

走航水体高光谱观测系统 SAS 的 数据处理方法开发与检验

胡佳臣, 潘德炉, 王迪峰*, 何贤强, 郝增周

(国家海洋局第二海洋研究所 卫星海洋环境动力学国家重点实验室, 浙江 杭州 310012)

摘要:针对商业化的走航水体高光谱观测系统 SAS (Surface Acquisition Systems), 提出了在走航观测的复杂条件下, 针对关键角度的计算、水气界面反射系数的估算和异常数据剔除等问题, 开发出实用的数据处理方法, 并利用现场数据进行了检验. 结果表明, SAS 走航观测获得的离水辐亮度与站点测量结果具有很好的一致性, 且与同步走航水体浊度的变化趋势一致, 具有较好的可靠性.

关键词:离水辐亮度; 走航观测; 海洋水色遥感; 数据处理

中图分类号:P714.3 **文献标识码:**A

Development and validation of the data processing method for the underway water Hyperspectral Surface Acquisition Systems

HU Jia-Chen, PAN De-Lu, WANG Di-Feng*, HE Xian-Qiang, HAO Zeng-Zhou

(State Key Laboratory of Satellite Ocean Environment Dynamics, Second Institute
of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou 310012, China)

Abstract: The problems about calculation of the key angle, estimation of the reflection coefficient at the moisture interface, and elimination of abnormal data in situ measurement under complex conditions were solved for the currently commercial underway water Hyperspectral Surface Acquisition Systems (SAS). The proposed method was then examined using the in situ data. The results showed that the underway-measured water-leaving radiance by SAS were quite consistent with these measured data at fixed stations. Meanwhile, the variation trends of the underway-measured water-leaving radiance by SAS were similar as the underway water turbidities. These results indicate that the proposed method for the data processing is credible.

Key words: water-leaving radiance, underway measurement, ocean color remote sensing, data processing

PACS: 92.10.Pt

引言

现场测量离水辐亮度是海洋水色遥感建模和遥感产品真实性检验的前提, 走航观测可以满足遥感产品真实性检验对大样本量的需求. 离水辐亮度及遥感反射率是水体的主要表观光学量 (AOPs), 也是

海洋水色遥感的基本参数. 利用水色遥感获取的离水辐亮度或遥感反射率, 可以进一步反演水体表层叶绿素浓度、悬浮物浓度及黄色物质吸收等信息. 而现场测量获取的离水辐亮度和遥感反射率数据, 是海洋水色遥感建模和遥感产品真实性检验的前提. 离水辐亮度和遥感反射率的现场测量, 目前国际水

收稿日期: 2012-08-29, 修回日期: 2013-04-03

Received date: 2012-08-29, revised date: 2013-04-03

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) (2009CB421202); 国家科技支撑计划 (2012BAH32B01, 2013BAD13B01); 海洋公益性行业科研专项 (200905012); 国家自然科学基金 (41322039, 41271378, 41271417), 国家 863 计划 (2007AA092201, 2007AA12Z137, 2008AA09Z104)

Foundation items: Supported by National Basic Research Program ("973" Program) of China (2009CB421202), National Key Technology Research and Development Program of China (2012BAH32B01, 2013BAD13B01), the Public Science and Technology Research Funds Projects of Ocean (200905012), National Natural Science Foundation of China (41322039, 41271378, 41271417), and National High-Tech Research and Development Program ("863" Program) of China (2007AA092201, 2007AA12Z137, 2008AA09Z104)

作者简介 (Biography): 胡佳臣 (1989-), 男, 湖北孝感人, 硕士研究生, 主要从事水色遥感研究. E-mail: hujiachen1989@163.com

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: dfwang@sio.org.cn

色界主要推行水面之上测量法和水下剖面测量法^[1]两类方法. 水面之上法(或水面法)是通过严格仪器定标, 设置合理观测几何和积分时间, 直接测量水表面辐亮度信息, 具有对设备要求低、现场操作简单等优点, 但该方法受海面、大气环境影响大. 水下剖面法则是由水下光场测量外推得到水表信息, 是 NASA(美国国家航空航天局)为 SeaWiFS(海洋宽视场传感器)数据检验制定的海洋光学规范(第一版)中推荐的首选方法^[2], 受环境影响小, 但其布放复杂, 对于浅海和较浑浊水域, 测量误差较大. 因此, 对于我国近海及内陆浑浊水体, 采用水面法较为合适^[3].

当前, 基于水面法利用便携式地物光谱仪(如 ASD、GER 等)对水体 AOPs 进行定点测量, 其现场观测和数据处理方法均较为成熟, 已有国标《海洋调查规范 第 5 部分: 海洋声、光要素调查》^[4]和 NASA 的海洋光学规范(第四版)^[5]可以参照. 定点现场测量可以人为避开太阳耀斑、船阴影等干扰, 从而获得高精度的现场 AOPs 数据. 但定点观测数据量有限, 往往不能满足水色遥感产品真实性检验对大量匹配样本的需求. 近年来, 随着技术的发展, 出现了商业化的走航水体高光谱测量仪器, 可直接固定在船只平台上开展连续走航观测, 极大地提高了现场 AOPs 测量的有效数据量, 其中以加拿大 Satlantic 公司生产的 SAS 系统为典型代表. 对于 SAS 的观测研究, 前人已经做过大量的工作, 如 Hooker 等^[6]在位于威尼斯东边的一个潮水观测塔上应用多光谱 SAS 进行定点长时间序列实测; 李铜基等^[7]利用多光谱 SAS 对黄海典型站位进行了观测; Churnside 等^[8]进行了多光谱 SAS 水色遥感低空航测, 这些都为开展 SAS 走航测量研究奠定了基础.

走航光谱测量不同于定点观测, 太阳入射方位(天顶角和方位角)、观测方位(随航行方位变化)等动态变化, 导致其观测不可避免受到水面太阳耀斑、船阴影、白沫以及水面反射二向性等影响. 因此, 走航光谱测量的数据处理较为复杂, 相关研究也几乎空白. 针对 SAS 走航观测, 在借鉴前人研究的表面法测量离水辐亮度和遥感反射率的基础上, 开发了 SAS 走航高光谱数据处理方法, 并对其进行验证.

1 SAS 测量原理

SAS 主要组成如图 1 所示, 主要包括两个辐亮度传感器(L_i 、 L_t), 辐照度传感器(E_s), 姿态传感器(THS), GPS 接收机, 信号转换器等. 其中 L_i 、 L_t 和

E_s 分别用于测量水面上行辐亮度、下行天空辐亮度和向下辐照度. 为了尽可能避免船行波、船阴影等影响, 需要将 SAS 固定在船首. 另外, E_s 应安装在船顶高处, 避免船体阴影、烟等影响. 同时, 连接 GPS 来获取地理位置和船航行速度、方位等辅助信息. 详细安装及操作流程见 SAS 用户手册^[9].

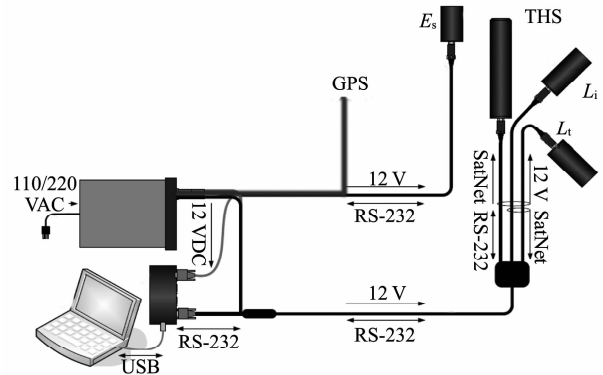


图 1 SAS 系统构成示意图^[9]

Fig. 1 The structure of SAS^[9]

在避开太阳耀斑、船自身阴影等直接影响的情况下, 与定点光谱观测类似, SAS 观测到的水面上行辐亮度 L_t 为

$$L_t = L_w + \rho L_i + \Delta \quad (1)$$

其中 L_w 为离水辐亮度, ρ 为水气界面反射系数, Δ 为外界干扰, 包括耀斑和白帽等, 难以测量和估算. 在海况较好的情况下, 外界干扰可以忽略, 由此可得到离水辐亮度:

$$L_w = L_t - \rho L_i \quad (2)$$

在此基础上, 进一步获得归一化离水辐亮度 (L_{wn}) 和遥感反射率 (R_{rs}):

$$L_{wn} = L_w F_0 / E_s = (L_t - \rho L_i) F_0 / E_s \quad (3)$$

$$R_{rs} = L_w / E_s = (L_t - \rho L_i) / E_s \quad (4)$$

其中 E_s 为 SAS 测量获得的海面入射辐照度, F_0 为平均日地距离的大气层外太阳辐照度^[4,10].

2 SAS 数据处理方法

开发的 SAS 数据处理流程如图 2 所示. 首先, 对 L_i 、 L_t 、 E_s 原始数据依次进行辐射定标、插值和扣除暗电流, 得到三者时间匹配的有效观测记录; 其次, 利用辐射传输模型模拟生成不同角度下的水气界面反射率查找表, 并根据 GPS 数据计算出的角度信息确定每一个记录时刻的水气界面反射系数, 在此基础上, 依据 SAS 测量原理, 得到全部记录的初

始 AOPs (L_{wn} 和 R_{rs});最后,对初始 AOPs 进行质量控制,得到最终有效的 L_{wn} 和 R_{rs} . 由上述流程可知,SAS 走航测量数据处理与定点测量数据处理主要有两个关键不同之处:一是水气界面反射系数的估算;二是质量控制,以自动识别并剔除受太阳耀斑和船舶阴影等影响的记录.

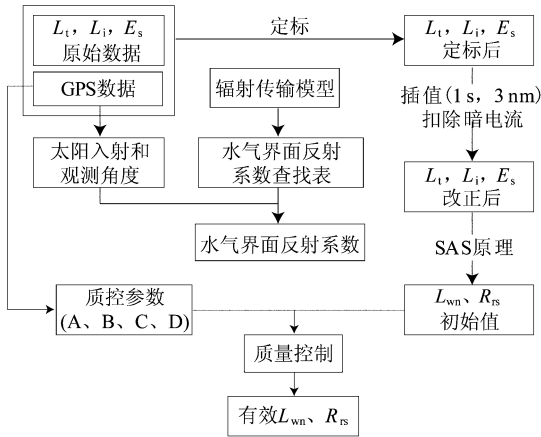


图2 SAS 数据处理流程
Fig.2 The flow chart of the data processing of SAS

2.1 水气界面反射系数估算

水气界面反射系数的估算受观测几何的影响. 以往站点观测广泛采用的观测几何是(观测天顶角 θ , 相对方位角 ϕ) = (30°, 90°)^[11-12]. Mobley^[13] 利用辐射传输模拟方法研究了水气界面反射率的二向性分布,指出当观测几何满足(40°, 135°)时,取 0.028 对于风速小于 5 m/s 或阴天条件下均适用; Foug-nie^[14] 等则认为观测几何为(45°, 135°)可最小化太阳耀斑影响. 目前,站点光谱测量通常采用 Mobley 提出的观测几何, ρ 取常数^[4]. 但对于 SAS 走航观测,太阳、仪器观测几何是不断变化的, ρ 不能简单地取为常数. 此外,纯水在近红外波段具有强吸收特性,对于清洁水体其近红外波段离水辐亮度近似为零^[15-16]. 因此,可直接利用近红外波段水面上行辐亮度和下行天空光辐亮度的比值来确定水气界面反射系数,进而应用到整个谱段. 但对于近岸高浑浊水体,近红外波段离水辐射较大,不能忽略,该方法也不再适用.

在实际情况下,水气界面反射系数不仅与观测几何有关,同时也会受风速和气溶胶的影响. Rud-dick^[17] 和 Aas^[18] 等开发了复杂环境下估算水气界面反射系数简单实用的方法,但其主要针对的是定点观测. 在走航情况下,水气界面反射系数的精确计

算需要利用辐射传输模型. 本文采用了 Jin^[19] 等开发的海洋-大气耦合辐射传输模型 COART (Coupled Ocean and Atmosphere Radiative Transfer). COART 是基于离散纵标法开发的海洋-大气耦合辐射传输模型,全面考虑了太阳辐射在大气、水气界面和水体中的多次散射、折射和反射等过程,并采用 Cox-Munk 小波面概率分布模型进行风生粗糙海面的模拟. 同时,COART 把大气和海洋看作具有不同折射率的耦合介质系统,在计算过程中,将大气、海洋垂向划分为平面平行的薄分层,来获得不同层的辐射场,从而实现对整个大气、海面系统辐射场的模拟.

在利用 COART 计算水气界面反射系数时,设定水体为全吸收,模拟得到不同角度下的水面上行辐亮度和下行天空光辐亮度,进而得到不同角度下水气界面反射系数查找表,再根据 SAS 各个观测时刻的太阳天顶角、观测天顶角和相对方位角,插值得到水气界面反射系数值. 限于篇幅,这里仅给出观测天顶角 45°、风速 7.23 m/s、气溶胶光学厚度(500 nm)0.2 的条件下,水气界面反射系数在不同太阳天顶角和相对方位角下的等值线图见图 3. 从图 3 可以看出,一定太阳天顶角度下,水气界面反射系数随相对方位角增大而减小,若相对方位角大于 60°,其减小趋于平缓. 当相对方位角大于 90°时,水气界面反射系数随太阳天顶角增大而减小. 在太阳耀斑区(相对方位角在 0°附近),水气界面反射系数达到最大值.

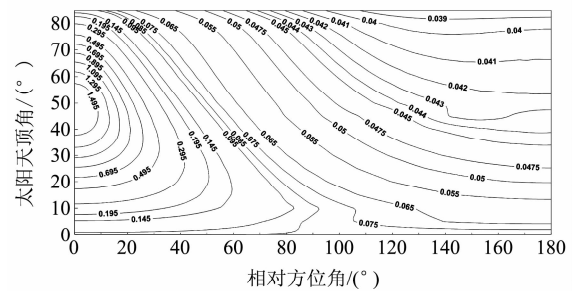


图3 给定条件下,水气界面反射系数在不同太阳天顶角和相对方位角下的等值线图
Fig.3 Under the given conditions, the contour map of water-air interface reflection coefficient in different solar zenith angle and relative azimuth angle

图 4 是利用 COART 模型模拟的在太阳天顶角为 30°,观测天顶角为 45°,相对方位角分别为 45°、90°、135°和 180°条件下,水气界面反射系数(归一化)随海面风速和气溶胶光学厚度(气溶胶类型设为 Mid-Latitude Winter)变化的曲线. 由图可以看出,

在太阳入射方向,前向观测受风速和气溶胶的影响较小,而后向区域受风速和气溶胶的影响较大.因此,在设计水气界面反射率查找表时,尽可能考虑海面风速和气溶胶的变化.

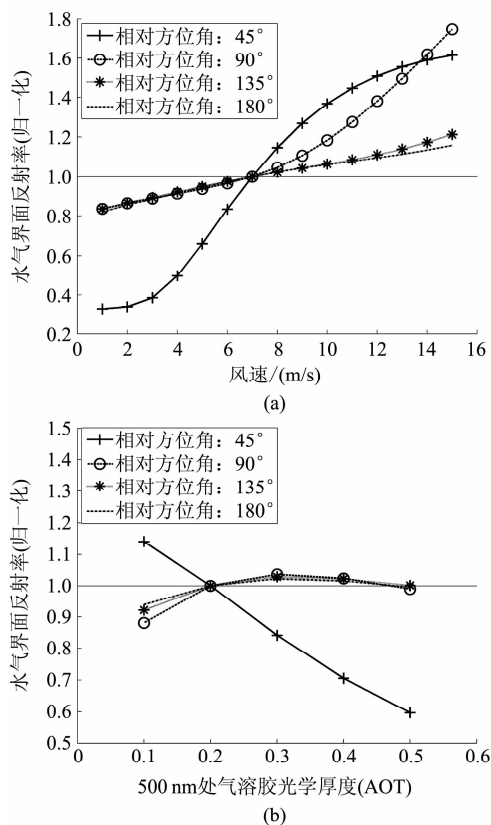


图4 水气界面反射系数(归一化)随海面风速和气溶胶光学厚度的变化曲线(太阳天顶角 30° ,观测天顶角 45°) (a)随海面风速变化,(b)随气溶胶光学厚度变化
Fig. 4 Variations of the reflectance at air-water interface with the wind speed and aerosol optical thickness (solar zenith angle of 30° , viewing zenith angle of 45°) (a) varying with wind speed, and b) varying with aerosol optical thickness

从数据处理流程图可以看出,太阳天顶角、观测天顶角和相对方位角的估算直接影响水气界面反射系数的确定及后续的质量控制.因此,三个角度的精确计算在SAS走航数据处理中占据重要地位,其确定方法如下:

(1) 太阳天顶角 θ^0 : 利用GPS获取的格林威治时间、地理经纬度来计算太阳的天顶角和方位角^[20];

(2) 观测天顶角 θ : 仪器观测的入射光线方向与天顶方向的夹角.对于水面法,其范围可为 $30^\circ \sim 45^\circ$ ^[3].针对SAS,推荐的观测天顶角为 45° ^[7].

(3) 仪器-太阳的相对方位角 θ : 根据计算得到

的太阳方位角, GPS航向及仪器安装方位角(相对正北),确定相对方位角.

2.2 质量控制

水面法测量的关键是如何消除海面辐射亮度场中因波浪影响而引入的太阳耀斑和反射天空光成分^[14].在SAS走航过程中无法通过控制观测几何来避免太阳直射反射和船舶阴影等影响,且连续观测数据量巨大,所以严格、自动的质量控制是获取可靠测量结果的关键.针对SAS走航过程可能出现的异常情况,本文设计的质量控制方法如下:

(1) 航向瞬时变化大: 当船速较小时,尤其是停船时, GPS测量的航向剧烈变化,由前文可知,会影响到SAS数据处理的可靠性.而当船速较大时,由于船自身惯性,航向瞬时变化的幅度较小.这里我们选取船速5节为阈值,剔除船速小于5节的记录.

(2) 太阳耀斑: 根据太阳天顶角、相对方位角、观测天顶角,海面风速、风向来计算太阳耀斑系数^[21-23].若其值大于1‰,则认为观测受耀斑直接影响,予以剔除.

(3) 船自身阴影: 走航测量中,在一定的太阳入射和航向几何下,观测区域可能位于船体的阴影区,此时离水辐亮度偏低,需要予以剔除.判别标准为:左、右各偏仪器中心线 $1^\circ/46^\circ$,且太阳天顶角大于 45° .

(4) 弱光照条件: 据刘志刚等^[24]研究,太阳天顶角大于 70° 的观测数据一般是不可用的,此时光照很弱,仪器的噪声影响显著.此外,日出、日落光照快速变化对观测结果也有一定的影响.

3 SAS走航数据处理结果检验

为检验本文SAS数据处理方法的有效性,分别于2012年2月和3月在长江口-苏北浅滩和杭州湾开展SAS走航观测,如图5所示.图5中走航线为航次期间有效的SAS观测,这是由于SAS只能在白天观测,且阴天情况下一般不进行观测.利用开发的数据处理方法,获得了高光谱($350 \sim 800 \text{ nm}$, 3 nm 分辨率)的归一化离水辐亮度和遥感反射率.限于篇幅,这里仅给出 443 nm 、 554 nm 和 749 nm 三个中心波长的归一化离水辐亮度,如图6所示.与原始走航线(见图5)相比,经质量控制后的处理结果(见图6)自动识别并剔除了受太阳耀斑和船舶阴影等影响的异常数据.为了进一步检验SAS处理结果的可靠性,将其与具有较高精度的站点光谱数据进行比较,并与同步走航的水体浊度测量数据进行趋势比较.

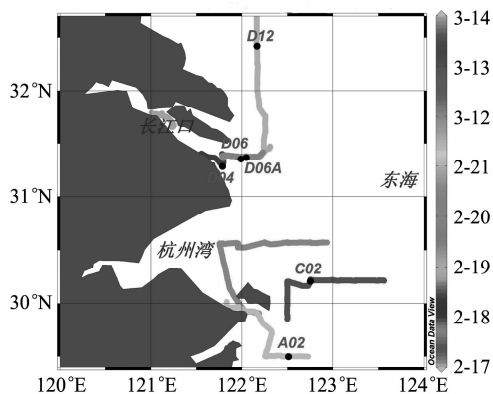


图5 SAS 走航观测航线(色标对应观测日期)
Fig.5 The routes of the underway measurement by SAS (Color bar shows the measurement date)

3.1 与站点光谱观测结果比较

在这两个航次中,同时使用 ASD 公司的 Filed-SpecO R3 便携式地物光谱仪进行站点 AOPs 测量,操作规范与数据处理方法参见《海洋调查规范 第 5 部分:海洋声、光要素调查》^[4]. 2、3 月航次分别测量了 14、17 个站点点. 由于站点 ASD 测量时船速极低,无有效的 SAS 处理结果. 因此,依据时间邻近原则,选取 2 月份 D04、D06、D06A、D12 和 3 月份 A02、C02 共六个站点点(见图 5 中黑点所示),对 ASD 测量的归一化离水辐亮度与其观测前后 SAS 测量进行比较(如图 6 所示). 但要注意两者之间存在有近半小时的到站作业时间差异,对于长江口和杭州湾

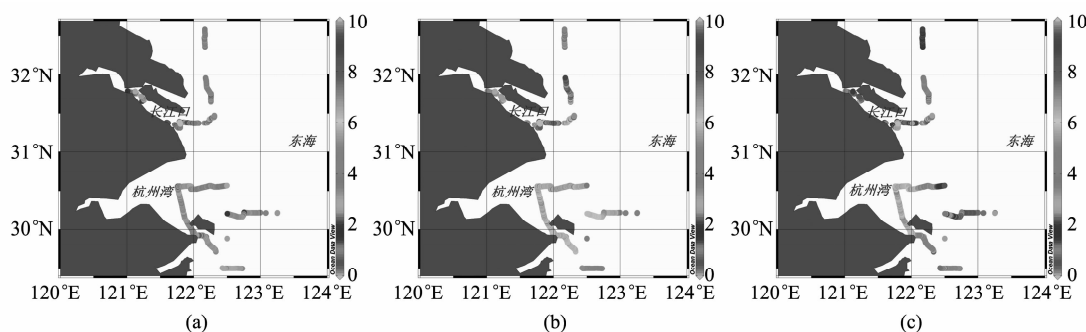


图6 SAS 走航观测获得的归一化离水辐亮度(单位: $\mu\text{w}/\text{cm}^2 \cdot \text{nm} \cdot \text{sr}$) (a) 443 nm, (b) 554 nm, (c) 749 nm
Fig.6 The underway normalized water-leaving radiance (unit: $\mu\text{w}/\text{cm}^2 \cdot \text{nm} \cdot \text{sr}$) measured by SAS. (a)443 nm, (b)554 nm, and (c)749 nm

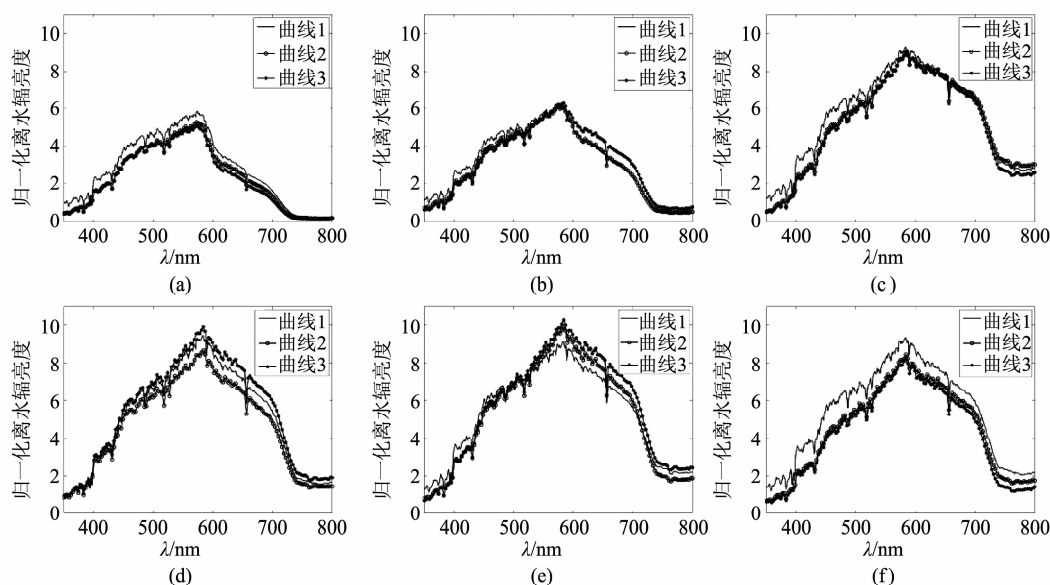


图7 典型站点 SAS 走航观测与 ASD 站点观测获得的归一化离水辐亮度(单位: $\mu\text{w}/\text{cm}^2 \cdot \text{nm} \cdot \text{sr}$) 比较. 曲线 1 为 ASD 测量结果,曲线 2 为 ASD 观测之前的 SAS 测量结果,曲线 3 为 ASD 观测之后的 SAS 测量结果. (a) 站点 A02, (b) 站点 C02, (c) 站点 D04, (d) 站点 D06, (e) 站点 D06A, (f) 站点 D12
Fig.7 The comparisons of the normalized water-leaving radiance(unit: $\mu\text{w}/\text{cm}^2 \cdot \text{nm} \cdot \text{sr}$) derived by the SAS underway measurement and the ASD station measurement at typical stations. The curve 1, 2 and 3 represent the normalized water-leaving radiance measured by ASD, SAS before and after ASD measurement, respectively. (a) station A02, (b) station C02, (c) station D04, (d) station D06, (e) station D06A, (f) station D12

这类高浑浊且水色随时空差异变化较大的水体而言,会对两种测量结果的可比性有一定影响。

从图 7 中可以看出,SAS 前后测量曲线重合度都很好,尤其是 A02、D04 站位,进一步证明该方法对 SAS 走航数据处理的正确性.对于 ASD 与 SAS 观测数值上的差别,可能是仪器定标、数据处理差异等共同影响.总体来看,ASD 与 SAS 的 L_{wn} 变化趋势是一致的,可以正确反映水体光谱特性与波段关系,量值的差异也较小.因此,本文开发的数据处理流程可以有效应用于 SAS 走航测量的数据处理。

3.2 与走航水体浊度观测数据比较

Manta 是 eureka 公司生产的多参数水质仪,可以走航测量表面温度、盐度、浊度等多种水体参数.在 2 月份的长江口-苏北浅滩航次中,利用多参数水质仪 Manta 同步进行了水体浊度的走航测量,时间为 2 月 16 到 21 日.由于 SAS 只能在白天观测,而 Manta 可全天测量,故两者同步数据只能在白天获得.另外,两者有效同步数据会因 SAS 质量控制而减少.所以,Manta 在 16、18 号测量的数据与 SAS 同

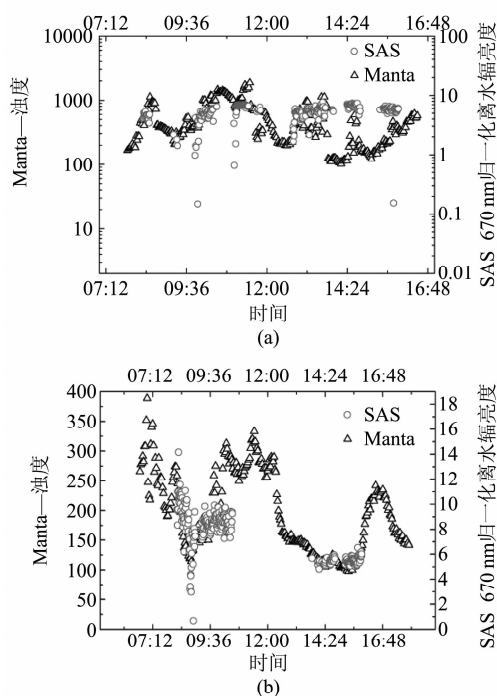


图 8 SAS 走航获得的 670 nm 归一化离水辐亮度 (单位: $\mu\text{W}/\text{cm}^2 \cdot \text{nm} \cdot \text{sr}$) 与同步走航水体浊度 (NTU) 的变化趋势比较 (a) 2012 年 2 月 17 日, (b) 2012 年 2 月 20 日

Fig. 8 Trend comparison between the underway normalized water-leaving radiance (unit: $\mu\text{W}/\text{cm}^2 \cdot \text{nm} \cdot \text{sr}$) at 670nm measured by SAS and the underway water turbidity (NTU) (a) On Feb. 17, 2012, and (b) On Feb. 20, 2012

步较少,19 号时无同步数据.因此,只能选取 17、20 号两天的 Manta 浊度数据与 SAS 归一化离水辐亮度 (670 nm) 进行对比 (如图 8 所示).可以看出,两者整体变化较为一致,进一步验证本文开发的高光谱 SAS 走航数据处理方法的有效性。

4 结论

针对目前国际上商业化的走航水体高光谱观测系统 SAS,开发了实用的数据处理方法.主要结论为太阳天顶角、观测天顶角和相对方位角的估算是 SAS 走航观测数据处理的重要环节,其影响水气界面反射系数的确定,以及后续的质量控制;水气界面反射系数的估算直接影响到离水辐亮度的计算.本文提出的基于辐射传输模型模拟的查找表方法,可较精确的估算出不同角度下水气界面反射系数.检验证明,其结果用于 SAS 走航离水辐亮度的计算是可行的,同时,更准确的估算需要考虑海面风速和气溶胶等因素的影响;实现了航向瞬时变化大、太阳耀斑、船阴影及弱光照等情况下数据的自动识别及异常数据的有效剔除;SAS 走航观测获得的归一化离水辐亮度与站点 ASD 测量结果具有很好的一致性,且与同步走航水体浊度变化趋势一致,说明了本文数据处理方法具有较好的可靠性。

致谢:感谢参加长江口-苏北浅滩和杭州湾两个航次的全体人员所提供的帮助.感谢两位审稿专家对本文提出的宝贵意见。

REFERENCES

- [1] WANG Xiao-Yong, TANG Jun-Wu, LI Tong-Ji, *et al.* Key Technologies of water spectra measurements with above-water method [J]. *Ocean Technology* (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. *海洋技术*), 2012, **31**(1): 72-76.
- [2] Mueller J L, Austin R W. Ocean optics protocols for seaWiFS validation, revision 1 [R]. NASA Tech Memo, 104566 1995.
- [3] TANG Jun-Wu, TIAN Zhou-Liang, WANG Xiao-Yong, *et al.* The methods of water spectra measurement and analysis i: above-water method [J]. *Journal of Remote Sensing* (唐军武, 田周良, 汪小勇, 等. 水体光谱测量与分析 I: 水面以上测量法. *遥感学报*), 2004, **8**(1): 38-43.
- [4] State Oceanic Administration People's Republic Of China. GB/T 12763.5-2007. Specifications for oceanographic survey—Part 5: Survey of acoustical and optical parameters in the sea [S]. Beijing: Standards Press of China (国家海洋局. GB/T 12763.5-2007. 海洋调查规范 第 5 部分: 海洋声、光要素调查. 北京: 中国标准出版社), 2008.
- [5] Fargion G S, Muller J L. Ocean optics protocols for satellite ocean color sensor validation, revision 4 [R]. NASA/TM-2003-211621, 2003.

- [6] Hooker S, Lazin G, Zibordi G, *et al.* An evaluation of above and in-water methods for determining water-leaving radiance[J]. *Journal of Atmospheric and Ocean Technology*, 2002, **19**: 486 - 515.
- [7] LI Tong-Ji, CHEN Qing-Lian. The method to measure the AOP of the seawater with SAS[J]. *Ocean Technology*(李铜基, 陈清莲. SAS 测量水体表面光学参数的方法. *海洋技术*), 2003, **22**(1): 10 - 13.
- [8] Churnside J H, Wilson J J. Ocean color inferred from radiometers on low-flying aircraft[J]. *Sensors*, 2008, **08**: 860 - 876.
- [9] Satlantic Incorporated. Operation Manual for the SAS, Revision A[Z]. SAT-DN-545, June 2009.
- [10] Neckel H, LABS D. The solar radiation between 3300 and 12500 Å[J]. *Solar Physics*. 1984, **90**: 205 - 258.
- [11] Carder K L, Steward R G. . A remote-sensing reflectance model of a red tide dinoflagellate off West Florida[J]. *Limnol. Oceanogr.* 1985, **30**: 286 - 298.
- [12] Mueller J L, Zaneveld J R V, Pegau S, *et al.* Remote sensing reflectance: preliminary comparisons between in-water and above-water measurements, and estimates modeled from measured inherent optical properties[J]. In: *Ocean Optics XIII*, S. G. Ackleson, ed. *Proc. SPIE*. 1997, **2693**: 502 - 507.
- [13] Mobley C D. Estimation of the remote sensing reflectance from above-surface measurements[J]. *Appl. Opt.* 1999, **38**: 7442 - 7455.
- [14] Fougnie B, Frouin R, Lecomte P, *et al.* Reduction of skylight reflection effects in the above-water measurement of diffuse marine reflectance[J]. *Appl. Opt.* 1999, **38**: 3844 - 3856.
- [15] ZHANG Min-Wei, TANG Jun-Wu, DING Jing. Study on the method of correction for cocean color sensor zero-voltage fluctuation[J]. *J. Infrared Millin. Waves*(张民伟, 唐军武, 丁静. 海洋水色传感器零电平漂移校正方法探讨. *红外与毫米波学报*), 2009, **28**(5): 376 - 381.
- [16] Smith R C, Baker K S. Optical properties of the clearest natural waters (200- 800nm) [J]. *Appl. Opt.* 1981, **20**(2): 177 - 184.
- [17] Ruddick K G, Cauwer V D, Park Y J. Seaborne measurements of near infrared water-leaving reflectance: The similarity spectrum for turbid waters[J]. *Limnol. Oceanogr.* 2006, **51**(2): 1167 - 1179.
- [18] Aas E. Estimates of radiance reflected towards the zenith at the surface of the sea[J]. *Ocean Sci. Discuss.* 2010, **7**: 1059 - 1102.
- [19] Jin Z, Charlock T P, Rutledge K, *et al.* Analytical solution of radiative transfer in the coupled atmosphere-ocean system with a rough surface [J]. *Appl. Opt.* 2006, **45**(28): 7443 - 7455.
- [20] Meeus J H. *Astronomical algorithms* [M], 2nd Edition; Willmann-Bell: Richmond, Virginia, 1998: 163 - 165.
- [21] Cox C, Munk W. Measurement of the roughness of the sea surface from photographs of the sun's glitter[J]. *Journal of the optical society of America*. 1954, **44**(11): 838 - 850.
- [22] Cox C, Munk W. Statistics of the sea surface derived from sun glitter[J]. *J. Mar. Res.* 1954, **33**: 198 - 227.
- [23] Cox C, Munk W. Slopes of the sea surface deduced from photographs of sun glitter[J]. *Bulletin of the Scripps Institution of Oceanography*. 1956, **6**(9): 401 - 488.
- [24] LIU Zhi-Gang, ZHOU Guan-Hua. Polarization of sun glint [J]. *J. Infrared Millin. Waves*(刘志刚, 周冠华. 太阳耀光的偏振分析. *红外与毫米波学报*), 2007, **26**(5): 362 - 365.

(上接 518 页)

- [20] ZHOU Yu, XU Nan, LUAN Zhu, *et al.* 2D imaging experiment of a 2D target in a laboratory-scale synthetic aperture imaging lidar [J]. *Acta Optica Sinica*(周煜, 许楠, 栾竹, 等. 尺度缩小合成孔径激光成像雷达的二维成像实验. *光学学报*), 2009, **29**(7): 2030 - 2032.
- [21] LIU Li-Ren, ZHOU Yu, ZHI Ya-Nan, *et al.* A large aperture synthetic aperture imaging lidar demonstrator and its verification in laboratory space [J]. *Acta Optica Sinica*(刘立人, 周煜, 职亚楠, 等. 大口径合成孔径激光成像雷达演示样机及其实验验证, *光学学报*), 2011, **31**(9): 0900112 - 1.
- [22] HONG Guang-Lie, WANG Jian-Yu, MENG Zhao-Hua, *et al.* Chirped amplitude modulation and range dimension processing of near infrared synthetic aperture lidar [J]. *J. Infrared. Millin. Waves*(洪光烈, 王建宇, 孟昭华, 等. Chirp 强度调制与近红外激光合成孔径雷达距离向处理. *红外与毫米波学报*), 2009, **28**(3): 229 - 234.
- [23] LIU Guo-Guo, WU Jin, ZHU Bing-Qi, *et al.* Nonlinear degradation and compensation on range resolution in synthetic aperture lidar experiment [J]. *Laser & Infrared*(刘国国, 吴谨, 朱炳祺, 等. 合成孔径激光雷达距离像分辨率非线性恶化与补偿, *激光与红外*), 2009, **39**(9): 934 - 938.
- [24] ZHU Bing-Qi, WU Jin, ZHAO Mei-Jing, *et al.* Influence of optical axis on range imaging in stripmap synthetic aperture lidar [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*(朱炳祺, 吴谨, 赵美静, 等. 条带式合成孔径激光雷达光轴影响距离成像研究, *激光与光电子学进展*), 2010, **47**(11): 111102 - 1.
- [25] Eichel P H, Wahl D E, Ghiglia D C, *et al.* Phase gradient autofocus-a robust tool for high resolution SAR phase correction [J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic System*, 1994, **30**(3): 827 - 835.
- [26] LIU Li-Ren. Synthetic aperture (IV): Unified operation mode and two-dimensional data collection equation [J]. *Acta Optica Sinica*(刘立人. 合成孔径激光成像雷达 (IV): 统一工作模式和二维数据收集方程. *光学学报*), 2009, **29**(1): 1 - 6.
- [27] WU Jin. Matched filter in synthetic aperture lidar imaging [J]. *Acta Optica Sinica*(吴谨. 合成孔径激光雷达成像之匹配滤波器. *光学学报*), 2010, **30**(7): 2123 - 29.
- [28] ZHAO Mei-Jing, WU Jin, ZHU Bing-Qi. Mathematical simulation on stripmap mode synthetic aperture lidar imaging with random phase errors [J]. *Infrared and Laser Engineering*(赵美静, 吴谨, 朱炳祺. 随机相位误差影响条带式合成孔径激光雷达成像的数学模拟, *红外与激光工程*), 2011, **40**(12): 2418 - 2423.