

机载双频激光雷达系统设计和研制

胡善江^{1,2,3}, 贺岩^{1,3,9}, 陈卫标^{1,3}, 朱小磊^{1,3}, 臧华国^{1,3}, 吕德亮⁴, 田茂义⁵,
俞家勇⁵, 陶邦一⁶, 黄田程⁶, 王成⁷, 习晓环⁷, 张晓丽⁸, 瞿帅⁸

- (1. 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 中国科学院空间激光信息传输与探测技术实验室, 上海 201800;
4. 杭州中科天维科技有限公司, 上海 201800; 5. 山东科技大学, 山东 青岛 266590;
6. 国家海洋局第二海洋研究所, 浙江 杭州 310012; 7. 中国科学院遥感与数字地球研究所,
北京 100094; 8. 北京林业大学, 北京 100083; 9. 上海大恒光学精密机械有限公司, 上海 201800)

摘要: 针对林业、建筑、近海、岛礁和滩涂的测绘要求, 中国科学院上海光学精密机械研究所开发了具有自主知识产权的机载双频激光雷达产品样机, 可以同时完成对陆地地形和海底地形进行测绘。该样机在三亚蜈支洲岛进行了飞行试验, 最大探测深度达到 30 m, 等效一类水质条件下可达 50 m, 最小探测深度达到 0.22 m, 测深数据和单波束声呐数据对比中误差为 0.108 m, 实地测量数据和陆地点云量测数据对比中误差为 0.18 m, 试验结果基本符合设计预期, 为进一步产品定型打下了良好的基础。

关键词: 双频激光雷达; 海洋测绘; 海底地形

中图分类号: TN958.98 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201847.0930001

Design of airborne dual-frequency laser radar system

Hu Shanjiang^{1,2,3}, He Yan^{1,3,9}, Chen Weibiao^{1,3}, Zhu Xiaolei^{1,3}, Zang Huaguo^{1,3},
Lv Deliang⁴, Tian Maoyi⁵, Yu Jiayong⁵, Tao Bangyi⁶, Huang Tiancheng⁶,
Wang Cheng⁷, Xi Xiaohuan⁷, Zhang Xiaoli⁸, Qu Shuai⁸

- (1. Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Laboratory of Space Laser Information Transmission and
Detection Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China; 4. Hangzhou Tianwei Technology Co., Ltd,
Shanghai 201800, China; 5. Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 6. Second Institute of
Oceanography, SOA, Hangzhou 310012, China; 7. Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences,
Beijing 100094, China; 8. Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
9. Shanghai Daheng Optics and Fine Mechanics Co., Ltd., Shanghai 201800, China)

Abstract: Aiming at the mapping requirements of forestry, architecture, offshore, island reef and beach, the Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, has developed a prototype of airborne dual-frequency laser radar. It can simultaneously carry out mapping of terrain and

收稿日期: 2018-04-07; 修订日期: 2018-05-12

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项任务(2013YQ120343)

作者简介: 胡善江(1981-), 男, 高级工程师, 博士生, 主要从事激光遥感和仪器开发设计等方面的研究。Email: sjhu@siom.ac.cn

导师简介: 陈卫标(1969-), 男, 研究员, 博士, 主要从事激光遥感和空间全固态激光器技术研究, 重点开展激光遥感、遥测技术在航天、大气和海洋中的应用基础方面的研究。Email: wbchen@mail.shnc.ac.cn

submarine terrain. The prototype has been tested in Wuzizhou Island of Sanya with a maximum detection depth of 30 m, equivalent to 50 m under class A water quality conditions, the minimum detection depth of 0.22 m. Depth data and single-beam sonar data comparison error is 0.108 m, ranging data and field-measured data comparison error is 0.18 m. The results are in accordance with the design expectations.

Key words: dual-frequency lidar; ocean mapping; seabed topography

0 引言

机载双频激光雷达,集激光测距技术、GPS 定位技术、飞机姿态测量技术、高速数字信号处理技术等多种高新技术于一体的新型主动机载激光测绘、侦查系统,其主要应用于林业、建筑物、航道、海滩和海岸线、浅海编图、暗礁深度、海岛、岛礁、水下障碍物的快速调查,可以直接测绘出地形、地貌的三维数据,这些数据经简单处理即可生成高精度的地形图,数字地面模型(DTM)和数字高程模型(DEM)。激光雷达数据可以直接与其它要素或影像数据合成,生成内容更为丰富的各类专题地图,有广阔的应用领域和巨大实用价值^[1-3]。

1 简介

机载双频激光雷达同时采用 1 550 nm 激光对陆地地形进行测量,532 nm 激光对海底地形进行测量(1 064 nm 激光测海表),具有非接触测量、高灵活性和机动性、可全天时作业、数据分辨率与精度高等

特点,目前国外类似的多源融合的系统有加拿大 Optech 公司 CZMIL 系统、瑞士 Leica 公司 Hawkeye III 系统和荷兰 Fugro 公司 LADS MK III 系统。

中国科学院上海光学精密机械研究所在之前的机载测深激光雷达系统开发工作基础上^[4-5],通过承担科技部重大科学仪器设备开发项目的支持,开发出了具有自主知识产权的机载双频激光雷达产品样机。该样机的探测距离、测量精度、定位精度等主要指标初步达到或接近国外同类产品水平,后续将进行定型生产,为测绘用户提供国产化仪器的强有力的新选择。

2 系统设计

2.1 系统设计指标

该产品初期瞄准三个相关应用:

- (1) 海岛、岛礁与滩涂三维重建;
- (2) 林业资源调查;
- (3) 地理信息应用。

根据这三个领域的应用要求和相关技术规范,对系统性能进行了仿真^[6],设计系统性能指标如表 1 所示。

表 1 机载双频激光雷达性能指标表
Tab.1 Parameters of airborne dual-frequency lidar

| | Land mode | Ocean mode |
|--|----------------------------|-------------|
| Aircraft | Harbin Y-12 or Changhe Z-8 | |
| Aircraft speed/km·h ⁻¹ | 150-220 | |
| Aircraft altitude/m | 300-1 600 | 300-1 100 |
| Scan angle/(°) | ±30 | ±15 |
| Laser wavelength/nm | 1 550 | 532 & 1 064 |
| Scan mode | Linear | Oval |
| Survey points grid/pts·m ⁻² | 0.6-20 | 0.03-0.48 |
| Horizontal accuracy/m | 0.091-0.446 | 0.105-3.129 |
| Depth accuracy/m | 0.089-0.437 | 0.049-5.684 |

续表 1

Continued Tab.1

| United mode of Land and Ocean | |
|--|--|
| Aircraft speed/km·h ⁻¹ | 150 |
| Aircraft altitude/m | 550 |
| Scan angle/(°) | ±15 |
| Laser PRF | 1 kHz@532 nm&1 064 nm 300 kHz@1 550 nm |
| Laser wavelength/nm | 532 & 1 064 & 1 550 |
| Survey points grid/pts·m ⁻² | Land 8 Ocean 0.1 |
| Land accuracy | Horizontal:0.164 m Height: 0.161 m |
| Seabed accuracy | Horizontal:0.193 Depth:0.091(@Water depth of 20 m) |

2.2 总体设计

陆地和海洋测绘的分辨率要求不同,考虑将来工作的灵活性,将机载双频激光雷达激光探测组件从功能上分为陆地测绘激光雷达和海洋测绘激光雷达,两者功能和结构上独立,既能够独立工作,也可以联合工作,工作模式分为以下三种:

(1) 陆地测绘激光雷达单独使用,采用人眼安全的 1 550 nm 波长激光,一字型扫描,覆盖角度±30°,最大航高 1 600 m,配备 GPS 和 IMU 的机械和电子接口,能够获取完整的陆地测绘数据。

(2) 海洋测绘激光雷达单独使用,采用位于海水透过窗口的 532 nm 波长激光,卵形扫描,覆盖角度±15°,最大测量水深 50m,配备 GPS 和 IMU 的机械和电子接口,能够获取完整的海洋测绘数据。

(3) 陆地和海洋同步使用,由海洋测绘激光雷达装配并采集 GPS 和 IMU 的数据,两套系统共用 GPS 和 IMU 数据,形成完整的海陆测绘数据。陆地和海洋测绘模块在地面扫描图案如图 1 所示。

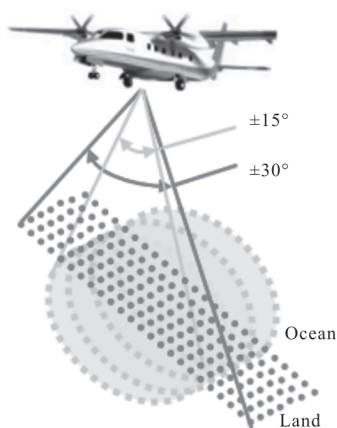


图 1 激光测点扫描图案示意图

Fig.1 Schematic diagram of laser spot scanning pattern

(4) 按照系统联合工作模式,将系统分为 6 个功能子系统:陆地测绘激光雷达系统、海洋测绘激光雷达系统、位置和姿态获取系统、飞行管理系统、航空摄影系统和数据后处理系统。

2.3 测量原理

系统同时测量陆地、海面 and 海底的回波信号,测量原理如图 2 所示。采用脉冲整形和 TDC(时间数字转换)技术测量激光主波脉冲到陆地或海面回波信号的时间延迟,用于测量陆地和瞬时海面的斜程。采用高速 AD 采样激光海面反射、穿透海水的后向散射和海底回波信号的完整波形,通过算法将海表和海底的回波波形与水体散射波形进行分离^[7],计算海表和海底的回波时间延迟来获得海底的斜程。

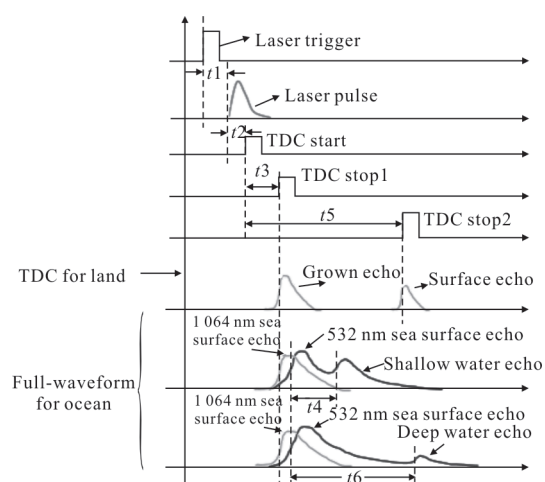


图 2 系统测量原理图

Fig.2 Schematic diagram of the system measurement

2.4 关键技术

双频激光雷达系统产品开发过程中采用了多项

关键技术,一方面解决双频激光雷达探测存在的技术难题,一方面提升双频激光雷达的探测性能,具体关键技术如下:

(1) 探测动态范围扩展技术

系统中的海洋测绘激光雷达测量激光海表和海底回波的时间差来获取海底深度,由于海水对激光的衰减,随着海底深度从 0~50 m 的变化,激光回波的信号幅度变化超过 30 dB,该范围超过探测器和高速数据采集模块的动态范围^[8-9]。为了能够将不同深度的回波波形进行采集,采用分视场探测技术,该技术根据激光束随海水深度而逐渐展宽的效应(海水中传输的光束截面接近水深的一半),将接收视场分成中心小视场和边缘大视场,采用中心小视场能够完全接收展宽较小的浅水海底回波,采用边缘大视场能够接收绝大部分展宽较大的深水海底回波,在不损失回波信号的同时避开海表和浅水的强散射信号。该技术通过分视场接收实现了回波信号的动态范围压缩,有效扩展了探测动态范围,满足深度变化的海底回波探测。分视场探测如下图 3 所示,该技术能够有效匹配激光在海水中的传输特性,在扩展探测动态范围的同时,提高探测的信噪比。

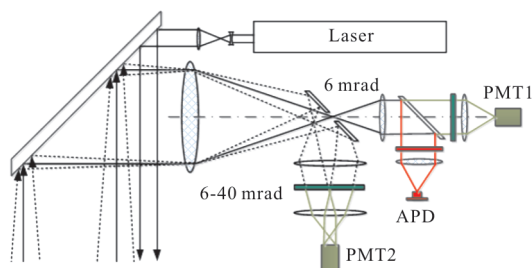


图 3 分视场探测技术示意图

Fig.3 Schematic diagram of the separated FOV

(2) 探测器灵敏度温漂的高压补偿技术

系统中的 APD 探测器的灵敏度会随温度变化,导致探测器灵敏度的温度漂移,影响对激光回波信号幅度的准确测量。为了能够在环境温度变化的情况下稳定探测器灵敏度,采用高压补偿技术,该技术根据探测器在不同温度下灵敏度随探测器高压的变化曲线(图 4),拟合出在固定灵敏度下探测器高压随温度的变化曲线(图 5),采用 AD 实时采集探测器的温度,经过计算后再通过 DA 调节探测器的高压,将探测器灵敏度温漂通过探测器的高压来实现补偿,

稳定了探测器灵敏度,确保激光回波信号幅度测量的一致性。

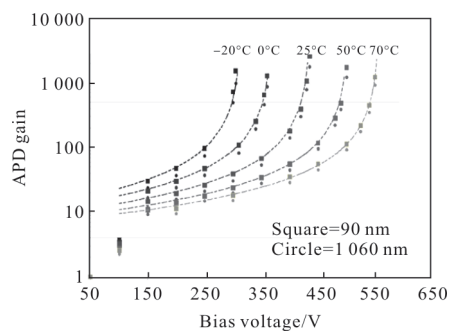


图 4 不同温度下探测器高压和增益关系曲线

Fig.4 Detector bias voltage versus detector gain curves at different temperatures

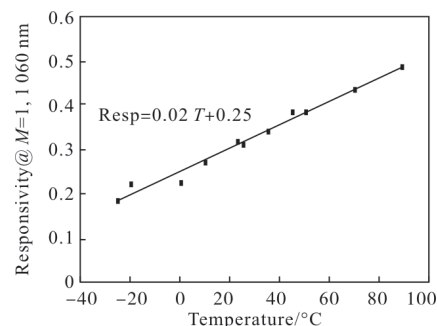


图 5 探测器灵敏度随温度变化曲线

Fig.5 Detector sensitivity versus temperature curve

(3) 窄脉宽高功率激光器技术

激光器系统采用主振荡-功率放大(Master Oscillator Power Amplification, MOPA)结构放大,由主振荡激光器和两级放大器组成,结构如图 6 所示。最终输出 532 nm 激光脉冲能量达到 1.5 mJ。

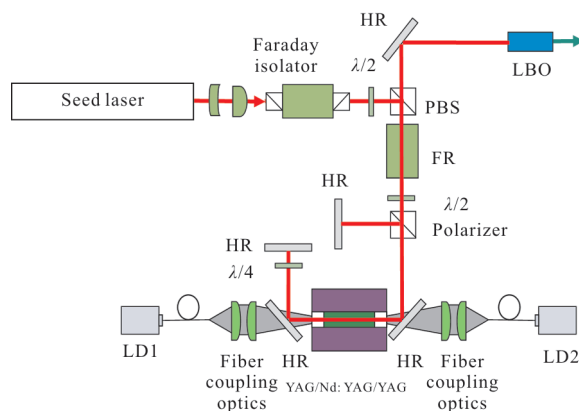


图 6 激光器放大级方案

Fig.6 Schematic diagram of laser amplification

3 试验验证

3.1 试验概况

产品样机于 2015 年 12 月 15 日和 2016 年 1 月 29 日在海南三亚蜈支洲岛海域进行了飞行试验,系统搭载在直八飞机上,飞行航高 550 m,航速 135 km/h,共飞行了 3 个架次,总时长 7 h,获取了 45 个条带的的数据。

3.2 试验三维地形图效果

经过预处理、海陆波形分类^[10],波形提取和校正后,获取了测区的三维点云图。图 7 为蜈支洲岛卫星图片和双频激光雷达三维点云图的效果对比。



图 7 蜈支洲岛卫星图片和双频激光雷达三维点云图对比
Fig.7 Satellite image of Wuzhizhou Island versus point cloud image of Wuzhizhou Island produced by dual-frequency lidar

3.3 动态范围分析

图 8 为深水浅水通道重叠深度区原始波形。从

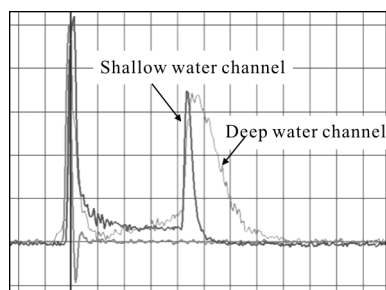


图 8 深水浅水通道重叠深度区原始波形
Fig.8 Waveform of deep water channel and shallow water channel at overlapping depth zone

图中可以看出,深水通道由于视场大,可以接收到经过水体展宽后的信号,而浅水通道视场小,信号明显窄;深水通道的探测灵敏度是浅水通道的 100 倍,但是从图上可以清楚的看出,采用分视场接收技术后,有效抑制了深水通道在浅水区(深浅重叠区)的响应度,避免深水通道信号的饱和。

3.4 测深能力

从图 9 可以看出,浅水通道可以分辨出 0.22 m 的深度,深水通道可以分辨出最深 30 m 的深度。

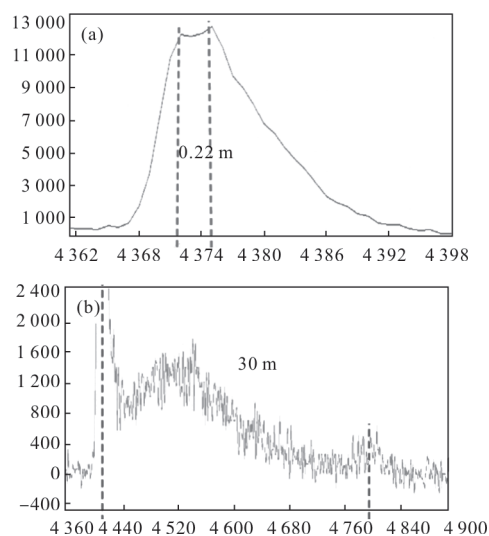


图 9 浅水通道最浅处和深水通道最深处原始波形
Fig.9 The shallowest and the deepest water waveform

激光雷达系统在测量水下目标回波信号时的指数项衰减系数 K 和水体衰减系数 C 有如下关系^[11]:

$$K=0.2C+0.04 \quad (0.11 \leq C \leq 1.6)$$

试验时试验海域实地测量的水体衰减系数 $C=0.49$,对应 $K=0.138$;在一类水质 $C=0.15$ 时,对应 $K=0.07$,可以采用衰减系数等效推算的方法对系统最大探测能力进行推算^[12],最大探测深度可以达到:

$$29.59 \times 0.138 / 0.07 = 58.3 \text{ m}$$

故笔者认为,在一类水质的情况下,现有系统最大探测深度可以达到 50 m,达到了设计要求。

3.5 测深数据比对

双频激光雷达的测深数据和同试验海域的单波束声呐数据进行了比对,选取了 10 组数据进行了对比,中误差为 0.108 m。

3.6 测距数据比对

选取了 20 组岛上的建筑物实地人工测量的数据和陆地雷达点云数据进行了比对,中误差为 0.18 m。

3.7 试验小结

测深能力、测深数据精度和测距数据精度的设计和实测指标对比如表 2 所示。

表 2 设计和实测指标对比

Tab.2 Comparison of design and measured performance

| Design | Measured |
|--|---|
| Horizontal accuracy: 0.164 m | Medium error: 0.18 m (Building length statistics) |
| Depth accuracy: 0.091 m (@depth of 20 m) | Medium error: 0.108 (Water depth point statistics @depth of 20 m) |
| Deepest depth: 50 m | Estimated result (@Grade I water): 53.3 m |

4 结论

经过飞行试验, 机载双频激光雷达产品样机的测深能力、测深精度和测距精度基本达到了设计要求, 在测绘能力上可以满足目标测绘场景(海岛、岛礁与滩涂三维重建, 林业资源调查, 地理信息应用)的使用要求, 为产品定型打下了良好的基础。

参考文献:

[1] Zhai Guojun, Wu Taiqi, Ouyang Yongzhong, et al. The development of airborne laser bathymetry [J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2012, 32 (2): 67-71. (in Chinese)
翟国君, 吴太旗, 欧阳永忠, 等. 机载激光测深技术研究进展[J]. 海洋测绘, 2012, 32(2): 67-71.

[2] Zhai Guojun, Wang Keping, Liu Yuhong, et al. Technology of airborne laser bathymetry [J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2014, 34(2): 72-75. (in Chinese)
翟国君, 王克平, 刘玉红, 等. 机载激光测深技术[J]. 海洋测绘, 2014, 34(2): 72-75.

[3] Ma Lan, Zhen Hongpai, Song Haiying, et al. Development and application of airborne LiDAR SHOALS [C]//Comprehensive Symposium on Ocean Surveying and Mapping, 2007: 104-107. (in Chinese)
马兰, 甄洪排, 宋海英, 等. 机载激光测深仪 SHOALS 的发展与应用[C]//海洋测绘综合性学术研讨会, 2007: 104-107.

[4] Wang Quandong, Chen Weibiao, Lu Yutian, et al. Analysis of relationship between parameter choice of airborne Laser bathymetry and maximum penetrability [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23 (10): 1255-1260. (in Chinese)

汪权东, 陈卫标, 陆雨田, 等. 机载海洋激光测深系统参量设计与最大探测深度能力分析 [J]. 光学学报, 2003, 23 (10): 1255-1260.

[5] Yao Chunhua, Chen Weibiao, Zang Huaguo, et al. Study of the capability of minimum depth using an airborne laser bathymetry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(10): 1406-1410. (in Chinese)
姚春华, 陈卫标, 臧华国, 等. 机载激光测深系统的最小可探测深度研究[J]. 光学学报, 2004, 24(10): 1406-1410.

[6] He Yan, Tian Maoyi, Lv Deliang, et al. Airborne dual band laser radar system parameters design and performance analysis [C]//Infrared, Sensing Technology and Application Symposium and Interdisciplinary Forum, 2015. (in Chinese)
贺岩, 田茂义, 吕德亮, 等. 机载双频激光雷达系统参数设计和性能分析[C]//红外、遥感技术与应用研讨会暨交叉学科论坛, 2015.

[7] Ye Xiusong. Research on principle and data processing methods of airborne laser bathymetric technique [D]. Zhengzhou: PLA Information Engineering University, 2010. (in Chinese)
叶修松. 机载激光水深探测技术基础及数据处理方法研究[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2010.

[8] Zhu Jian, Zang Huaguo, He Yan, et al. Study on large dynamic range compression in airborne [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(8): 1172-1176. (in Chinese)
朱坚, 臧华国, 贺岩, 等. 激光测深系统中大动态范围压缩技术的实验研究[J]. 光学学报, 2006, 26(8): 1172-1176.

[9] Li Kai, Zhang Yongsheng, Liu Xiaodi, et al. Study on airborne laser bathymetric system receiver field of view [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(7): 0701005 (in Chinese)
李凯, 张永生, 刘笑迪, 等. 机载激光海洋测深系统接收 FOV 的研究[J]. 光学学报, 2015, 35(7): 0701005.

[10] Huang Tiancheng, Tao Bangyi, Mao Zhihua, et al. Utilization of multi-channel ocean LiDAR data to classify sea and land waveform [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(6): 0610002. (in Chinese)
黄田程, 陶邦一, 毛志华, 等. 多通道海洋激光雷达海陆波形分类研究[J]. 中国激光, 2017, 44(6): 0610002.

[11] John G Shannon. Correlation of beam and diffuse attenuation coefficients measured in selected ocean waters[C]//SPIE, 1975: 3-11.

[12] Li Xiaolong, Chen Yonghua, Yu Fei, et al. A comparison and analysis of inverse models for water optical characteristics by ocean lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(10): 1001005. (in Chinese)
李晓龙, 陈永华, 于非, 等. 海洋激光雷达水体光学特性反