of Applied Optics, 2019, 40(2): 193-201.

- [32] 中华人民共和国国家海洋局. 海洋水色光谱仪检测方法: HY/T 125—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
State Oceanic Administration of the People's Republic of China. Test method of ocean color spectrograph: HY/T 125—2009[S]. Beijing: China Standard Press, 2009.
- [33] 张艳娜. 太阳直射光谱辐照度仪的定标与应用研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.
- Zhang Y N. Research on calibration and application of solar direct irradiance spectroradiometer[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014.
- [34] 赵岩, 李建双. 激光投线仪及其校准[J]. 计量学报, 2006, 27(S1): 195-196.
Zhao Y, Li J S. Calibration of laser line[J]. Acta Metrologica Sinica, 2006, 27(S1): 195-196.

Development and Calibration of Water Apparent Optical Property Acquisition System

Chen Shengli^{1,2}, Zheng Xiaobing^{1*}, Li Xin^{1**}, Wei Wei¹, Liu Enchao¹

¹Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, Anhui, China;

²University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China

Abstract

Objective With the development of hyperspectral and high-resolution ocean color satellite remote sensors, such as hyperspectral imager for the coastal ocean (HICO), advanced hyper-spectral imager (AHSI), and ocean color instrument (OCI), the existing above-water automatic observation systems cannot meet the application needs for on-orbit calibration and *in-situ* verification of these sensors. For example, CE318-SeaPRISM and radiation measurement sensors with enhanced spectral resolution (RAMSES) sensors can only verify multispectral remote sensors, as they have a lower spectral resolution of about 10 nm. However, the hyperspectral remote sensors have a spectral resolution of about 5 nm, which can capture more subtle spectral characteristics of water bodies. Therefore, an above-water hyperspectral radiometer with higher spectral resolution is needed. In addition, the separate radiometric calibration of radiance and irradiance radiometers may also introduce uncertainty of R_{rs} (remote sensing reflectance). To address these challenges and obtain high-precision hyperspectral apparent optical properties data of water bodies, we put forward a design scheme of an acquisition system with three-channel synchronous observation, same dispersion optical path design, and same system calibration. We propose a water apparent optical property acquisition system (WAOPAS), which can provide technical support for high precision on-orbit calibration and product authenticity verification of ocean color remote sensors.

Methods We develop a novel three-channel hyperspectral acquisition system for ocean color remote sensing based on the principle of above-water measurement. To achieve high spectral matching consistency among the three radiometers, we use the same dispersion acquisition unit and different front optical system designs. We also implement shutter synchronization and wireless remote transmission technologies to enable the synchronous and rapid multiple acquisition of sea surface radiance ($L_{surface}$), sky radiance (L_{sky}), and sea surface incident irradiance (E_s), which can cope with the complexity and variability of the marine environment. Furthermore, we utilize GPS positioning and tracking technology to automatically adjust the observation geometry and avoid sun glint. We apply an automatic integration time design to automatically adjust parameters according to the environmental light intensity and water transparency, adapting to the diversity of the marine environment. To enhance the stability and reliability of the instrument, we leverage an integrated instrument housing and multiple protection design. To improve the accuracy of radiometric measurement, we adopt a near-synchronous radiometric calibration scheme of radiance and irradiance, which can be traced back to the National Institute of Metrology of China (NIM). Finally, we conduct a comparison experiment with HR-1024i and RAMSES outdoor to verify the accuracy of the measurement system.

Results and Discussions The WAOPAS is calibrated and tested in the laboratory. It has a spectral range of 350–900 nm, a spectral resolution better than 3 nm, and functions of automatic observation geometry adjustment, automatic gain integration time, data remote transmission, and automatic preprocessing. It can realize unattended observation in all weather conditions. The radiance and irradiance meters have the same spectral range and sampling interval, and the maximum difference in resolution is 0.26 nm, ensuring the spectral matching of the measurements. The radiance and irradiance are calibrated by the same calibration system and a near-synchronous calibration method, decreasing the remote

sensing reflectance measurement uncertainty of 0.34% – 0.83% (ratio coefficient $K=1$). The outdoor comparison experiment with international mainstream measurement instruments preliminarily verifies the accuracy and feasibility of the measurement.

Conclusions We present WAOPAS that synchronously and rapidly measures sea surface radiance, sky radiance, and sea surface incident irradiance. The main features of WAOPAS include: 1) the same dispersion optical path design that ensures consistent spectral range and resolution; 2) a near-synchronous radiometric calibration of radiance and irradiance that can be traced back to the NIM, which significantly reduces R_{rs} measurement uncertainty; 3) the shutter synchronization and wireless remote transmission technology that enables simultaneous data acquisition by three radiometers; 4) the GPS positioning and tracking technology that automatically adjusts observation geometry and avoids sun glint; 5) an automatic gain integration time design that adapts to different light intensity and water transparency; 6) an integrated instrument housing and multiple protection design that enhances stability and reliability. We evaluate WAOPAS by comparing it with HR-1024i and RAMSES in outdoor experiments and find high measurement accuracy. For the measurement and application of water objects, we conduct a continuous observation experiment at the Dongpu Reservoir in the western suburbs of Hefei. Due to space limitations, the process and results of residual item correction, data quality control, and high-resolution satellite authenticity inspection will be reported in another article.

Key words oceanic optics; above-surface method; remote sensing reflectance ratio; radiometer