

文章编号: 0253-2239(2003)02-0245-04

海洋激光雷达测量海中悬移质*

吴 东 刘智深 张凯临 张 博 贺 岩

(青岛海洋大学海洋遥感教育部重点实验室, 青岛 266003)

摘要: 研制了一套采用倍频 YAG 激光器的小型海洋激光雷达,用于测量海中悬移质浓度。2000 年 8 月 28 日至 9 月 5 日,该系统安装于“东方红 II”号右舷下甲板,在渤海海区进行海中悬移质浓度现场测量。通过对 18 个站位的海洋激光雷达数据分析,获得的表层悬移质浓度与同步测量的海中悬移质浓度结果吻合较好。

关键词: 海洋光学; 海洋激光雷达; 海中悬移质; 米氏散射; 拉曼散射

中图分类号: TN958.98 文献标识码: A

1 引 言

海中悬移质的测量不仅对渔业有重大意义,而且对海洋科学研究、海洋环境监测、军事国防亦有重要作用。激光雷达应用于海洋探测已有 20 多年的历史了,目前已成为快速、高精度获取海洋信息的重要手段。早在 1983 年 Exton^[1] 就提出机载激光雷达测量海中悬移质的积分模型,Phillips^[2,3] 在 1984 年给出机载激光雷达测量海水浑浊度的理论和实验研究结果,Billard 和 Feigels^[4,5] 先后进行了散射层的测量研究。20 世纪 90 年代,多篇论文论述了与海水散射和海中悬移质浓度相关的激光雷达系统衰减系数的测量^[6~9]。从已经公开发表的研究工作来看,虽然许多文章涉及与海中悬移质浓度测量相关的散射层、激光衰减等探测,但是未见到激光雷达系统直接探测海中悬移质浓度的相关报道。

本文报道利用研制的小型船载海洋激光雷达系统在渤海海区进行的海中悬移质浓度现场测量,期望能够提供一种适合国情的快速、高精度测量海中悬移质浓度的新手段。

2 原理和方法

在海洋应用中,由于海水的透光窗口为蓝绿光,因此选用输出波长为 532 nm 的倍频 Nd:YAG 激光器。将波长为 532 nm 的激光脉冲入射到海水中,

返回光除粒子米氏散射信号(532 nm)外,还有激光激发的水分子拉曼散射信号(645 nm)和叶绿素分子荧光信号(685 nm),中间还有其它藻类或可溶有机物激发的荧光信号。由于米氏散射主要是海中悬移质所引起的散射,原理上只要测出米氏散射信号即可得到海中悬移质浓度。

船载的海洋激光雷达系统接收到水下 z 处的米氏散射和拉曼散射信号可分别写为^[6]

$$P_M(z) = K_1 \frac{n_M(z)\sigma_M}{(z+nH)^2} \exp\left[-2\int_0^z k_L(r)dr\right], \quad (1)$$

和

$$P_R(z) = K_2 \frac{n_R(z)\sigma_R}{(z+nH)^2} \times \exp\left[-\int_0^z [k_L(r) + k_R(r)]dr\right], \quad (2)$$

其中 K_1 与 K_2 为系统常量,与激光发射功率、接收望远镜的有效面积、系统接收效率,激光海表反射率,接收带宽等参量有关。 n_M, σ_M 是海中悬移质的数密度和截面因子; n_R, σ_R 是水分子的数密度和截面因子; k_R 为拉曼散射波长的海水漫衰减系数。 k_L 为激光波长的海水漫衰减系数, n 为海水的折射率。

拉曼散射是水的固有特性,其信号强弱主要决定于激光和拉曼波长的海水漫衰减系数。激光激发的海水拉曼散射信号归一化技术可消除系统常数和海水漫衰减系数的不确定性对测量的影响^[1,10,11]。

(1) 式和(2) 式之比可得

$$\frac{P_M(z)}{P_R(z)} = \frac{K_1}{K_2} \frac{n_M(z)\sigma_M}{n_R\sigma_R} \times \exp\left[-\int_0^z [k_L(r) + k_R(r)]dr\right], \quad (3)$$

* 国家自然科学基金(49886001)、国家“九五”科技攻关项目资助课题。

E-mail: dongwu@orsi.ouqd.edu.cn

收稿日期: 2002-02-15; 收到修改稿日期: 2002-04-08

由于 $k_L(z)$ 和 $k_R(z)$ 相差很小,

$$\int_0^z [k_L(r) - k_R(r)] dr \approx 0,$$

于是有

$$n_M(z) \approx C' \frac{P_M(z)}{P_R(z)}. \quad (4)$$

(1) 式、(2) 式之比消除了激光能量起伏、系统电子学和光学效率的不确定以及海水的漫衰减系数对米氏散射和拉曼接收功率的影响。这样可以认为悬移质浓度正比于米氏散射和拉曼散射功率比。通过实验校正参量 C' , 最后由校正参量得到悬移质浓度。

3 激光雷达系统

激光雷达系统主要由激光发射系统、接收系统和信号采集处理及控制系统三大部分组成, 原理框图如图 1 所示。

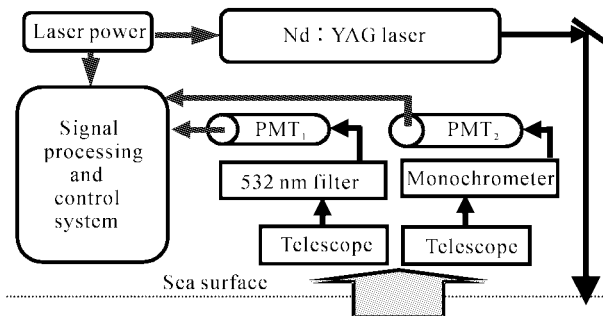


Fig. 1 Schematic diagram of ocean suspended matter Lidar system

激光发射系统由激光光源、扩束准直系统和反射镜组成。我们选用倍频 Nd:YAG 脉冲激光器作为发射光源, 输出波长为 532 nm、脉冲能量 100 mJ、脉冲宽度 8~10 ns、重复频率 1~40 Hz 的激光脉冲。激光脉冲经扩束准直后, 由反射镜射入海水中。海中的回波脉冲信号由接收系统接收。

接收系统分为光学接收和光电转换两部分。其中光学接收系统主要由反射镜、望远接收系统、输出光准直系统、光纤系统、滤波和分光系统组成。接收反射镜与发射反射镜采用同一反射镜, 可保证发射和接收光路同轴。望远接收系统采用两个口径 120 mm、焦距 668 mm 的卡塞格伦(Cassegrain)望远镜, 双光路同时接收米氏散射信号和拉曼散射信号, 既保证了两信号接收的同时性又充分利用了海中回波信号能量。一路回波信号经准直系统导入光纤系统, 再经中心波长为 532 nm、带宽 2.5 nm 的窄带干涉滤光片滤波后, 由光电倍增管(PMT₁)转换

为米氏散射电信号。另一路回波信号用 101 W 型野外光谱辐射计分光后, 由光电倍增管(PMT₂)收集转换获得拉曼散射信号。

输出的两路电信号由信号采集处理及控制系统接收, 进行实时处理和显示。信号采集处理及控制系统由瞬态波形记录仪(JV52014 双通道 12 bit 并行数据采集卡, 最大采样频率 40 MHz)和计算机组成。

4 海上现场实验及结果

2000 年 8 月 28 日至 9 月 5 日, 小型海中悬移质激光雷达系统安装于青岛海洋大学“东方红 II”号右舷下甲板, 在渤海海区进行海中悬移质浓度现场测量, 出海照片如图 2 所示。现场同步获取了浊度数据、悬移质浓度数据、白天透明度盘(SDD)数据。

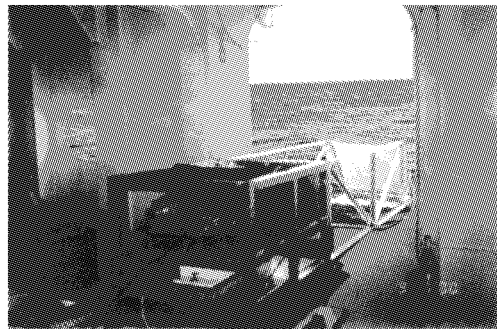


Fig. 2 The photograph of in situ experiment of ocean suspended matter Lidar system

海中悬移质激光雷达采用定点测量, 测量船在每一个站位抛锚后, 激光雷达开始工作, 激光重复频率为 10 Hz, 同步测量激光波长 532 nm 的回波, 它代表海中悬移质的散射信号, 及波长 645 nm 的海水拉曼散射回波, 作为激光雷达系统的校正信号。每个站位 532 nm 回波信号 P_{532} 和同步的 645 nm 回波信号 P_{645} 各取 200 次采样平均, 然后以两者之比得出激光雷达测量悬移质含量的相对值。同时, 进行透明度盘测量(白天)、浊度测量和悬移质浓度现场采样测量。浊度计的型号为 PN24179 Seapoint Turbidity Meter。

本文分析处理了 18 个站位的数据, 站位图如图 3 所示, 相应的激光雷达表层测量结果和现场同步测量数据如表 1 所示。

由图 4 可知激光雷达测量结果与现场浊度数据和悬移质浓度数据符合得较好。采用现场同步悬移质浓度数据比对(见图 5), 经过拟合得出 C' 值为 0.76 mg/L, 相关系数为 0.93, 均方根误差为

0.07 mg/L。

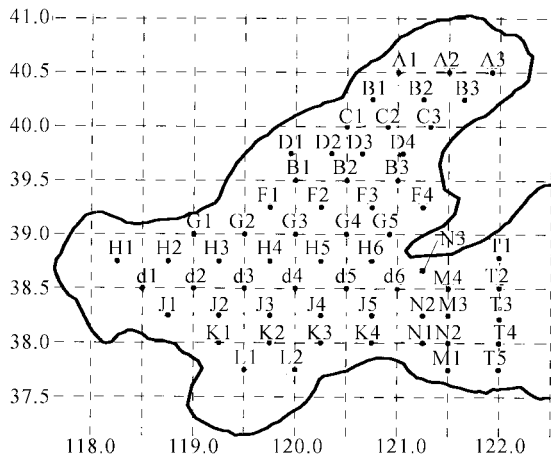


Fig. 3 The location of stations of Lidar experiment

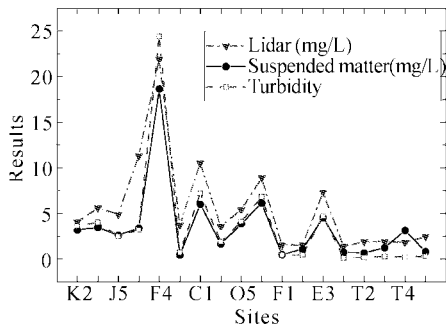


Fig. 4 The comparison of the results of Lidar and in situ simultaneous sampling

Table 1. The results of Lidar measurements and in situ simultaneous sampling

| Sites | Lidar | SDD /m | Suspended matter/(mg/L) | Turbidity |
|-------|-------|--------|-------------------------|-----------|
| K2 | 4.08 | | 3.17 | 3.6 |
| K3 | 5.58 | | 3.45 | 4.0 |
| J5 | 4.86 | | 2.61 | 2.5 |
| G4 | 11.3 | | 3.38 | 3.2 |
| F4 | 21.9 | | 18.64 | 24.4 |
| D1 | 3.72 | | 0.43 | 0.73 |
| C1 | 10.5 | | 5.98 | 7.2 |
| O2 | 3.57 | 4 | 1.64 | 1.9 |
| O5 | 5.42 | 2.6 | 3.86 | 4.1 |
| H5 | 8.88 | 1.4 | 6.13 | 6.8 |
| F1 | 1.52 | | 0.47 | 0.42 |
| E1 | 1.52 | 8 | 1.08 | 0.45 |
| E3 | 7.29 | 3 | 4.53 | 4.7 |
| T1 | 1.39 | 16 | 0.75 | 0.12 |
| T2 | 1.87 | 15 | 0.65 | 0.15 |
| T3 | 1.90 | 13 | 1.24 | 0.27 |
| T4 | 1.81 | 12.7 | 3.12 | 0.21 |
| T5 | 2.43 | 9.4 | 0.81 | 0.3 |

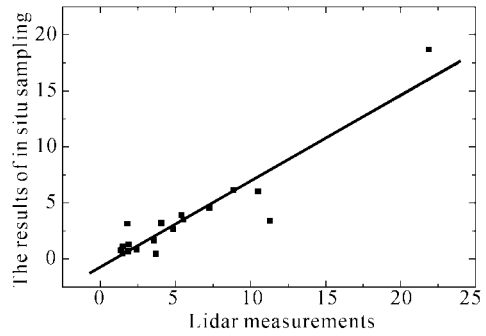


Fig. 5 The results of Lidar and in situ suspended matter sampling and their fitted curve

部分站位随深度变化的海洋激光雷达测量相对值与浊度数据的对比如图 6 所示。

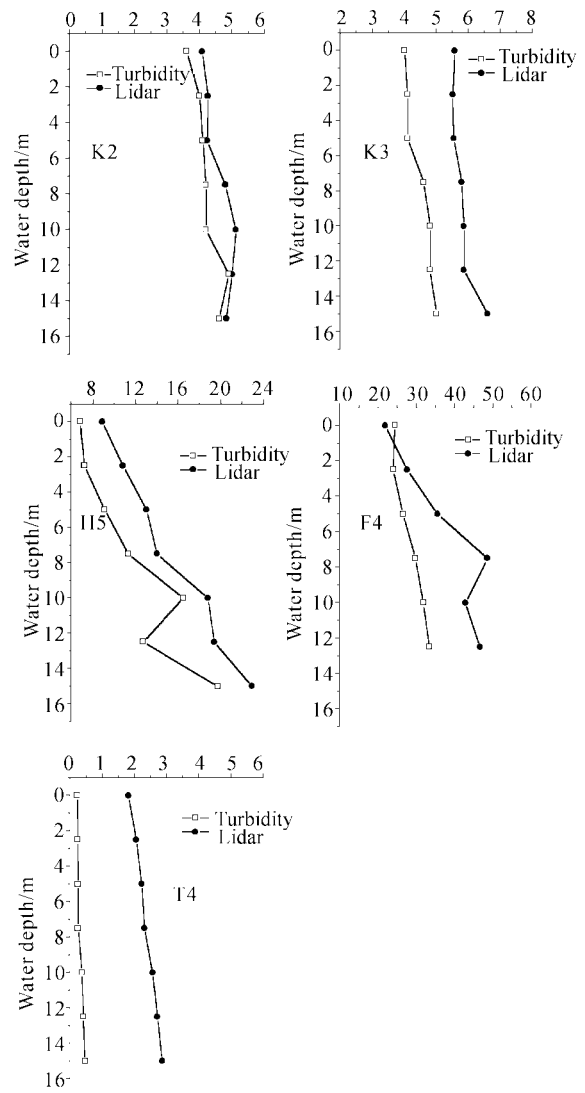


Fig. 6 The depth profiles of Lidar results and in situ turbidity measurements on part of the experiment stations

感谢青岛海洋大学海洋环境学院大洋环流实验室提供的浊度及悬移质浓度现场采样数据。

参 考 文 献

- 1 Exton R J, Houghton W M, Esaias W *et al.*. Laboratory analysis of techniques for remote sensing of estuarine parameters using laser excitation. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(1):54~64
- 2 Phillips D M, Koerber B W. A theoretical study of an airborne laser technique for determining sea water turbidity. *Aust. J. Phys.*, 1984, **37**(1):75~90
- 3 Phillips D M, Abbott R H, Penny M F. Remote sensing of sea water turbidity with a airborne laser system. *J. Phys. (D)*, 1984, **17**(8):1749~1758
- 4 Billard B, Abbott R H, Penny M F. Airborne estimation of sea turbidity parameters from the WRELADS laser airborne depth sounder. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(13):2080~2088
- 5 Feigels V I, Kopilevich Y I. Remote sensing of subsurface layers of turbid sea water with the help of optical lidar system. *Proc. SPIE*, 1993, **2048**:34~42
- 6 Lutomirski R F. Lidar remote sensing of ocean waters. *Proc. SPIE*, 1994, **2222**:12~19
- 7 Smart J H, Kwon K H. Comparisons between in situ and remote sensing estimates of diffuse attenuation profiles. *Proc. SPIE*, 1996, **2964**:100~109
- 8 Chumside J H, Tatarskii V V, Wilson J J. Oceanographic lidar attenuation coefficients and signal fluctuations measurement from a ship in the Southern California Bight. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(15):3105~3112
- 9 Allocca D, Contarino V M, Curran T. Ocean water clarity measurement using shipboard lidar systems. *Proc. SPIE*, 2002, **4488**:106~114
- 10 Chen W B, Wu D, Zhang T L *et al.*. Method and experiment for measuring sea surface chlorophyll concentration using lidar. *Oceanologia Et Limnologia Sinica*, 1998, **29**(3):255~260
- 11 Wu D, Wang R L, Chen W B *et al.*. Ocean lidar (BLOL) for measuring chlorophyll-a concentration, diffuse attenuation coefficient and water-leaving radiance. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1998, **18**(12):1690~1696 (in English)

Lidar Measurement of Ocean Suspended Matter

Wu Dong Liu Zhishen Zhang Kailin Zhang Bo He Yan
 (Ocean Remote Sensing Laboratory of Ministry of Education of China
 Ocean University of Qingdao, Qingdao 266003)
 (Received 15 February 2002; revised 8 April 2002)

Abstract: A shipboard ocean lidar system, whose wavelength is 532 nm produced by a frequency doubled Nd:YAG laser, was developed for measuring the concentration of ocean suspended matter. The Lidar system was installed on research vessel Dongfanghong II, and the Lidar measurements of ocean suspended matter were conducted in Bohai Bay from August 28 to September 5, 2000. The concentrations of suspended matter were obtained at 18 sites by the Lidar. The results of Lidar measurements are in agreement with the that from in situ simultaneous sampling.

Key words: ocean optics; ocean Lidar; ocean suspended matter; Mie scattering; Raman scattering