

# 基于海洋激光雷达的近海表层叶绿素 a 浓度测量初步测试

张锋<sup>1,2</sup>, 郭金家<sup>1</sup>, 李志刚<sup>3</sup>, 栾晓宁<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>中国海洋大学信息科学与工程学院, 山东 青岛 266100;

<sup>2</sup>山东省科学院海洋仪器仪表研究所, 山东 青岛 266100;

<sup>3</sup>鲁东大学物理与光电工程学院, 山东 烟台 264025

**摘要** 基于 532 nm 脉冲激光器, 搭建了船载三通道海洋激光雷达系统。利用该系统对叶绿素 a 浓度进行了测量, 将所得到的测量结果与商业化叶绿素荧光计的测量结果进行了对比, 结果显示, 二者的相关系数高达 0.84, 即表现出良好的线性相关性。为了测试和评估该系统对表层海水叶绿素 a 浓度的探测性能, 开展了初步现场走航实验, 并获取了走航路径上表层海水的叶绿素 a 浓度的分布状况。结果表明, 基于激光雷达探测数据反演的表层海水的叶绿素 a 浓度与商业化叶绿素荧光计同步探测得到的表层海水的叶绿素 a 浓度的相关系数可达 0.69。

**关键词** 测量; 海洋船载激光雷达; 叶绿素 a 浓度; 室内定标; 走航实验

中图分类号 O436.2

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.051201

## Preliminary Testing of Chlorophyll-a Concentration on Offshore Surface Based on Oceanographic Lidar

Zhang Feng<sup>1,2</sup>, Guo Jinjia<sup>1</sup>, Li Zhigang<sup>3</sup>, Luan Xiaoning<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>College of Information Science & Engineering, Ocean University of China, Qingdao,

Shandong 266100, China;

<sup>2</sup>Institute of Marine Instrumentation, Shandong Academy of Sciences, Qingdao, Shandong 266100, China;

<sup>3</sup>School of Physics and Optoelectronic Engineering, Ludong University, Yantai, Shandong 264025, China

**Abstract** A three-channel oceanographic shipborne lidar system is built based on a 532 nm pulse laser. The concentration of chlorophyll-a is measured with this system and the results are compared with that obtained by the commercial chlorophyll fluorometer. The comparison results show that, the correlation coefficient between these results as high as 0.84, which shows a good linear correlation. In order to test and assess the detection performance of this system on the chlorophyll-a concentration of the surface seawater, the preliminary field navigation testing is carried out and the distribution of the chlorophyll-a concentration of the surface seawater along the navigation path is obtained. The results show that, the correlation coefficient between the chlorophyll-a concentration of the surface seawater extracted from the lidar detecting data and the chlorophyll-a concentration of the surface seawater obtained synchronously by the commercial chlorophyll fluorometer can reach to 0.69.

**Key words** measurement; oceanographic shipborne lidar system; chlorophyll-a concentration; indoor calibration; navigation testing

**OCIS codes** 120.0280; 120.1880; 280.3640

收稿日期: 2018-06-27; 修回日期: 2018-07-08; 录用日期: 2018-09-21

基金项目: 国家自然科学基金重大科研仪器研制项目(41527901)、国家自然科学基金青年基金(41606197)

\* E-mail: luanxiaoning@ouc.edu.cn

# 1 引言

浮游植物叶绿素 a 作为海洋水色三要素之一,是影响海洋水体光学性质的重要因素<sup>[1]</sup>,在研究水生生物动植物生长<sup>[2]</sup>、估算海洋初级生产力以及全球碳循环研究领域具有重要的科研价值<sup>[3]</sup>。因此,如何在较大的时间和空间尺度上实现海洋水体叶绿素 a 浓度的监测成为海洋科研工作者亟待解决的重要问题。

针对海洋水体叶绿素 a 浓度的传统测量手段主要有海洋水色遥感<sup>[4-5]</sup>、荧光分光光度法<sup>[6]</sup>等,其中,基于水色遥感卫星数据的叶绿素 a 浓度反演方法通常分为经验法和半分析法<sup>[7]</sup>等,可以在较大空间尺度上相对准确地反演一类水体中海表叶绿素 a 浓度分布。然而,该方法在近岸水体叶绿素 a 浓度反演的过程中误差显著,有效性和适用性受到一定的限制;荧光分光光度法是一种可以准确测量海水叶绿素 a 浓度的手段,但该方法多基于专业的荧光分析仪器开展实验室测量,并不适用于现场大范围测量。

作为近些年来发展较快的一种主动光学探测手段,海洋激光雷达技术具有全天时、非接触遥感探测能力,当与飞机、船舶等多种载具结合时,可实现荧光光谱、拉曼光谱和弹性散射信号的大面积遥测<sup>[8]</sup>,基于多光谱数据分析并获取叶绿素 a、黄色物质(CDOM)以及悬浮物等海洋水色要素的浓度信息,实现对海洋水体漫衰减系数等光学参数的反演,是一种高效实用的海洋光学探测技术<sup>[9-11]</sup>。

美国国家航空航天管理局(NASA)和国家海洋和大气管理局(NOAA)于 70 年代末联合研制了机载海洋激光雷达(AOL)系列海洋激光雷达系统。该系统经过多次升级改造,诞生了性能比较成熟的 AOL-III 海洋激光雷达系统,主要用于海洋水体表层叶绿素 a 浓度和海洋生物量探测研究<sup>[12]</sup>;Bristow 等<sup>[13]</sup>研制了世界上首台机载海洋激光荧光雷达系统(LEAF)激光雷达系统,具备测量 0~3 m 深度海洋表层叶绿素 a、CDOM 以及水体拉曼散射信号的能力;Lee 等<sup>[14]</sup>于 2002 年推出了可搭载于直升机上的海洋荧光激光雷达系统,主要用于海洋表层叶绿素 a 和 CDOM 浓度的探测研究;Barbini 等<sup>[15-19]</sup>基于三倍频 Nd:YAG 脉冲激光器成功研制了一台海洋激光荧光雷达系统,在针对威尼斯泄湖叶绿素 a 和 CDOM 类型以及南极海域浮游植物分布的研究中发挥了重要作用;中国海洋大学研制成功我国首台机载海洋激光雷达系统,可以用于海洋表层叶绿

素 a 浓度的遥感测量,并以中国海监 B-3808 飞机为载具,先后在烟台、大连和青岛海域进行了大量探测实验<sup>[20-22]</sup>。由此可见,机载海洋激光荧光雷达是实现快速非接触测量海洋表层叶绿素 a 浓度分布的理想手段,但由于机载海洋激光雷达系统使用和运行成本比较高昂难以实现海表叶绿素 a 浓度的全天候长期监测。因此,针对此方面的需求,本文基于二倍频 Nd:YAG 脉冲激光器,设计并搭建了一套紧凑型三通道海洋激光荧光雷达系统,并针对叶绿素 a 浓度测量先后开展了实验室定标和外场初步实验,以期与无人船等平台相结合实现海表叶绿素 a 浓度的长期低成本灵活探测。

# 2 原理

水体中的叶绿素 a 在激光诱导下会产生叶绿素 a 荧光信号,水体在激光的激发下同时产生水体拉曼信号、米散射信号及其他荧光信号等,海水中激光诱导的叶绿素 a 荧光强度可近似认为与叶绿素 a 浓度呈线性关系,叶绿素 a 浓度和荧光强度满足激光雷达荧光方程<sup>[22]</sup>,系统接收到的叶绿素 a 荧光信号强度为

$$P_F(z) = \frac{P_L K_F \exp[-(k_L + k_F)z] n_F(z) \sigma_F}{4\pi (z + mH)^2} \Delta z, \quad (1)$$

式中: $P_L$  为激光发射功率; $k_L$  和  $k_F$  分别对应激光和荧光在海水中的衰减系数; $z$  为待测目标物距海面的深度; $n_F(z)$  为叶绿素 a 浓度; $\sigma_F$  为叶绿素 a 荧光散射截面; $\Delta z$  为探测水域的薄层厚度; $m$  为海水的折射率; $H$  为系统距海面的高度。 $K_F$  为叶绿素 a 荧光通道的系统常数,表示为

$$K_F = (1 - \rho_L)(1 - \rho_F) \cdot \exp[-(\alpha_L + \alpha_F)H] A \xi_F \frac{\delta_{\lambda D}}{\delta_{\lambda F}}, \quad (2)$$

式中: $\alpha_L$ 、 $\alpha_F$  分别对应激光和叶绿素 a 荧光在海表面的反射率; $\rho_L$ 、 $\rho_F$  分别对应激光和叶绿素 a 荧光在大气中的衰减系数; $A$  为望远镜的有效接收面积; $\xi_F$  为叶绿素 a 荧光探测通道的接收效率; $\delta_{\lambda D}$ 、 $\delta_{\lambda F}$  分别对应探测通道带通滤光片和叶绿素 a 荧光信号的带宽。

同理,根据拉曼散射信号的方程,系统接收到的拉曼信号强度为

$$P_R(z) = \frac{P_L K_R \exp[-(k_L + k_R)z] n_R(z) \sigma_R}{4\pi (z + mH)^2} \Delta z, \quad (3)$$

式中  $K_R$  为拉曼通道的系统常数,表示为

$$K_R = (1 - \rho_L)(1 - \rho_R) \cdot \exp[-(\alpha_L + \alpha_R)H] A \xi_R \frac{\delta_{\lambda D}}{\delta_{\lambda R}}, \quad (4)$$

式中:  $\rho_R$  为拉曼信号的海面反射率;  $\alpha_R$  和  $k_R$  分别对应大气和海水中拉曼信号的衰减系数;  $n_R(z)$  为拉曼相对浓度;  $\xi_R$  为激光雷达系统拉曼探测通道接收效率;  $\sigma_R$  为拉曼散射截面;  $\delta_{\lambda R}$  对应拉曼探测通道的带宽。

将(1)式和(3)式相除可得:

$$n_{chl}(z) = C_1 \times \frac{P_F(z)}{P_R(z)}, \quad (5)$$

式中  $n_{chl}(z)$  为深度  $z$  处的叶绿素 a 浓度,  $C_1$  为常量。

### 3 三通道海洋激光雷达系统

搭建的三通道海洋激光雷达系统(TOLRSS)主要由共轴式发射/接收子系统、光电转换子系统、信号采集/存储子系统、实时视频监控子系统和全球定位系统(GPS)5部分构成,系统结构示意图如图1所示。利用685 nm 叶绿素 a 荧光通道和650 nm 拉曼通道可反演叶绿素 a 浓度,利用532 nm 弹性散射通道和650 nm 拉曼通道可反演出悬浮物浓度,本文仅对叶绿素 a 浓度的获取进行了探讨。

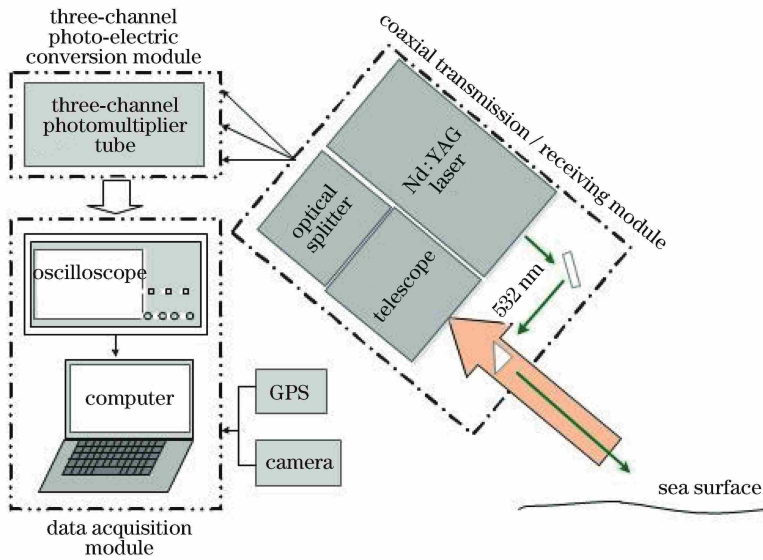


图1 TOLRSS结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of TOLRSS

发射/接收子系统中,激发光源采用 Nd:YAG 脉冲激光器(DPS-532-A型,长春新产业光电技术有限公司,长春),最大单脉冲能量约为5 mJ,脉冲宽度约为7 ns;其发出的532 nm 脉冲激光经过单波长高反镜和45°全反射棱镜两次反射,与接收望远镜系统调节呈共轴状态;在脉冲激发光激励下产生的弹性和非弹性后向散射回波被口径为100 mm、焦距为80 mm的非涅耳透镜收集,经焦点附近设置的小孔光阑滤除环境杂散光影响后,被小口径平凸透镜调节为近似准直状态,并依次通过550 nm和660 nm两片高通/低反型二向色性分光镜以实现532 nm 弹性散射、650 nm水体拉曼以及685 nm 叶绿素 a 荧光三个探测通道光谱波段的初步分光 and 选取;三个探测通道均采用光电倍增管(PMT, H10721, Hamamatsu公司,日本)作为光电转换器件,并前置中心波长分别对应532 nm、650 nm和685 nm的高截止深度窄带滤光

片,不同类型的回波信号经过PMT转换为电信号后,由高速四通道存储式示波器(HDO4000,TELEDYNE LECROY公司,美国)进行数据采集和存储。为了使激光雷达回波信号获得稳定的时序触发控制,在532 nm高反镜后方设置了高速硅光电二极管触发器(PIN,818-BB-21,Newport公司,美国),将高反镜后端透射的激光脉冲作为整个激光雷达数据采集系统的时序触发基准信号。此外,为了对探测区域海况和激光雷达工作状态进行监控,并获取探测信号的位置信息,该系统还配备了视频监控摄像机(SJ-007,广州新思奇光电科技有限公司,广州)和GPS定位装置(彩途K20H,北京华辰北斗信息技术有限公司,北京)。经过完善配套后的三通道船载激光雷达系统总质量约为50 kg,外部尺寸为600 mm×600 mm×1500 mm,功耗不超过400 W,满足在小型船只上搭载的技术需求,主要设备技术参数详见表1。

表1 TOLRSS 的技术指标  
Table 1 Technical indexes of TOLRSS

Device name	Parameter	Value
Laser (DPS-532-A Nd:YAG pulse laser)	Wavelength /nm	532
	Single pulse output energy /mJ	0-5
	Pulse width /ns	<10
	Output frequency /Hz	1-10
	Laser spot diameter /mm	3
	Beam divergence angle /mrad	<3
Detector (Hamamatsu H10721 photomultiplier)	Input voltage /V	4.5-5.5
	Radiation power sensitivity /( $A \cdot W^{-1}$ )	$2.2 \times 10^5$
Oscilloscope (TELEDYNE LECROY HDO4000)	Number of detection channels	4
	Detection bandwidth /MHz	350
	Sampling rate /GHz	2.5
	Sampling depth /bit	12
Collecting lens (Fresnel lens)	Diameter /mm	100
	Focal length /mm	80
Filter (bandpass filters)	532 nm filter: Central wavelength transmittance /%	$\geq 30$
	Full width half maximum /nm	1
	650 nm filter: Central wavelength transmittance /%	$\geq 80$
	Full width half maximum /nm	15
	685 nm filter: Central wavelength transmittance /%	$\geq 80$
	Full width half maximum /nm	15
Field of view/ mrad		6.25
Volume and power consumption	Size specification /( $cm \times cm \times cm$ )	$60 \times 60 \times 150$
	Power consumption /W	<400

#### 4 室内定标

在完成 TOLRSS 系统的搭建和初步调试后,为了评估系统的探测性能,首先在实验室内开展了系统定标实验,并人工配制了质量分数为  $1 \sim 7 \mu\text{g/L}$  的模拟叶绿素 a 水溶液样品。实验中,脉冲激光器的单脉冲输出能量为 5 mJ,脉冲输出频率固定为 1 Hz。为了降低背景随机噪声干扰对激光雷达探测数据的影响,对特定浓度样品的探测数据进行了较长时间的采样平均处理,并利用 650 nm 水体拉曼通道的探测数据对 685 nm 叶绿素 a 荧光通道的探测数据进行了强度归一化处理,以有效降低激光器能量波动、水体光学衰减系数变化等因素对叶绿素 a 荧光强度探测结果造成的影响,由此,采用了双波长峰值比值法对配制的模拟叶绿素 a 水溶液样品进行了叶绿素 a 浓度的定标。

实验中采用了浸入式叶绿素荧光计 (FLNTURT 系列, Wetlabs 公司, 美国) 来实时测量模拟配制水溶液中叶绿素 a 的实际浓度进行对比测量。该荧光计采用中心波长为 470 nm 的 LED 激发光源, 荧光探测中心波长为 695 nm, 有效质量分

数测量范围为  $0.01 \sim 50 \mu\text{g/L}$ 。将强度归一化处理后的激光雷达叶绿素 a 荧光强度数据与浸入式叶绿素 a 荧光计同步探测并平均处理后获得的叶绿素 a 实际浓度导入数据处理软件 Origin 进行线性拟合, 结果如图 2 所示。

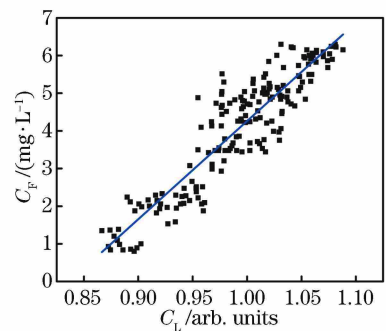


图2 激光雷达与叶绿素荧光计所探测数据的拟合结果

Fig. 2 Fitting result of detection data obtained by lidar and chlorophyll fluorometer

图2中  $C_F$  为荧光计探测结果,  $C_L$  为雷达探测结果, 由图2可知, 基于激光雷达获得的叶绿素 a 荧光强度数据与浸入式荧光计获得的叶绿素 a 实测浓度具有较高的相关性, 线性相关系数  $R^2 = 0.84$ , 印

证了基于激光雷达探测数据在较大空间尺度上获取海洋表层叶绿素 a 浓度信息的可行性。经过统计处

理后的部分典型激光雷达荧光探测数据以及浸入式叶绿素荧光计的同步探测结果见表 2。

表 2 激光雷达和叶绿素荧光计同步探测的数据

Table 2 Synchronous detection data obtained by lidar and chlorophyll fluorometer

Data series	Results of chlorophyll concentration measured by fluorometer /( $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )	Standard deviation of concentration measured by fluorometer /( $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )	Results of chlorophyll fluorescence strength measured by lidar /arb. units	Standard deviation of strength measured by lidar /arb. units
1	0.914	0.049	0.888	0.010
2	1.401	0.055	0.894	0.027
3	2.094	0.058	0.927	0.022
4	2.487	0.046	0.949	0.008
5	3.497	0.061	0.987	0.020
6	4.227	0.045	1.016	0.013
8	4.939	0.059	1.013	0.022
9	5.374	0.048	1.039	0.023
10	6.039	0.061	1.059	0.017

从表 2 中列举的部分探测数据可见,由激光雷达获取的叶绿素 a 荧光强度与叶绿素荧光计测得的叶绿素 a 浓度具有较高的相关性,通过将归一化后的激光雷达叶绿素 a 荧光数据与浸入式荧光计探测结果进行统计和对比,建立起对应 TOLRSS 系统的叶绿素 a 浓度定标公式:

$$C_{\text{F-inversion}} = 26.078C_{\text{L}} - 21.817, \quad (6)$$

式中  $C_{\text{F-inversion}}$  为叶绿素 a 浓度,  $C_{\text{L}}$  为叶绿素 a 荧光的相对强度。

测量结果显示,激光雷达测得的叶绿素 a 相对强度与叶绿素荧光计测得的叶绿素 a 浓度具有较好的线性相关度,线性相关系数达  $R^2 = 0.84$ 。根据数据推算出 TOLRSS 系统叶绿素 a 浓度为  $C_{\text{F}} = 26.078C_{\text{L}} - 21.817 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ,从而为现场反演叶绿素 a 浓度提供了可能性。

## 5 海试检验及相关结果

### 5.1 现场实验

为了实际检验 TOLRSS 激光雷达系统的探测性能,该系统搭载渔船于 2017 年 9 月中旬在山东省青岛市胶州湾水域进行了走航实验。实验当天海况风力为 2~3 级,天气晴朗,天气条件能够满足激光雷达系统的正常运转的需求。通过特制的激光雷达架将 TOLRSS 系统与渔船的船舷刚性固定,使激发光以约为  $50^\circ$  入射角倾斜照射海面,并跟随渔船进行了定点和走航测试。走航过程中船只航速控制在 5~6 节。此外,系列浸入式叶绿素荧光计 FLNTURT 也由特制夹具刚性固定在船舷上,并浸没在水面下约 50 cm 处,以 8 Hz 的采样频率通过特

制缆线将船舷附近表层水体中叶绿素 a 的实际浓度持续传送到渔船后甲板的计算机上,以便与激光雷达探测反演的叶绿素 a 浓度进行比对评估。系统在渔船上的实际搭载状态如图 3 所示。



图 3 搭载于渔船上的 TOLRSS

Fig. 3 TOLRSSboard on fishing ship

为了保证叶绿素 a 浓度反演的准确性,在海试过程中,TOLRSS 系统的各项探测参数设置与实验室内定标时保持一致,即单脉冲输出能量为 5 mJ,脉冲输出频率为 1 Hz,三个探测通道 PMT 的增益设置也与室内实验完全一致。图 4 为海试过程中示波器采集到的典型激光雷达探测原始回波波形图,返回的信号为负值,值越小强度越大。由图 4 可知,与 650 nm 水体拉曼散射通道和 685 nm 叶绿素 a 荧光通道的回波波形中仅有一个波谷不同,532 nm 弹性散射探测通道的典型回波波形由两个波谷组成,经过分析判断第一个波谷对应 532 nm 脉冲激发光在空气中传播时产生的脉冲“拖尾”信号,而第二个波谷则对应脉冲激光在海面产生的弹性回波,通过对比可以发现,从 532 nm 弹性回波通道的第二个波谷处,650 nm 水体拉曼散射通道和 685 nm 叶绿素 a 荧光通道回波信号开始逐步增强,说明海水及所含

物质开始受到了 532 nm 脉冲激光的激励,并由此导致了激光拉曼和诱导荧光等非线性散射过程。

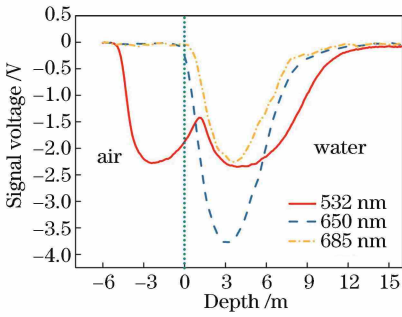


图 4 示波器采集到的 TOLRSS 的典型回波信号  
Fig. 4 Typical echo signals of TOLRSS acquired with oscilloscope

### 5.2 海试结果

对激光雷达现场探测数据进行统计和归一化处理,采用 3 m 处的 685 nm 叶绿素 a 信号与 650 nm 拉曼信号的双峰值比值法与叶绿素荧光计的同步测量数据进行拟合,结果如图 5 所示,二者的线性相关系

数  $R^2=0.69$ ,在现场测量中具有较好的线性拟合度。

结果显示,现场实验测试所得的数据相关性低于实验室内的数据测试的相关性,经计算站点 1 的叶绿素荧光计浓度测量相对标准偏差为 0.068,激光雷达叶绿素 a 荧光相对强度标准偏差(RSD)为 0.026,图 6 为站点 1 叶绿素荧光计和激光雷达稳定性对比图。

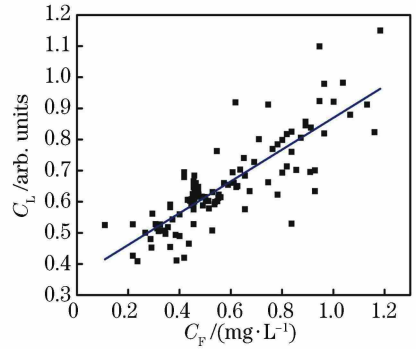


图 5 激光雷达与荧光计所测量叶绿素 a 浓度的线性拟合  
Fig. 5 Linear fitting of chlorophyll-a concentration measured by lidar and fluorometer

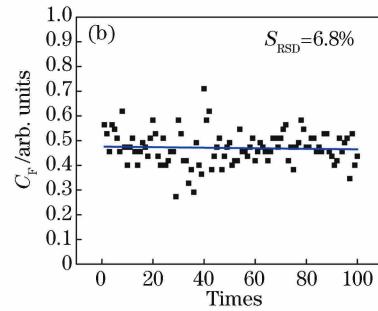
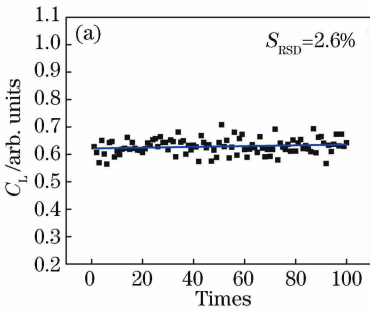


图 6 站点 1 叶绿素荧光计和 TOLRSS 测量叶绿素 a 浓度稳定性对比。(a) TOLRSS 测量;(b) 荧光计测量  
Fig. 6 Comparison of stability for measurement of chlorophyll-a concentration by fluorometer and TOLRSS in site 1.

(a) Measured by TOLRSS; (b) measured by fluorometer

结果显示,两者的现场测量数据波动性都大于室内测量结果,且叶绿素荧光计的波动性高于激光雷达,导致这一现象的可能原因有:1) 太阳背景光的影响。测试当天天气晴朗阳光强度高,太阳辐射经水面反射或散射会不可避免的进入激光雷达系统的探测视场,并显著增加雷达探测数据的随机误差。2) 海浪及洋流的影响。测试时海况复杂,TOLRSS 系统搭载的船只吨位较小,海浪起伏会造成船只及探测系统的摇摆并产生大量“海水白帽”,从而对激光雷达和叶绿素荧光计的探测数据均造成不可忽略的影响。

测有可能是因为近岸水域富营养物质浓度较高所致;而在远离岸边的海域 C 也有一片叶绿素 a 浓度明显高于周边的水域,具体原因还需要结合其他信息进行进一步分析。

此次走航实验从  $120^{\circ}18'36''E$   $36^{\circ}04'12''N$  出发到达  $120^{\circ}27'E$   $35^{\circ}55'1.92''N$ ,航程约为 30 km,图 7 为 TOLRSS 系统测得的叶绿素 a 浓度分布图,从图中可以看出,在 A、B 处的叶绿素 a 浓度较强,经推

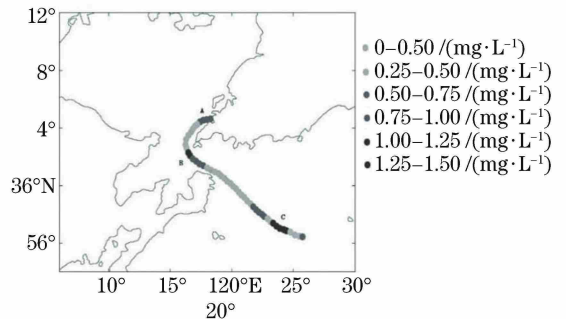


图 7 叶绿素 a 的浓度分布  
Fig. 7 Concentration distribution of chlorophyll-a

## 6 结 论

针对海表层叶绿素 a 浓度遥测需求搭建了一套三通道激光雷达系统,该系统由同轴发射与接收系统、光电转换系统、信号采集与储存系统、实时监控系统和定位系统组成。基于 TOLRSS 系统在实验室完成了叶绿素 a 浓度探测定标,该系统与叶绿素荧光计测量结果的线性相关度达 0.84,具有较好的相关性。在 2017 年 9 月, TOLRSS 系统完成了随船走航测试,成功获得了走航路径上叶绿素 a 浓度的分布情况,测试结果显示,激光雷达与叶绿素荧光计数据经处理后的线性相关度为 0.69,无论是现场测量还是室内定标, TOLRSS 系统稳定性均优于荧光计,表明激光雷达应用于现场测量具有一定的可靠性。但现场测量结果与室内相比还存在着一定的误差,而造成现场测量误差的可能原因有:白天太阳背景光的干扰会使得系统的随机噪声增多;船舶行驶过程中海浪及海水白帽使得激光雷达和叶绿素荧光计测量误差增大。接下来将根据初步走航测试暴露出的各种问题,对 TOLRSS 系统进行持续改进,进一步提升该系统针对复杂海上探测环境的适应能力,并加强其面向无人平台搭载进行水上走航测量时的自动化程度。

## 参 考 文 献

- [1] Hu Y D, Dou T Y, Yang B. A review of research on retrieving the concentration of suspended particulate matter and chlorophyll a in lake based on GOCI images[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2017, 28(2): 26-32, 39.  
胡耀躲, 窦同宇, 杨波. 基于 GOCI 影像反演湖泊悬浮物和叶绿素 a 含量的研究述评[J]. *水资源与水工程学报*, 2017, 28(2): 26-32, 39.
- [2] Wu M Q, Han S, Zhao Y Q, *et al.* Quantitative estimation of chlorophyll-a and total suspended matter concentration with landsat TM[J]. *Remote Sensing Information*, 2012, 27(4): 91-95.  
邬明权, 韩松, 赵永清, 等. 应用 Landsat TM 影像估算渤海叶绿素 a 和总悬浮物浓度[J]. *遥感信息*, 2012, 27(4): 91-95.
- [3] Kumar G S, Prakash S, Ravichandran M, *et al.* Trends and relationship between chlorophyll-a and sea surface temperature in the central equatorial Indian ocean[J]. *Remote Sensing Letters*, 2016, 7(11): 1093-1101.
- [4] Gao H, Zhao H, Shen C Y. Progress in ocean color

remote sensing of Chinese marginal seas [J].

*International Journal of Ecology*, 2017, 6(2): 82-92.

- [5] Behrenfeld M J, Westberry T K, Boss E S, *et al.* Satellite-detected fluorescence reveals global physiology of ocean phytoplankton [J]. *Biogeosciences Discussions*, 2008, 5(6): 4235-4270.
- [6] Song K S, Li L, Wang Z M, *et al.* Retrieval of total suspended matter (TSM) and chlorophyll-a (Chl-a) concentration from remote-sensing data for drinking water resources[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2012, 184(3): 1449-1470.
- [7] Qin P, Shen Y, Mu B, *et al.* Retrieval models of total suspended matter and chlorophyll a concentration in Yellow Sea based on HJ-1 CCD data and evolutionary modeling method [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2014, 36(11): 142-149.  
秦平, 沈钺, 牟冰, 等. 基于进化建模方法的 HJ-1 CCD 黄海悬浮物和叶绿素 a 浓度遥感反演模型研究[J]. *海洋学报*, 2014, 36(11): 142-149.
- [8] Li X L, Chen Y H, Yu F, *et al.* Comparison and analysis of inversion models for water optical property parameters by ocean lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(10): 35-41.  
李晓龙, 陈永华, 于非, 等. 海洋激光雷达水体光学特性参数反演模型对比及分析[J]. *光学学报*, 2017, 37(10): 35-41.
- [9] Hoge F E, Lyon P E, Swift R N, *et al.* Validation of Terra-MODIS phytoplankton chlorophyll fluorescence line height I initial airborne lidar results [J]. *Applied Optics*, 2003, 42(15): 2767-2771.
- [10] He Y, Wu D. Performance evaluation of airborne ocean lidar for measuring chlorophyll-a, suspended matter and coastal water depth in the east China Sea [J]. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 2004, 34(4): 649-654.  
贺岩, 吴东. 机载海洋激光雷达测量叶绿素 a 浓度、悬移质浓度和浅海深度的性能估计[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2004, 34(4): 649-654.
- [11] Luan X N, Li J W, Guo J J, *et al.* Ocean lidar for fishery resources survey and ecological environment monitoring[J]. *Acta Laser Biology Sinica*, 2014, 23(6): 534-541.  
栾晓宁, 李菁文, 郭金家, 等. 海洋激光雷达在渔业资源调查和生态环境监测中的应用[J]. *激光生物学报*, 2014, 23(6): 534-541.
- [12] Wright C W, Hoge F E, Swift R N, *et al.* Next-generation NASA airborne oceanographic lidar system [J]. *Applied Optics*, 2001, 40(3): 336-342.

- [13] Bristow M F P, Houston W R, Measures R M. Development of a laser fluorosensor for airborne surveying of the aquatic environment [J]. NASA Special Publication, 1975, 375-379.
- [14] Lee K J, Park Y, Bunkin A, *et al.* Helicopter-based lidar system for monitoring the upper ocean and terrain surface [J]. Applied Optics, 2002, 41(3): 401-406.
- [15] Barbini R, Colao F, Fantoni R, *et al.* Shipborne laser remote sensing of the Venice lagoon [J]. International Journal of Remote Sensing, 1999, 20(12): 2405-2421.
- [16] Barbini R, Colao F, Fantoni R, *et al.* Design and application of a lidar fluorosensor system for remote monitoring of phytoplankton [J]. Ices Journal of Marine Science, 1998, 55(4): 793-802.
- [17] Barbini R, Colao F, Fantoni R, *et al.* Differential lidar fluorosensor system used for phytoplankton bloom and seawater quality monitoring in Antarctica [J]. International Journal of Remote Sensing, 2001, 22(2/3): 369-384.
- [18] Barbini R, Colao F, Fantoni R, *et al.* Remote sensing of the Southern Ocean: techniques and results [J]. Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, 2001, 3(4): 817-830.
- [19] Fiorani L, Barbini R, Colao F, *et al.* Integration of shipborne lidar and spaceborne radiometer: application to the Antarctic coastal environment [J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5885: 58850M.
- [20] Zhang K L, He Y, Li Z G. Simulation and experiment for measuring chlorophyll-a with airborne fluorescence lidar [J]. Periodical of Ocean University of China, 2006(5): 790-794.  
张凯临, 贺岩, 李志刚. 机载海洋激光荧光雷达叶绿素 a 测量性能模拟和初步机载实验 [J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2006(5): 790-794.
- [21] Wei Z Q, Zhang K L, Wu D. Algorithmic research for measuring chlorophyll-a concentration in the Sea surface layer by using airborne ocean fluorescence lidar [J]. Periodical of Ocean University of China, 2007(1): 157-162.  
魏志强, 张凯临, 吴东. 机载海洋激光荧光雷达测量海表层叶绿素 a 浓度的算法研究 [J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2007(1): 157-162.
- [22] Liu Z S, Ma S, Wang X, *et al.* Field detection of chlorophyll-a concentration in the sea surface layer by an airborne oceanographic lidar [J]. Journal of Ocean University of China, 2008, 7(1): 108-112.