

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

田礼乔¹, 李森¹, 孙相晗¹, 孙兆华², 宋庆君³

1. 武汉大学 测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉 430079;

2. Easy Ocean Technology Ltd., Halifax B3H1N4, Canada;

3. 自然资源部国家卫星海洋应用中心, 北京 100081

摘要: 离水辐亮度 L_w (Water-leaving radiance) 是水色遥感现场观测中的关键物理量之一, 由其计算获得的遥感反射率 R_{rs} (Remote sensing reflectance) 是水色遥感参数反演的最基本参数。天空光遮挡法 SBA (Skylight-blocked approach) 可以直接测量水体离水辐亮度, 作为一种新兴方法具有较强的推广应用潜力。本文介绍了基于天空光遮挡法的便携版漂浮式光学浮标 FOBY-P (the Portable Floating Optical Buoy), 其具有浮体自阴影小、布放简便等优势, 在中国近海开展的现场观测实验结果表明: (1) FOBY-P 结构设计上能在一定程度上避免太阳天顶角较大条件下浮体的自阴影遮挡影响, 初步评估结果表明其 400—700 nm 自阴影影响在浑浊水体 <5%, 在清洁水体约为 1%—3%; (2) 在高海况下, 传感器倾角随海况增大而变化剧烈, FOBY-P 能保证在 3—4 级海况下观测倾角小于 5° 的有效观测占比超过 50%; (3) 通过与基于水面以上法的三通道 TriOS RAMSES 高光谱辐射计同步观测结果对比, 二者一致性较高 ($r > 0.9$), 在 490—565 nm 波长范围内 R_{rs} 的偏差 <5%, 差异可能由观测方法不同引起, 水面之上法水—气界面校正的不确定性可能是引起部分偏差的重要因素之一。该研究表明便携版漂浮式光学浮标 (FOBY-P) 可满足近海较高等级海况 (3—4 级) 下的复杂水体现场观测需求, 随着针对 FOBY-P 的数据质量控制与处理方法的不断优化, 有望获取更高质量的现场水体光谱观测结果。

关键词: 水色遥感, 水体光谱, 现场测量, 天空光遮挡法, 便携版漂浮式光学浮标

引用格式: 田礼乔, 李森, 孙相晗, 孙兆华, 宋庆君. 2022. 天空光遮挡法光谱测量便携版漂浮式光学浮标研发与应用. 遥感学报, 26(1): 211–220

Tian L Q, Li S, Sun X H, Sun Z H and Song Q J. 2022. Development and Application of a Portable Floating Optical Buoy based on the Skylight-blocked Approach. National Remote Sensing Bulletin, 26(1): 211–220 [DOI: 10.11834/jrs.20221285]

1 引言

离水辐亮度 L_w (Water-leaving radiance) 是水色遥感现场观测中关键物理量之一, 由其计算获得的遥感反射率 R_{rs} (Remote sensing reflectance) 是水色遥感参数反演的最基本参数, 也是描述水体光谱特性的重要参数之一 (Antoine, 2012)。现场准确测量的水体离水辐亮度是支撑水色遥感监测的重要基础保障, 并广泛应用于辐射定标、大气校正与参数反演的研究与应用过程 (Morel, 1980; Zibordi

等, 2006; Zibordi 等, 2009; Hooker 等, 2002; Lee 等, 2013)。但目前为止, 由于测量方法和技术的局限性, 准确测量离水辐亮度仍然是一个极具挑战性的工作。

常见的水体遥感反射率现场获取方法有 3 种: 剖面法、水面之上法和天空光遮挡法。水面之上法是目前 II 类水体光谱特性研究中最常用的测量方法, 但是由于无法直接测得离水辐亮度, 需要剔除总信号中的天空光。专家学者提出了多种天空光剔除方法 (Mueller 等, 2002; Lee 等, 2010;

收稿日期: 2021-04-30; 预印本: 2021-08-18

基金项目: 国家重点研发计划 (编号: 2018YFB0504900, 2018YFB0504904); 国家自然科学基金 (编号: 42071325, 42176183); 测绘遥感信息工程国家重点实验室专项科研经费、武汉大学“985 计划”和国家重点实验室装备专项基金

第一作者简介: 田礼乔, 1980 年生, 男, 教授, 研究方向为水体光学装备研发与组网观测, 国产卫星水色遥感大数据处理与基于深度学习算法的水环境参数反演与监测应用等。E-mail: tianliqiao@whu.edu.cn

通信作者简介: 李森, 1996 年生, 男, 硕士研究生, 研究方向为水体光学装备研发与组网观测。E-mail: lisen9368@whu.edu.cn

Cui等, 2013), 但相对复杂的后处理流程对遥感反射率结果仍带来较大不确定性 (Lee等, 2013)。天空光遮挡法 SBA (Skylight-blocked approach) 是一种新兴的现场水体光谱测量方法 (Lee等, 2013)。SBA 通过安装一个锥形遮光罩, 遮光罩阻挡了大气散射光和水面反射的天空光信号进入辐亮度探头, 这样就可以实现 L_w 的直接测量, 从而减小了后处理过程带来的不确定性; 同时, SBA 具有测量步骤简便, 受环境影响较小的优势 (田礼乔等, 2020)。图 1 展示了天空光遮挡法观测方案的演变, 遮光罩由最初管状设计 (Lee等, 2010; Ahn等, 1999) 到球形设计 (Tanaka等, 2006) 再到目前的锥形设计, 既保证了辐亮度探头视场不受遮挡, 又尽量减小体积, 减少了自阴影的影响。Lee等 (2013) 基于 Satlantic HyperPro II 系统配套锥形遮光罩设计的 SBA 观测系统已经比较完善, 但是由于两探头分别位于浮体不同侧, 太阳天顶角较大条件下, 辐亮度探头在背对太阳时容易受到浮体阴影遮蔽 (Lee等, 2019; Shang等, 2017; 陈旭磊等, 2016)。

近年来, 天空光遮挡法的数据处理方法和观测规范不断完善。数据处理主要集中于自阴影校正方面, Shang等 (2017) 和 Yu等 (2021) 提出了针对 SBA 的自阴影校正模型; 陈旭磊等 (2016) 和 Lin等 (2020) 采用现场实验的方式, 在控制实验环境的条件下评估了自阴影校正模型的有效性。观测规范方面; Lee等 (2019) 从理论方法、装备设计、测量前传感器定标、暗电流校正、测量周期等环节, 以及观测后数据质量控制、自阴影校正等方面进行了系统的总结; Ruddick等 (2019) 重点分析了天空光遮挡法的不确定性来源。数据评价方面; Wei等 (2021) 就 SBA 在不同水体类型现场观测不确定性开展了精度评价工作。上述研究为天空光遮挡法在理论、规范、数据处理上做了很好的总结, 推动了 SBA 的应用和发展。

同时, 基于天空光遮挡法的现场观测数据已经广泛应用于大气校正 (Wang等, 2020; Wei等, 2018)、水色要素反演 (Jiang等, 2021; Pahlevan等, 2020; Wei等, 2019)、水表面辐射透过率估算 (Zoffoli等, 2017; Wei等, 2015)、数据真实性检验 (Pahlevan等, 2017; Pahlevan等, 2016) 等方面。上述系列应用一方面体现了 SBA 在水色遥感领域的应用前景, 另一方面需要专家学者在装备研发上不断完善。

装备研发方面, 双通道设计将辐照度探头与辐亮度探头集成, 设置于浮体中央, 能有效避免观测方位角变化对浮体阴影的影响, 如图 1 (d)。基于该设计理念, Tian等 (2020) 进行了系统设计, 先后研制了两个版本的漂浮式水体光谱测量系统, 或称漂浮式光学浮标 FOBY (the Floating Optical Buoy)。该研究中详细介绍了浮标系统的设计原理和具体模块组成, 并在珠江口、洪湖开展现场实验。但是上述漂浮式光学浮标仍然存在一定的不足, 如圆形浮体在太阳天顶角较大条件下可能会产生较大自阴影, 采用的传感器缺少现场观测时倾角等姿态记录, 观测设备体积较大, 布放困难, 不利于高效的现场测量、数据质量控制等工作, 从而影响现场测量效率与观测数据精度。

因此本研究基于 SBA 研发了一款便携版漂浮式光学浮标 FOBY-P (the Portable Floating Optical Buoy), 并在中国近海开展现场观测实验, 评价其在仪器自阴影、传感器倾角、数据质量等方面的表现。

2 便携版漂浮式光学浮标研发

便携版漂浮式光学浮标 (FOBY-P) 采用双通道设计, 根据圆形浮标 FOBY (Tian等, 2020) 进行优化, 设计更加小型化, 减小了浮体自阴影影响。FOBY-P 的结构设计如图 2 所示, 浮体采用三脚架作为支撑, 三脚架臂长 65.2 cm, 直径小于 1 cm, 支撑架末端安装浮体与配重块, 浮体提供系统在水面观测的浮力, 配重块可以根据现场测量中遮光罩入水深度需要进行调节。其他硬件包括光谱测量模块、数据采集模块及供电模块进行了小型化设计并集成于中央主机, 极大地缩小了体积。数据采集模块增加姿态传感器, 可以记录每次光谱观测的传感器倾角, 精度为 0.1° 。光谱仪和传感器指标设计可参见 (Tian等, 2020) 中的参数介绍。

上述设计具有以下优势: (1) 减小了浮体产生的自阴影。相对于圆形浮体, 三脚支架体积小, 因此产生更少的自阴影, 并且, 通过自阴影校正模型可以进一步减小自阴影的影响; (2) 在较高等级海况下水体中保持较稳定的观测姿态。三角形的支撑架设计, 减小了波浪引起的浮标观测倾角; 配重块重量可调整, 可以保证遮光罩的入水深度一致, 减少不同观测站位测量值之间的不确定性; (3) 方便运输和现场实验布放。中央主机

体积小、重量轻，小型化设计方便运输携带，使得现场观测更加便利，1—2人即可利用FOBY-P完成现场测量；该设计同时增加了系统的稳定性，

避免了野外复杂环境对数据传输天线、GPS等设备的干扰，使系统更具鲁棒性。

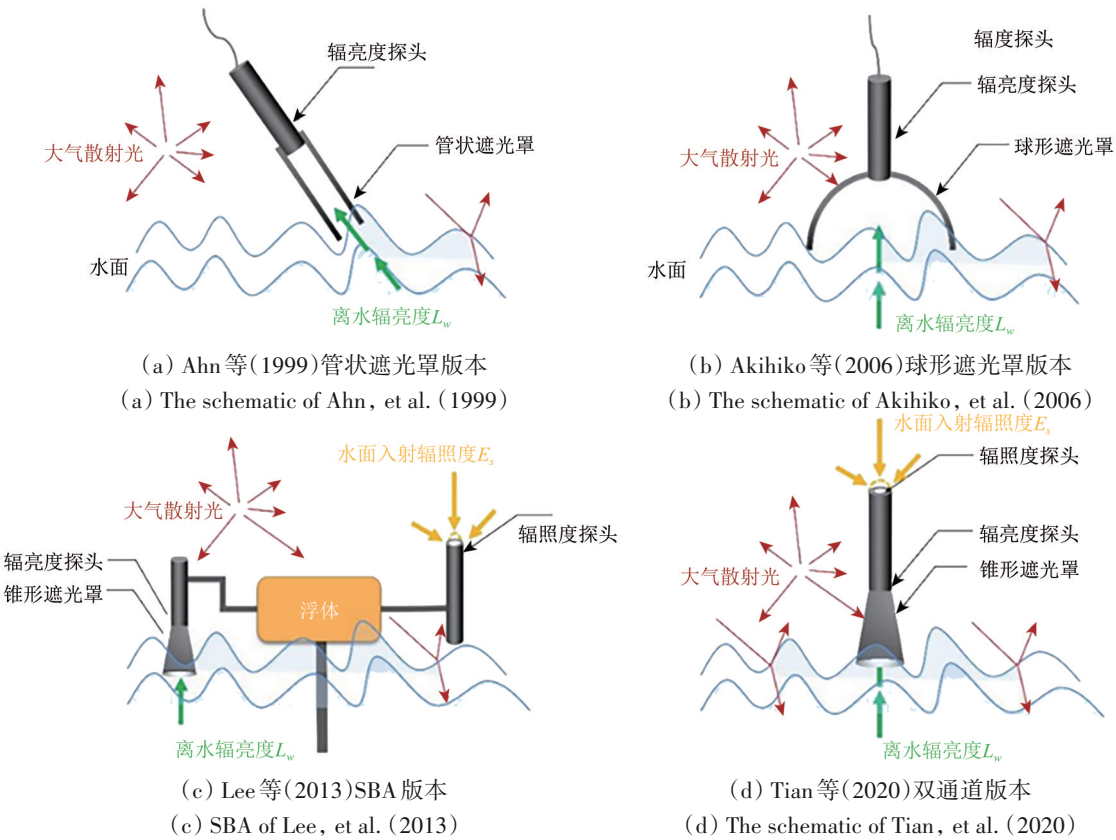


图1 天空光遮挡法方案演变

Fig. 1 The schematic and it's development of the skylight-blocked approach (SBA)

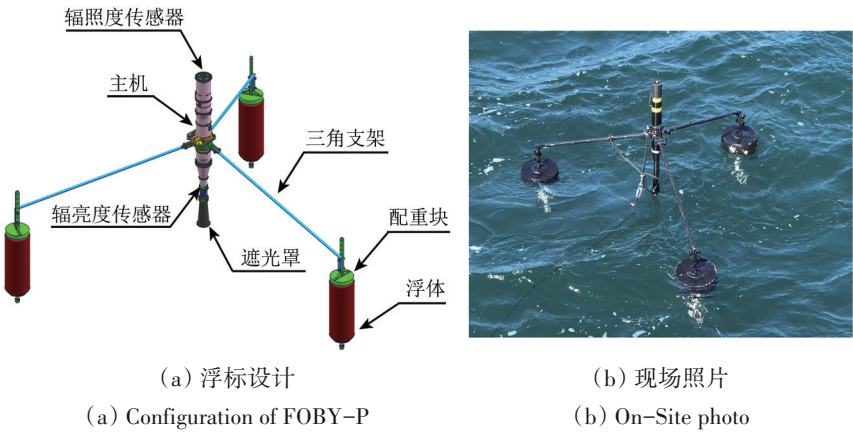


图2 便携版漂浮式光学浮标设计与现场照片

Fig. 2 The configuration and filed photo of the Portable Floating Optical Buoy (FOBY-P)

3 现场观测与数据处理

3.1 实验区

中国近海受陆源物质、海底地形、季风、季节性洋流、台风、降水等多因素综合影响，水体

光学特性复杂且时空差异明显（李铜基，2012）。实验区主要包括中国海域两部分，中国东部沿海及南海水域。中国东部沿海水域包含渤海、黄海及东海北部（118.94°E—124.51°E，29.46°N—40.49°N），测试时间为2018-10-07—11-05，共33个站点。

南海水域主要位于南海海南岛南部沿岸 (108.31°E—112.20°E, 17.45°N—18.50°N), 测试时间为2018—10—02—10—12, 共38个站点。现场观测时最高风速达14 m/s, 浪高2.3 m, 海况变化剧烈。

中国近海受陆源物质、海底地形、季风、季节性表层海流、台风、降水等多因素综合影响, 水体光学特性复杂且时空差异明显 (李铜基, 2012)。现场观测时最高风速达14 m/s, 浪高2.3 m, 海况变化剧烈。

3.2 数据处理与评价指标

实验过程遵循观测规范 (Lee等, 2019), 每个观测站位正式测量前调整配重块重量, 保证现场观测中遮光罩入水深度控制在2 cm左右 (Tian等, 2020)。为了避免船体阴影的影响, 漂浮式光学浮标布放位置距离船30 m左右, 每个站点分别观测3次, 每次连续测量不少于100条同步的离水辐亮度 (L_w) 及下行辐照度 (E_s) 光谱记录, 光谱仪定标的波长范围为365—889 nm, 按照式 (1) 计算遥感反射率 (R_{rs}):

$$R_{rs} = \frac{L_w}{E_s} \quad (1)$$

数据处理按照 Lee 等 (2019) 提出的规范进行: (1) 剔除观测结果中传感器倾角较大数据, 以5°为剔除阈值; (2) 计算遥感反射率在698 nm处的概率密度函数, 并剔除前后15%的数据, 以避免离水辐亮度数据被污染的情况; (3) 利用保留数据计算均值及标准差获得最终的遥感反射率结果; (4) 按照 Shang 等 (2017) 模型进行仪器自阴影校正, 模型中吸收系数 $a(\lambda)$ 和散射系数 $b_b(\lambda)$ 按照 Tian 等 (2020) 利用的方法进行测量和计算。

同时, 在观测中采用三通道 TriOS RAMSES 高光谱辐射计进行走航式水面之上法船载测量, 该系统共有两个辐亮度探头, 一个用于观测总辐亮度 (L_t), 一个用于观测天空光 (L_{sky}), 辐照度探头观测下行辐照度 (E_s), 观测几何会自动调整按照海洋光学规范推荐的天顶角40°和方位角135°进行观测 (Mueller等, 2002), 由式 (2) 计算水体遥感反射率 (R_{rs})。在本研究中, 菲涅尔反射系数 ρ_f 通过非线性光谱优化方法和生物光学模型获得 (Cui等, 2013)。

$$R_{rs} = \frac{L_t - \rho_f \cdot L_{sky}}{E_s} \quad (2)$$

研究中采用以下统计量评价 FOBY-P 与 TriOS RAMSES 观测结果, 包括相关系数 r (correlation

coefficient)、相对均方根偏差 r RMSD (the Relative root-Mean Square Deviation)、偏差 (bias)、平均绝对百分比误差 MAPD (Mean Absolute Percentage Difference) 和无偏平均绝对百分比误差 SMAPD (symmetric Mean Absolute Percentage Deviation), 公式如下:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (S_{i,1} - \bar{S}_1)(S_{i,2} - \bar{S}_2)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (S_{i,1} - \bar{S}_1)^2 \sum_{i=1}^n (S_{i,2} - \bar{S}_2)^2}} \quad (3)$$

$$r\text{RMSD} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{S_{i,1} - S_{i,2}}{S_{i,2}} \right)^2} \times 100\% \quad (4)$$

$$\text{bias} = \text{median} \left((S_{i,1} - S_{i,2}) / S_{i,2} \times 100\% \right) \quad (5)$$

$$\text{MAPD} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| (S_{i,1} - S_{i,2}) / S_{i,2} \right| \times 100\% \quad (6)$$

$$\text{SMAPD} = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{S_{i,1} - S_{i,2}}{S_{i,1} + S_{i,2}} \right| \times 100\% \quad (7)$$

式中, S_1 与 S_2 分别表示两同步观测系统获得的遥感反射率结果。

4 结果与讨论

4.1 现场观测水体光谱

经自阴影校正后现场遥感反射率结果如图3所示。曲线A展示了悬浮颗粒物主导的Ⅱ类水体光谱特征, 水体呈黄色, R_{rs} 光谱整体偏高, 在570—671 nm有一个宽阔的反射峰, 800 nm处有一较小的反射峰, 呈现明显的“双峰”特征, 在近红外波段的 R_{rs} 大于0。曲线B展示了另一种Ⅱ类水体光谱特征, R_{rs} 光谱在560 nm左右有明显的反射峰, 水体呈浅绿色。曲线C展示了Ⅰ类水体光谱特征, R_{rs} 光谱从400—700 nm呈逐渐下降趋势, 至近红外波段其值趋于0, 水体呈深蓝色, 其光谱特征与 (Lee等, 2015) 等研究结果一致。

4.2 仪器自阴影误差分析

自阴影评估和校正是天空光遮挡法数据处理的关键问题 (Ruddick等, 2019)。在天空光遮挡法中, 遮光罩或浮体会产生阴影, 造成水面入射光量减少, 从而影响 L_w 的观测。Shang 等 (2017) 将自阴影误差表达为遮光罩尺寸/底面直径 R 、太阳天顶角 θ_w 、水体光学性质 (吸收系数 $a(\lambda)$ 和散射系数 $b_b(\lambda)$) 的函数, 如式 (8)、式 (9) 所示。

$$\varepsilon = 1 - \exp\left(-K \frac{R}{\tan(\theta_w)}\right) \quad (8)$$

$$K(\lambda) = \left(3.15\sin(\theta_w) + 1.15\right)e^{-1.57b_b(\lambda)}a(\lambda) + \left(5.62\sin(\theta_w) - 0.23\right)e^{-0.5a(\lambda)}b_b(\lambda) \quad (9)$$

式中, R 受仪器设计决定, 遮光罩底面直径越大, 产生的自阴影误差也越大 (陈旭磊 等, 2016)。但

是除遮光罩外, 仪器浮体也会产生自阴影, 影响水体光场。在 SBA 系统现场观测中, 辐亮度传感器背朝太阳方向时 (观测方位角为 180°), 即使在太阳高度较高情况下 ($\theta_w=30^\circ$), 自阴影误差也会达到 25%—40% (Shang 等, 2017), 上述误差只能通过控制现场观测方位来避免, 难以通过算法进行校正。

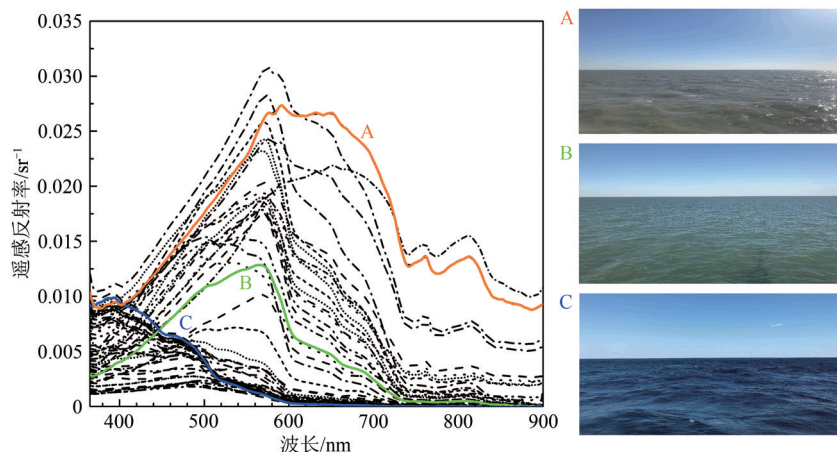


图3 2018年FOBY-P获得的中国近海遥感反射率光谱

Fig. 3 The R_{rs} spectra obtained by FOBY-P in the offshore sea of China in 2018

漂浮式光学浮标 (FOBY) 的圆形浮体设计更好地避免了观测方位的影响, 但是在太阳天顶角较大条件下, 仍然可能会产生自阴影, 而 FOBY-P 三脚支撑架浮体设计则尽可能地避免了浮体自阴影影响。为了定量评估浮体不同形状对其自阴影的影响, 本研究采用蒙特卡罗模拟方法 (Gordon 等, 1975; 唐军武, 1999), 模拟漂浮式光学浮标 FOBY (Tian 等, 2020) 与 FOBY-P 的自阴影误差。模拟参数设置如下: 太阳天顶角 $\theta_w=45^\circ$, 水体光学特性参数分别为叶绿素 a 浓度 $\text{Chl-a}=5 \text{ mg/m}^3$, 悬浮颗粒物浓度 $\text{SPM}=3 \text{ g/m}^3$, 有色可溶性有机物在 440 nm 处的吸收系数 $ag(440)=0.3 \text{ m}^{-1}$, 遮光罩底面直径 $R=4 \text{ cm}$ 。得到模拟的不受自阴影影响的遥感反射率 $R_{rs}^{\text{simulated}}$ 和受自阴影误差影响下的两设备遥感反射率 R_{rs}^{FOBY} 及 $R_{rs}^{\text{FOBY-P}}$, 并计算二者的相对偏差。如图 4 所示, 由于 FOBY 圆形浮体产生更大的自阴影, FOBY 直接获得的 R_{rs} 相较于 FOBY-P 较低。FOBY 在 400—700 nm 处的自阴影误差在 8%—10% 范围内, FOBY-P 在相同波长范围误差在 2%—5% 范围内。700 nm 后, 由于遥感反射率值减小, 二者相对偏差均明显增大。这也一定程度上说明, 在该模拟条件下, 相对于圆形版本的 FOBY, 三脚支撑浮体设计的 FOBY-P 自阴影更小, 有望得到更

加准确的离水辐亮度和遥感反射率数据。当然由于本身蒙特卡罗模拟存在一定的误差, 具体情形还需要进一步深入讨论。

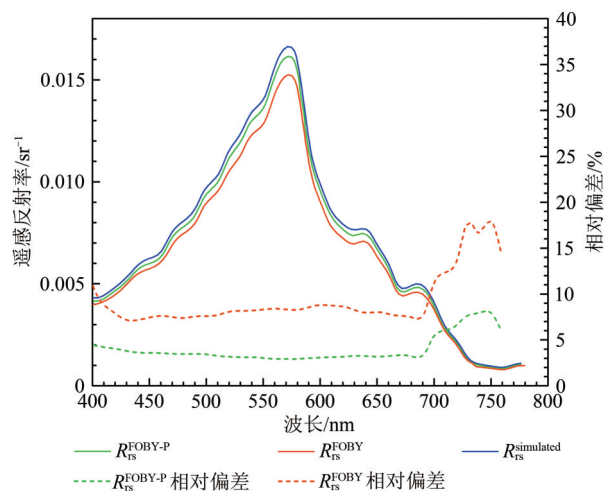


图4 蒙特卡罗模拟 FOBY 与 FOBY-P 自阴影影响下的遥感反射率及相对偏差 ($\theta_w=45^\circ$, $\text{Chl-a}=5 \text{ mg/m}^3$, $\text{SPM}=3 \text{ g/m}^3$, $ag(440)=0.3 \text{ m}^{-1}$, $R=4 \text{ cm}$)

Fig. 4 Comparison of self-shading effect on FOBY and FOBY-P by Monte Carlo simulation. ($\theta_w=45^\circ$, $\text{Chl-a}=5 \text{ mg/m}^3$, $\text{SPM}=3 \text{ g/m}^3$, $ag(440)=0.3 \text{ m}^{-1}$, $R=4 \text{ cm}$)

为了进一步评价 FOBY-P 不同类型水体自阴影影响, 研究选取现场获取的几条典型光谱曲线,

用Shang等(2017)模型进行自阴影校正,并进行校正前后的光谱比较。图5展示了浑浊水体(橙色)与清洁水体(蓝色)自阴影校正前后FOBY-P遥感反射率光谱。 R_{rs}^{shade} 表示自阴影校正前遥感反射率光谱, R_{rs}^{cor} 表示自阴影校正后遥感反射率光谱, APD为二者绝对百分比偏差。可以看出不同水体类型自阴影误差存在一定差异但都在较低水平,相对于清洁水体,浑浊水体自阴影影响相对较高。自阴影误差在400—700 nm范围,浑浊水体在2%—5%,清洁水体<1%。700 nm后,由于遥感反射率值变小,尤其清洁水体在该波长范围基本为0,其二者绝对百分比误差都有明显增大,浑浊水体最高达到约20%,清洁水体在5%左右。最终获得的遥感反射率光谱的标准差也有一定差异,浑浊水体较高,在400—500 nm约为 $(5-6)\times 10^{-4}$,清洁水体约为 $(1-2)\times 10^{-4}$ 。上述结果表明,在本次测量中,在400—700 nm清洁水体自阴影误差小于5%,但浑浊水体受自阴影影响略大。虽然FOBY-P的小型化设计进一步降低了自阴影影响,但仍建议采用合适的校正模型进行数据的自阴影校正处理。

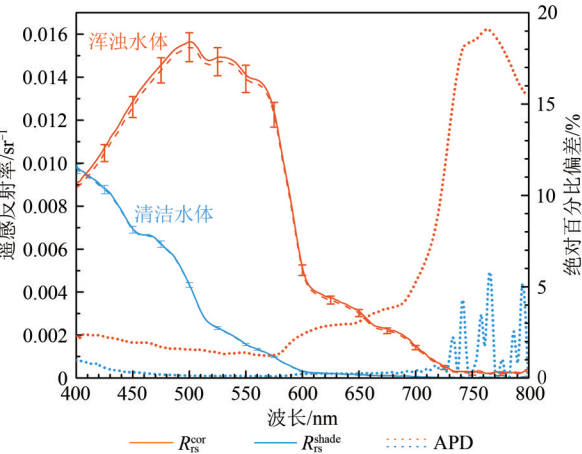


图5 不同水体类型自阴影校正前后FOBY-P获得遥感反射率结果对比

Fig. 5 Comparison of self-shading effect on FOBY-P in different water types

4.3 传感器倾角分析

传感器倾角可由姿态传感器记录,是评价现场观测姿态的重要指标。在理想观测条件下,辐射传感器应当沿竖直方向。现场观测时,由于受水面浪涌等因素的影响,浮标摇摆导致辐射传感器偏离竖直方向。传感器倾角会对下行辐照度 E_e 的测量产生较大的影响,特别是在晴空环境下影

响更大(Ruddick等,2019)。数据处理规范中常采用5°倾角作为阈值进行数据质量控制(Lee等,2019),因此评估FOBY-P较高等级海况下的倾角表现是十分必要的。

研究中将有辅助记录的59个站点实测风速及浪高按照气象观测标准(张庆阳,1985)分为4级海况,并统计分析不同海况下,仪器观测的倾角分布,具体的数据如表1所示。在所有观测中,大部分站点海况分布在2—3级,实测浪高0.1—1.25 m,设备倾角随海况级别变高也相应变大。倾角平均值从1级海况下的2.14°到4级海况下的6.26°,中值与标准差也相应增加,表明浮标在高海况下倾角姿态变化更加明显。

表1 不同海况下的倾角统计

Table 1 The statistics of buoy tilts in different sea states

海况	1	2	3	4
风速/(m/s)	0.3—1.5	1.5—3.5	3.5—8.0	8.0—14.0
浪高/m	0—0.1	0.1—0.5	0.5—1.3	1.3—2.5
站点数目	2	18	37	10
光谱数目	100	780	1639	352
倾角平均值	2.14	4.56	5.78	6.26
倾角中值	2	4	5	5
倾角标准差	1.32	3.72	5.1	5.61

研究分别统计了观测数据在4级海况下倾角频率分布及累计频率(图6)。在低等级海况(1级)下,仪器姿态保持稳定,倾角分布主要集中于0°—3°,以5°作为剔除阈值,98%的数据符合倾角条件;随着海况增加,倾角逐渐增大分布向右移动,以5°作为剔除阈值,在较高等级海况下(3—4级)下约有50%以上的数据满足条件。上述研究表明在较高等级海况下漂浮式光学浮标能保持一定的姿态稳定性,虽然传感器倾角随海况级别升高而变大,但按照现有的数据处理规范,仍能够保障观测数据的有效率,方便后续数据质量控制。

4.4 近海观测数据对比

为了评估FOBY-P近海观测的数据质量,本文将其与基于水面之上法的三通道TriOS RAMSES高光谱辐射计获得的 R_{rs} 结果进行对比验证,共有12个匹配结果。实验选取412、443、490、520、565、670、750、865 nm几个水色遥感典型波长进行统计分析。

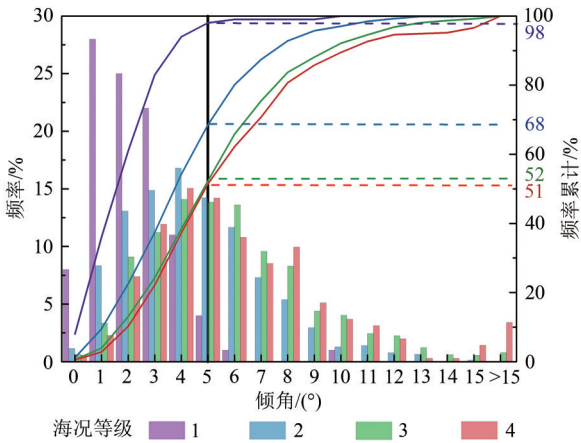


图6 不同海况下观测倾角频率分布
Fig. 6 The frequency distribution of sensor tilts in different sea states

图7展示了两种观测方式获得遥感反射率的一致性。详细的对比参数见表2，相关系数 r 在400—800 nm均大于0.9，表明二者具有强相关性，但是在865 nm处，由于遥感反射率值很小，二者相关性表现较差。rRMSD, bias, MAPD, SMAPD定量地刻画了不同波段遥感反射率测量值的差异，可以看出在490—565 nm，二者差异性较小，观测结果偏差在5%以内，在412 nm、443 nm和670 nm处在5%—20%，部分差异可能是由观测方法不同引起的，表面之上法水—气界面校正的不确定性也可能是引起部分偏差的重要因素之一。在大于700 nm后，两者的相对偏差较大，但绝对偏差值受低反射率的影响并不大，基本与FOBY在内陆及河口水域的观测结果较为一致。

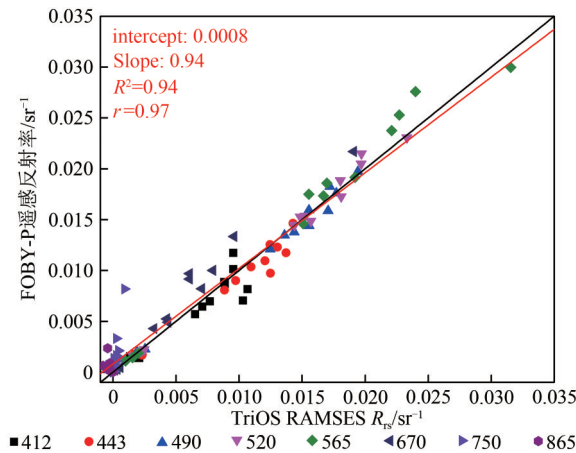


图7 FOBY-P与TriOS RAMSES观测遥感反射率对比
Fig. 7 Comparison of R_{rs} obtained by FOBY-P and TriOS RAMSES

表2 FOBY-P与TriOS RAMSES观测遥感反射率比较
Table 2 Comparison of R_{rs} obtained by FOBY-P and TriOS RAMSES

波长/nm	r	rRMSD/%	bias/%	MAPD/%	SMAPD/%
412	0.92	27	10	21	18
443	0.98	19	9	14	12
490	1.00	7	2	5	5
520	1.00	6	-1	5	5
565	0.99	8	-5	7	8
670	0.99	24	-20	22	25
750	0.91	78	-77	76	123
865	-0.89	292	-171	236	145

5 结 语

漂浮式光学浮标的研发是推动天空光遮挡法在水色卫星辐射定标、大气校正、水色要素反演等领域广泛应用的基础。本文分析了天空光遮挡法的观测装备研制、观测规范、数据处理等方面的研究进展，并详细介绍了便携版漂浮式光学浮标（FOBY-P）研发情况，该浮标具有浮体自阴影小、观测姿态稳定、布放简便等优势。中国近海现场观测实验分析表明：（1）FOBY-P结构设计上能较好避免太阳天顶角较大条件下浮体的自阴影遮挡影响。初步评估结果表明，其400—700 nm自阴影影响在浑浊水体<5%，在清洁水体约为1%—3%；（2）传感器倾角随海况增大而变化剧烈，FOBY-P能保证在3—4级海况下观测倾角小于5°的有效观测占比超过50%；（3）通过与基于水面以上法的三通道TriOS RAMSES高光谱辐射计同步观测 R_{rs} 结果对比，表明二者结果一致性较高（ $r>0.9$ ），在490—565 nm内 R_{rs} 的差异<5%。未来可以进一步优化漂浮式光学浮标设计，如研发可满足长时序定点观测的柱状浮体对称布放观测传感器，根据传感器方位信息挑选受自阴影影响最小的观测数据，同时针对性地研究观测规范，进行不确定性分析研究数据处理方法等。

志 谢 感谢陕西中科启航科技有限公司 (<https://oceanx.cn/>)、广州水色海洋技术有限公司 (<http://www.guangzhoushuise.com/>) 在系统开发方面的支持。

参考文献 (References)

- Ahn Y H, Ryu J H and Moon J E. 1999. Development of red tide and water turbidity algorithms using ocean color satellite. KORDI Report No. BSPE: 98721-00
- Antoine D. 2012. Ocean-Colour Observations from a Geostationary Orbit. Dartmouth, NS, Canada: International Ocean Colour Coordinating Group [DOI: 10.25607/OBP-103]
- Chen X L, Lin G, Shi L H, Shan Y J and Shang S L. 2016. Study on the shading issue of SBA in high-chlorophyll waters. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 55(2): 203-209 (陈旭磊, 林供, 石良海, 单宇杰, 商少凌. 2016. 天空光遮蔽法在高叶绿素水体中的阴影问题研究. *厦门大学学报(自然科学版)*, 55(2): 203-209) [DOI: 10.6043/j.issn.0438-0479.2016.02.010]
- Cui T W, Song Q J, Tang J W and Zhang J. 2013. Spectral variability of sea surface skylight reflectance and its effect on ocean color. *Optics Express*, 21(21): 24929-24941 [DOI: 10.1364/OE.21.024929]
- Gordon H R, Brown O B and Jacobs M M. 1975. Computed relationships between the inherent and apparent optical properties of a flat homogeneous ocean. *Applied Optics*, 14(2): 417-427 [DOI: 10.1364/AO.14.000417]
- Hooker S B, Lazin G, Zibordi G and McLean S. 2002. An evaluation of above- and in-water methods for determining water-leaving radiances. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 19(4): 486-515 [DOI: 10.1175/1520-0426(2002)019<0486: AEOAAI>2.0.CO; 2]
- Jiang D L, Matsushita B, Pahlevan N, Gurlin D, Lehmann M K, Fichot C G, Schalles J, Loisel H, Binding C, Zhang Y L, Alikas K, Kangro K, Uusõue M, Ondrusek M, Greb S, Moses W J, Lohrenz S and O'Donnell D. 2021. Remotely estimating total suspended solids concentration in clear to extremely turbid waters using a novel semi-analytical method. *Remote Sensing of Environment*, 258: 112386 [DOI: 10.1016/j.rse.2021.112386]
- Lee Z, Ahn Y H, Mobley C and Arnone R. 2010. Removal of surface-reflected light for the measurement of remote-sensing reflectance from an above-surface platform. *Optics Express*, 18(25): 26313-26324 [DOI: 10.1364/OE.18.026313]
- Lee Z, Pahlevan N, Ahn Y H, Greb S and O'Donnell D. 2013. Robust approach to directly measuring water-leaving radiance in the field. *Applied Optics*, 52(8): 1693-1701 [DOI: 10.1364/AO.52.001693]
- Lee Z, Wei J W, Shang Z H, Garcia R, Dierssen H, Ishizaka J and Castagna A. 2019. On-water radiometry measurements: skylight-blocked approach and data processing (Appendix to IOCCG Protocol Series (2019))/Zibordi G, Voss K J, Johnson B C and Mueller J L, eds. *Protocols for Satellite Ocean Colour Data Validation: In Situ Optical Radiometry*. IOCCG Ocean Optics and Biogeochemistry Protocols for Satellite Ocean Colour Sensor Validation, Volume 3.0. Dartmouth, NS, Canada : IOCCG
- Lee Z, Wei J W, Voss K, Lewis M, Bricaud A and Huot Y. 2015. Hyper-spectral absorption coefficient of pure seawater in the range of 350-550nm inverted from remote sensing reflectance. *Applied Optics*, 54(3): 546-558 [DOI: 10.1364/AO.54.000546]
- Li T J. 2012. China's Coastal Oceans: Marine Optical Properties and Remote Sensing. Beijing: China Ocean Press (李铜基. 2012. 中国近海海洋: 海洋光学特性与遥感. 北京: 海洋出版社)
- Lin H, Lee Z, Lin G and Yu X L. 2020. Experimental evaluation of the self-shadow and its correction for on-water measurements of water-leaving radiance. *Applied Optics*, 59(17): 5325-5334 [DOI: 10.1364/AO.391633]
- Morel A. 1980. In-water and remote measurements of ocean color. *Boundary-Layer Meteorology*, 18(2): 177-201 [DOI: 10.1007/BF00121323]
- Mueller J, Mueller J L, Pietras C, Hooker S B, Clark D K, Morel A, Frouin R and Fargion G S. 2002. Ocean optics protocols for satellite ocean color sensor validation, revision 3, volumes 1 and 2. NASA tech. memo 210004
- Pahlevan N, Schott J R, Franz B A, Zibordi G, Markham B, Bailey S, Schaaf C B, Ondrusek M, Greb S and Strait C M. 2017. Landsat 8 remote sensing reflectance (R_{rs}) products: evaluations, intercomparisons, and enhancements. *Remote Sensing of Environment*, 190: 289-301 [DOI: 10.1016/j.rse.2016.12.030]
- Pahlevan N, Sheldon P, Peri F, Wei J W, Shang Z H, Sun Q S, Chen R F, Lee Z, Schaaf C B, Schott J R and Loveland T. 2016. Calibration/validation of Landsat-derived ocean colour products in Boston Harbour. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLI-B8: 1165-1168 [DOI: 10.5194/isprs-archives-XLI-B8-1165-2016]
- Pahlevan N, Smith B, Schalles J, Binding C, Cao Z G, Ma R H, Alikas K, Kangro K, Gurlin D, Hà N, Matsushita B, Moses W, Greb S, Lehmann M K, Ondrusek M, Oppelt N and Stumpf R. 2020. Seamless retrievals of chlorophyll-a from Sentinel-2 (MSI) and Sentinel-3 (OLCI) in inland and coastal waters: a machine-learning approach. *Remote Sensing of Environment*, 240: 111604 [DOI: 10.1016/j.rse.2019.111604]
- Ruddick K G, Voss K, Banks A C, Boss E, Castagna A, Frouin R, Hieronymi M, Jamet C, Johnson B C, Kuusk J, Lee Z, Ondrusek M, Vabson V and Vendt R. 2019. A review of protocols for fiducial reference measurements of downwelling irradiance for the validation of satellite remote sensing data over water. *Remote Sensing*, 11(15): 1742 [DOI: 10.3390/rs11151742]
- Ruddick K G, Voss K, Boss E, Castagna A, Frouin R, Gilerson A, Hieronymi M, Johnson B C, Kuusk J, Lee Z, Ondrusek M, Vabson V and Vendt R. 2019. A review of protocols for fiducial reference measurements of water-leaving radiance for validation of satellite remote-sensing data over water. *Remote Sensing*, 11(19): 2198 [DOI: 10.3390/rs11192198]

- Shang Z H, Lee Z, Dong Q and Wei J W. 2017. Self-shading associated with a skylight-blocked approach system for the measurement of water-leaving radiance and its correction. *Applied Optics*, 56(25): 7033-7040 [DOI: 10.1364/AO.56.007033]
- Tanaka A, Sasaki H and Ishizaka J. 2006. Alternative measuring method for water-leaving radiance using a radiance sensor with a domed cover. *Optics Express*, 14(8): 3099-3105 [DOI: 10.1364/OE.14.003099]
- Tang J W. 1999. *The Simulation of Marine Optical Properties and Color Sensing Models*. Beijing: Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences (唐军武. 1999. 海洋光学特性模拟与遥感模型. 北京: 中国科学院遥感应用研究所)
- Tian L Q, Li S, Li Y, Sun Z H, Song Q J and Zhao J. 2020. A Floating Optical Buoy (FOBY) for direct measurement of water-leaving radiance based on the skylight-blocked approach (SBA): an experiment in Honghu Lake, China. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 125(10): e2020JC016322 [DOI: 10.1029/2020JC016322]
- Tian L Q, Li S, Sun X H, Tong R Q, Song Q J, Sun Z H and Li Y. 2020. Development of a novel floating water spectral measurement system based on skylight-blocked approach. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 40(9): 2756-2763 (田礼乔, 李森, 孙相晗, 童如清, 宋庆君, 孙兆华, 李勇. 2020. 基于天空光遮挡法的漂浮式水体光谱测量系统研制. *光谱学与光谱分析*, 40(9): 2756-2763) [DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(202009-2756-08)]
- Wang J W, Lee Z, Wei J W and Du K P. 2020. Atmospheric correction in coastal region using same-day observations of different sun-sensor geometries with a revised POLYMER model. *Optics Express*, 28(18): 26953-26976 [DOI: 10.1364/OE.393968]
- Wei J W, Lee Z, Garcia R, Zoffoli L, Armstrong R A, Shang Z H, Sheldon P and Chen R F. 2018. An assessment of Landsat-8 atmospheric correction schemes and remote sensing reflectance products in coral reefs and coastal turbid waters. *Remote Sensing of Environment*, 215: 18-32 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.05.033]
- Wei J W, Lee Z, Lewis M, Pahlevan N, Ondrusek M and Armstrong R. 2015. Radiance transmittance measured at the ocean surface. *Optics Express*, 23(9): 11826-11837 [DOI: 10.1364/OE.23.011826]
- Wei J W, Lee Z, Shang S L and Yu X L. 2019. Semianalytical derivation of phytoplankton, CDOM, and detritus absorption coefficients from the Landsat 8/OLI reflectance in coastal waters. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124(6): 3682-3699 [DOI: 10.1029/2019JC015125]
- Wei J W, Wang M H, Lee Z, Ondrusek M, Zhang S and Ladner S. 2021. Experimental analysis of the measurement precision of spectral water-leaving radiance in different water types. *Optics Express*, 29(2): 2780-2797 [DOI: 10.1364/OE.413784]
- Yu X L, Lee Z, Shang Z H, Lin H and Lin G. 2021. A simple and robust shade correction scheme for remote sensing reflectance obtained by the skylight-blocked approach. *Optics Express*, 29(1): 470-486 [DOI: 10.1364/OE.412887]
- Zhang Q Y. 1985. *Introduction to Meteorological Operation*. Beijing: China Meteorological Press (张庆阳. 1985. 气象业务入门. 北京: 气象出版社)
- Zibordi G, Holben B, Hooker S B, Mélin F, Berthon J F, Slutsker I, Giles D, Vandemark D, Feng H, Rutledge K, Schuster G and Al Mandoos A. 2006. A network for standardized ocean color validation measurements. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 87(30): 293-297 [DOI: 10.1029/2006EO300001]
- Zibordi G, Mélin F, Berthon J F, Holben B, Slutsker I, Giles D, D'Alimonte D, Vandemark D, Feng H, Schuster G, Fabbri B E, Kaitala S and Seppälä J. 2009. AERONET-OC: a network for the validation of ocean color primary products. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 26(8): 1634-1651 [DOI: 10.1175/2009JTECHO654.1]
- Zoffoli M L, Lee Z, Ondrusek M, Lin J F, Kovach C, Wei J W and Lewis M. 2017. Estimation of transmittance of solar radiation in the visible domain based on remote sensing: evaluation of models using in situ data. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 122(11): 9176-9188 [DOI: 10.1002/2017JC013209]

Development and application of a portable floating optical buoy based on the skylight-blocked approach

TIAN Liqiao¹, LI Sen¹, SUN Xianghan¹, SUN Zhaohua², SONG Qingjun³

1. State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping, and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China;

2. Easy Ocean Technology Ltd., Halifax B3H1N4, Canada;

3. National Satellite Ocean Application Service, Ministry of Natural Resource of the People's Republic of China, Beijing 100081, China

Abstract: Water-leaving radiance (L_w) or remote sensing reflectance (R_{rs}) is a fundamental parameter of water color remote sensing. It has been a long-standing and challenging goal to precisely measure L_w . Skylight-Blocked Approach (SBA), a novel approach for *in-situ* water

spectrum measurement, can observe L_w directly screening the impact of the skylight in above-water method. It is not necessary to fulfill complicated post-processing to derive L_w by using SBA, which makes it has great potential to be used in different types of water body. However, there is not an automatic portable instrument to obtain water spectrum through SBA until now. In this study, a portable floating optical buoy (FOBY-P) is developed and tested. FOBY-P has its advantages with a smaller self-shading and an easier deployment compared with previous versions of FOBY with a circular floating body. The *in-situ* measurements in the coast of China through FOBY-P were carried out from October to November 2018 to test the buoy system. The results showed that 1) The self-shading effect of the floating body on the L_w observation under a large solar zenith angle can be effectively avoided by the tripod design of FOBY-P. The errors caused by the self-shading were less than 5% for the R_{rs} of 400—700 nm when it was used in turbid water. And the self-shading effect was only 1%—3% used in clear water; 2) FOBY-P can keep the sensor stable in the different sea state levels. Its effective observation ratio (the tilt angle less than 5°) is over 98% in the 1st sea state. The sensor tilt angle would be greater and greater when the sea state becomes worse. However, the ratio can still reach approximately 50% for the 3rd and 4th sea state; 3) The derived results of FOBY-P are in good agreement with those of TriOS RAMSES sensors. The correlation coefficient r between the R_{rs} of FOBY-P and that of TriOS RAMSES is larger than 0.9, and the R_{rs} difference of them is less than 5% for 490—565 nm. The difference may be caused by the different processing procedures of the two systems with different approaches. The water-air interface correction processing may be one of the factors to cause the uncertainty of TriOS RAMSES observations with above-water method. The result shows that FOBY-P has some advantages in platform stability, ease of use, and measurement accuracy as an automatic water spectrum acquisition instrument based on SBA. In general, FOBY-P can satisfy the requirements of in-situ measurement of R_{rs} in optically complex coastal waters, even during moderate sea state to provide high-quality data. Furthermore, it is only the first version of FOBY-P and further optimization in the design and data processing would improve the performance of the instrument.

Key words: water color remote sensing, water spectrum, insitu measurement, the skylight-blocked approach, the Portable Floating Optical Buoy (FOBY-P)

Supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFB0504900, 2018YFB0504904); National Natural Science Foundation (No. 42071325, 42176183); Special Research Fund of State Key Laboratory of Information Engineering of Surveying, Mapping and Remote Sensing, LIESMARS Special Research Fund, Wuhan University “985 Program” and State key Laboratory Equipment Special Fund