

海洋激光雷达探测卫星技术发展研究

张 扬^{1,2}, 黄卫东^{2*}, 董长哲^{1,2}, 袁金如^{1,2}, 贺 岩^{3,4*}, 万 渊^{3,4}, 汪自军^{1,2},
陈利平³, 竹孝鹏³, 臧华国³, 卜令兵⁵, 刘继桥^{3,4}

- (1. 上海卫星工程研究所, 上海 201109;
2. 上海航天技术研究院, 上海 201109;
3. 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800;
4. 中国科学院大学, 北京 100049;
5. 南京信息工程大学 遥感学院, 江苏 南京 210044)

摘 要: 从国家海洋战略需求出发, 对我国发展海洋激光雷达必要性进行分析, 对海洋激光雷达的特点, 以及国内外发展情况进行梳理; 分析了目前国内外激光雷达建设规划与已发射星载激光雷达的情况, 提出未来星载海洋激光雷达的发展方向, 以及在轨预期数据应用产品, 讨论了星载海洋激光雷达关键技术, 给出了“十四五”期间海洋激光雷达的发展前景。

关键词: 海洋激光雷达; 海洋探测; 星载激光雷达; 海洋遥感

中图分类号: P412.25 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20201045

Research on the development of the detection satellite technology in oceanographic lidar

Zhang Yang^{1,2}, Huang Weidong^{2*}, Dong Changzhe^{1,2}, Yuan Jinru^{1,2}, He Yan^{3,4*}, Wan Yuan^{3,4}, Wang Zijun^{1,2},
Chen Liping³, Zhu Xiaopeng³, Zang Huaguo³, Bu Lingbing⁵, Liu Jiqiao^{3,4}

- (1. Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 201109, China;
2. Shanghai Academy of Spaceflight Technology, Shanghai 201109, China;
3. Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;
4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
5. Institute of Remote Sensing, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: Started with needs of the national marine strategy, the necessity of China's oceanographic lidar developing was analyzed, the characteristics and domestic overseas' development of the oceanographic lidar were summarized; the oceanographic lidar current construction and planning at home and abroad and the launched spaceborne lidar's situation were analyzed, the future spaceborne ocean lidar's development direction was put forward and on-orbit data application product was expected, the key technology of the spaceborne ocean lidar was discussed, the application prospect of developing the oceanographic lidar during the 14th five year plan oceanographic was given.

Key words: oceanographic lidar; ocean detection; spaceborne lidar; ocean remote sensing

收稿日期:2020-08-06; 修订日期:2020-09-20

作者简介:张扬(1987-),男,博士生,主要从事卫星总体激光雷达载荷研制与遥感应用方面的研究。Email:zhangyang-457845@163.com

通讯作者:黄卫东(1968-),男,研究员,长期从事我国海洋领域卫星规划工作。Email:84619091@qq.com

贺岩(1976-),男,研究员,长期从事陆-海激光雷达研制以及光电检测与海洋遥感方面的研究。Email:heyans@siom.ac.cn

0 引言

21 世纪是海洋的世纪,海洋事关国家安全和长远发展,我国将建设海洋强国纳入国家战略中,近年来又陆续颁布了《全国科技兴海规划(2015~2020)》、《民用空间基础设施中长期发展规划(2015~2025)》,标志着海洋开发与利用上升到前所未有的战略高度。卫星海洋遥感技术已在海洋资源、环境、减灾和科学研究等领域发挥了不可替代的重要作用,大力发展海洋卫星是落实强国战略、建设和完善国家空间基础设施的重要举措。

我国历来非常重视海洋卫星遥感技术及卫星海洋应用的发展。经过多年的建设,已先后研制、发射海洋系列卫星和云海系列卫星,初步建立海洋水色、海洋动环境、海洋监视监测系统,在卫星海洋应用上取得了大量成果和显著进展^[1]。

现有卫星海洋遥感常用的手段包括海洋水色仪、微波辐射计、雷达高度计、SAR 等,尽管可以提供全球范围的海洋环境遥感产品,但主要是 SST、风速、海面粗糙度等海洋表面特性的信息探测,即使可见光观测可以获得与浮游生物浓度相关的海洋水色变化,也只能探测 10 m 左右的深度,无法探测海洋次表层水体(100 m 以上)的内部结构,对多维信息的获取能力有限^[2-3]。

相对于被动光学遥感或微波探测而言,海洋激光雷达遥感技术拥有非常高的垂直距离分辨率,可以获取海洋光学参数剖面、海水温度剖面、海洋动力学特征、浅海水深等信息,与被动遥感相结合可以构成地球三维立体观测能力。星载海洋激光雷达也可对混合层叶绿素、悬移质等要素进行探测,能在三维空间尺度上监测浮游植物,并提供一种亚-中尺度生物-物理耦合进行系统观察的方法^[4-7],这对全球碳循环以及上层海洋动力过程的理解具有重要意义,可以增强对海洋信息的获取能力。

发展高精度海洋激光雷达探测卫星,能够准确获取我国以及全球海洋区域次表层参数信息,实现更大范围、更深层次、更高时空分辨率、更综合的海洋物理化学以及生物参数的观测,完成由区域到全球、表层到次表层,甚至深层变化遥感探测能力的跨越,从而填补技术空白,增强我国自主海洋卫星遥感在国际

上的影响力。

1 海洋激光雷达技术发展现状

激光雷达作为一种有效的主动遥感系统,通过激光穿过传输介质产生的延时、频移,以及激光导致介质引起的吸收、弹性散射、拉曼散射、荧光等信号进行遥测,具备时间分辨测量能力,并通过分析回波信号的光谱、波形、强度、频移等特性,能够获得一定深度探测剖面参数或目标的有关信息,是卫星海洋遥感的重要发展方向^[8]。

1.1 国外现状

美国是世界上最早开展海洋激光测深技术研究的国家,1968 年,美国 Syracuse 大学的 Hickman 和 Hogg 建立了世界上第一个激光海洋测深系统^[8],首次阐述了激光水下测深测量技术的可行性,初步建立了激光探测技术的理论基础;此后,美国海军研制成功 PLADS 激光测深系统,随后 NASA 研制成功 ALB 激光测深系统,并于 1971 年至 1974 年进行了试验,在圆盘透明度为 5 Ms 时,测深能力达 10 m 左右,20 世纪 70 年代末 NASA 又研制成功具有扫描和高速数据记录功能的 AOL 水文雷达,采用 400 Hz 的低峰值功率激光器,绘制出了水深小于 10 m 的海底地貌。

20 世纪 80 年代,美国海军采用 500 Hz 的染料激光器,配合全球定位系统 GPS,1 GHz 的采样率 AD 卡进行信号处理,处理结果采用彩色编码显示,处理速度 5 MIPS,比实际要求的实时处理速度少一两个数量级,随后美国采用了新的计算机系统,将处理速度提高到 300 MIPS,以保证任何可行的算法都可以实现。同期,加拿大的 CHS 组织开发了功能先进的 LASERN 500 测深系统,采用红外和蓝绿激光共同扫描,500 MHz 采样率。该系统在衰减系数 0.3 m^{-1} 时,测深能力达 40 m。前苏联于 1991 年研制成功 GOL 系统。

20 世纪 90 年代,机载激光测深系统进入实用阶段,美国、澳大利亚、瑞典等都报道了自己的实用型测深系统。这一时期的系统普遍增加了 GPS 定位和定高功能。1989 年到 1993 年澳大利亚国防部委托 Vision 系统公司对 LADS 进行了重新设计和改进,自 1993 年以来,澳大利亚海军一直利用这套系统进行海道测量,测量面积已超过 $6 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。1995 年, Vision 公司又投资二千四百万澳元研制新的机载激光测深

系统,并命名为 LADS MK II。该系统于 1998 年 9 月开始使用,它的效率是传统声纳测量方法的 20 倍,但所用经费只有传统方法的 20%,而且其测量精度能达到《国际海道测量标准》中一级精度要求,测量速率 900 Hz,测深范围可达 70 m,扫面宽度 240 m。

1993 年,加拿大的 Optech 公司为美国军事工程师协会生产的 SHOALS 激光测深系统,采用 200 Hz 的固体激光器,绿光和红外共同扫描方式,采用的第 3 个光通道,利用 674 nm 红光的拉曼后向散射进行海面检测以及海面、陆地的区分,拉曼回波全部来自水体的后向散射,没有海面的反射成分,保证了精确的海面定位。1994 年,该公司为瑞典海军海道测量部研制生产了 HAWK EYE 测深系统,用于海道测量和 underwater 目标探测,该系统采样率 1 GHz,绿光检测用 APD 代替 PMT,回波提取能力强扫描精度提高,体积减少。




先后经过 20 余年的发展,目前 SHOALS(Scanned Hydrographic Operational Airborne Lidar Survey)系统,是国外典型的海洋探测机载激光雷达系统,也是界上最为先进的激光雷达海洋探测系统。具有先进的 GPS 定位和定高功能,目前最新一代的系统采用重频为 1 kHz 和 10 kHz 的 Nd: YAG 激光器,绿光和红光

共线扫描方式,具有独立的红外和拉曼通道,有 5 个接收通道,3 个用于探测海水界面,2 个用于探测海底,增加的 647 nm 的拉曼后向散射通道进行海面检测以及海面、陆地的区分。该系统出色地完成 50 多个课题的海洋探测任务,其中佛罗里达新航道宾夕法尼亚的普利切岛和墨西哥育卡滩海域的探测任务,以及与超光谱探测设备进行复合,成功探测并识别到了海底沙子、珊瑚、泥浆、不同的水藻等物质,更加说明了 SHOALS 系统的探测能力优于传统探测方法。目前国外典型记载海洋激光雷达技术指标如表 1 所示。

SHOALS 系统目前最新的 CZMIL 激光雷达 (Coastal Zone Imaging and Mapping LIDAR),集成了数字摄像机、多光谱成像仪以及综合了测深及测绘激光雷达于一体,配备有数据获取及数据处理软件,具备优异的海洋测绘、地面测绘及目标识别的性能。该激光雷达扫描系统区别于传统的 SHOALS 系统中旋转反射镜的方式,创新性使用旋转的非涅耳棱镜使激光束转向。CZMIL 激光雷达光学系统中一个大视场进行深海探测,7 个小视场进行测绘。7 个小视场组成的大视场可用于中等深度的海水探测^[9-10]。

表 1 国外典型机载激光雷达技术指标^[9-10]

Tab.1 Parameters of international representative airborne lidar systems^[9-10]

| Parameters | Hawkeye III (Leica) | CZMIL (Optech) | LADS HD (Fugro) |
|---------------------|---|--|---|
| Instrument image |  |  |  |
| Measuring object | Ocean & Land | Ocean & Land | Ocean |
| Technique | Multichannel simulation probe | Multichannel simulation probe | Simulation probe |
| Wavelength | 532 nm, 1 064 nm & 1 550 nm | 532 nm & 1 064 nm | 532 nm & 1 064 nm |
| Investigation depth | 0.15-50 m | 0.15-50 m | 0.15-50 m |
| Detecting precision | 0.36 m (50 m) | 0.36 m (50 m) | 0.36 m (50 m) |
| Detecting precision | 10 kHz (Ocean) 500 kHz (Land) | 10 kHz (Ocean) 70 kHz (Land) | 3 kHz (Ocean) |
| Aspect angle | 40° | 40° | 30° |
| Grid density | 0.8 m×0.8 m (Ocean) 0.1 m×0.1 m (Land) | 0.8 m×0.8 m (Ocean) 0.3 m×0.3 m (Land) | 1.4 m×1.4 m (Ocean) |

1.2 国内现状

我国对于机载激光测深系统的研究始于 20 世纪 90 年代,当时中国海洋大学、中国科学院上海光学精密机械研究所、华中科技大学、中国科学院西安光学机所等单位进行了有关机载、船载激光海底地形地貌测绘的预研工作,提出了初步方案,进行了必要的试验工作,原理上证明了激光测深在我国沿岸海域是可行的^[9]。

中国科学院上海光学精密机械研究在中科院重大项目的支持下,对激光测深项目进行了多年的研究,取得了很多关键技术的突破(见图 1)。“九五”期间,研制成功我国第一台机载海洋测深激光系统,

LADM-1 (第一代),系统采用重复频率为 200 Hz 的全固态激光器。在海水漫衰减系数为 0.1 m^{-1} 时,水深测量能力达到 50 m (见表 2)。“十五”期间,与海军测绘研究所共同的研制的 LADM-2 (第二代) 机载激光测深系统,将技术指标进一步提高,并进行了海上试验,取得了比较满意的结果,系统具备扫描、高速数据采集存储、GPS 精确定位功能(见表 2)。该系统的研制成功,标志着我国的机载海洋测量技术步入世界先进国家行列^[9,11]2015 年, Mapper-5000 机载双频激光雷达(第三代)工程样机研制成功,在南海完成了 3 个架次的机载飞行试验,获得了海陆一体化的三维地形数据,新增的陆地通道提升了陆地测点密度(见表 3),

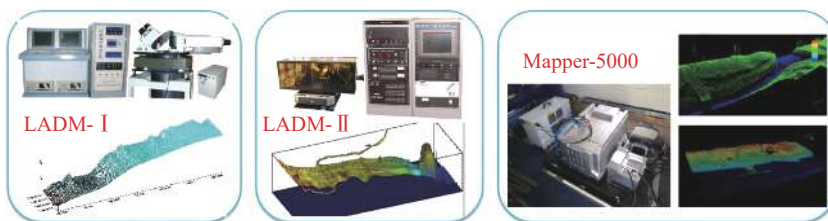


图 1 上海光学精密机械所研制机载海洋激光雷达系统(LADM- I、LADM- II、Mapper-5000)^[9,11]

Fig.1 Airborne LiDAR system (LADM- I, LADM- II, Mapper-5000) by Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics^[9,11]

表 2 上海光学精密机械研究所研制三代机载激光雷达技术参数

Tab.2 Parameters of the third airborne lidar system by Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics

| Parameters | LADM- I | LADM- II | Mapper-5000 |
|----------------------|-------------------|-------------------|--------------------------------------|
| Wavelength | 1 064 nm & 532 nm | 1 064 nm & 532 nm | 1 550 nm, 1 064 nm & 532 nm |
| Repetition frequency | 200 Hz | 1 kHz | 5 kHz |
| Grid density | 5 m×5 m | 2.5 m×2.5 m | 1 m×1 m (Ocean) 0.25 m×0.25 m (Land) |
| Weight | 300 kg | 350 kg | 98 kg |

表 3 机载 Mapper-5000 (第三代) 双频激光雷达海陆技术指标

Tab.3 Parameters of the airborne Mapper-5000 (the third) double frequency lidar

| Parameters | Ocean | Land |
|----------------------|-------------------|---------------|
| Wavelength | 1 064 nm & 532 nm | 1 550 nm |
| Repetition frequency | 5 kHz | 100-400 kHz |
| Grid density | 1 m×1 m | 0.25 m×0.25 m |
| Scanned area | ±15° | ±30° |
| Flight altitude | | 100-1 500 m |
| Vertical accuracy | | 0.12 m |
| Investigation depth | | 0.25-51 m |
| Detecting precision | | 0.23 m |
| Position accuracy | | 0.26 m |
| Power dissipation | | 1.2 kW |

多通道接收和数据处理技术提升了浅水探测能力和海陆分类精度,并获得了海洋光学剖面信息(见图2)。

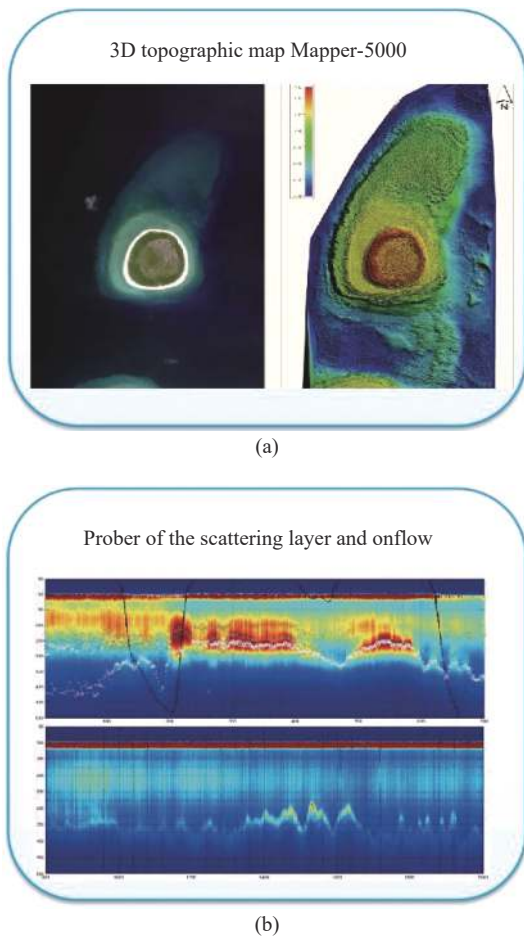


图2 机载 (Mapper-5000) 双频激光雷达海洋数据产品^[9,11]

Fig.2 Ocean data products of airborne (Mapper-5000) double frequency lidar^[9,11]

中国海洋大学在国家科技攻关、863 计划、自然科学基金等支持下,也先后自主研发完成多个海洋、海气边界层探测激光雷达系统,包括车载布里渊散射激光雷达、激光叶绿素荧光雷达、机载激光荧光雷达、机载海面溢油监测激光雷达等,研制了首个机载海洋生物与溢油监测荧光激光雷达、我国第一套高光谱分辨率激光雷达。此外,哈尔滨工业大学、武汉大学、北京理工大学、浙江大学等单位也做了很多相关工作^[9]。

近年来,国际上机载海洋测深系统逐步由军用转向民用,向多功能机载海洋光学雷达发展,加强了激光在海水传输中散射波形的研究,包含了诸如海水成

分、叶绿素、泥沙含量、鱼群和浮游生物等更多宝贵的信息获取^[4-8]。可以预见,未来的机载激光海洋遥感手段将使人类对海洋有着更深入、更本质的了解。

1.3 海洋激光探测与其他激光探测的区别

海洋激光探测与其他激光探测最重要的区别在于激光与纯水的相互作用。1939~1974 年间,Clarke、James、Sullivan 和 Morel 等完成了实测透射率和衰减系数^[4,7],以及纯水的理论散射系数。这些结果可以作为纯水的衰减参考依据,观测的结果表明蓝光具有更大的穿透性,而红光衰减最强。波段从 580~600 nm,透射率出现显著下降。衰减率与散射率的比较,证明衰减主要是吸收效应。由于选择性吸收,水实质上相当于一个吸收最大值出现在 750~760 nm 的蓝光单色仪。

海水中的悬浮粒子、浮游生物和溶解有机物对光学信道的散射有强烈的影响,1975 年 J.D.Jackson 给出了在纯水分子吸收影响下的光谱衰减曲线(图3)^[12],结果表明纯水的最小吸收波段在 460~490 nm 的蓝绿波段。1976 年, N.G.Jerlov 借助于高太阳高度时下行辐照度,提出了一套将大洋水进行分类的方案,用于区别不同类型的水。根据实测数据,按照海水的吸收,散射特性将水质划分为 Jerlov I、I A、I B、I C、II、III、3C、5C、7C、9C 十类水质^[13]。P.Lacovara 在 2008 年给出了在悬浮颗粒、浮游生物和溶解有机物影响下的光谱衰减曲线,这些物质在蓝绿波段造成的散射最小^[12-13]。

总体来说,海洋激光探测与其他激光探测的特点如表 4 所示,主要区别:

- (1) 采用高峰值功率脉冲激光器,激光波长具有更好的海水透过率和更低的背景光,提升探测深度和抗干扰能力;
- (2) 采用扫描方式而不是阵列,能量集中于提升探测深度和探测信噪比;
- (3) 采用高灵敏度模拟探测和全波形采样技术,需要连续剖面 and 波形信息;
- (4) 采用直接探测和间接探测综合的方法,激光海水的穿透深度受限,发展多技术综合方法能够实现更高的性能。

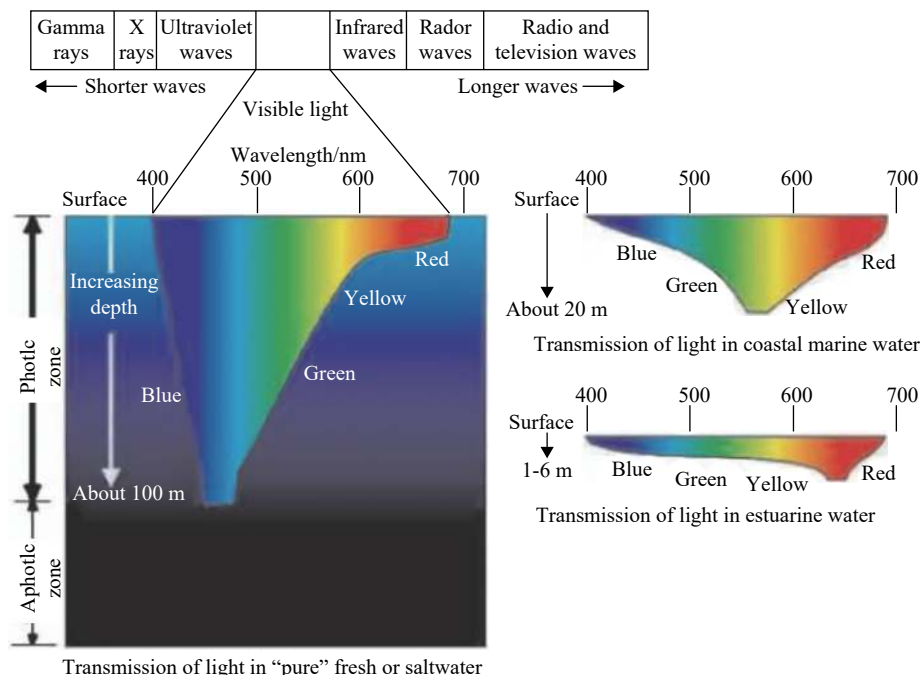


图 3 不同波长的海水透过率谱线^[12]

Fig.3 Graphical representation of light transmission in various kinds of natural water^[12]

表 4 星载海洋探测激光雷达特点

Tab.4 Features of spaceborne ocean lidar

| Target of detection | Theory | Repeated frequency | Single pulse energy | SNR | Frequency stability |
|-------------------------|-------------------------|--------------------|---------------------|---------|---------------------|
| Forest | Height measurement | High | Lesser | Esser | General |
| Mapping | Height measurement | Highest | Lesser | Esser | General |
| Aerosol | Back scattering | General | Biggish | Biggish | General |
| Atmospheric composition | Differential absorption | General | Biggish | Biggish | Biggish |
| Wind field | Doppler | General | Biggish | Biggish | Maximum |
| Ocean | Back scattering | General | Maximum | Maximum | Maximum |

2 星载激光雷达发展现状

2.1 国外现状

从 1994 年的空间激光雷达 LITE (Lidar In-Space Technology Experiment) 试验、2002 年的地球科学激光测高 ICESat-1 (Ice, Cloud and Land Elevation Satellite) 系统、2006 年的云与气溶胶偏振测量激光雷达 CALIPSO (Cloud-Aerosols Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations), 以及 2018 年全球风场测量激光雷达 AEOLUS 与极地冰川、冰盖、植被测绘激光雷达 ICESat-2 (Ice, Cloud and Land Elevation Satellite 2)。欧美等国已积累了星载激光雷达的经验, 为星载海洋

激光雷达的方案设计、探测原理、数据反演提供了重要参考 (见图 4)。

回顾目前发射的星载激光雷达, LITE 作为世界首个星载大气探测激光雷达, 虽然只工作了 11 天, 但证明了星载激光雷达从空间向地球大气进行探测的能力, 同时也向大气科学研究者展示了星载激光雷达能提供云与气溶胶剖面测量的重要能力。

在 LITE 以及 SLA (美国 1996 年航天飞机搭载激光高度计)、MOLA (美国 1996 年发射火星探测器, 搭载的激光高度计) 的技术基础上, 地球科学激光测高 ICESat-1 卫星实现多波长全固态星载激光雷达技术, 获得全球海冰厚度、冰盖分布、海表高程, 并辅助测



图 4 NASA 地球科学十年观测计划

Fig.4 Plan of NASA Earth science decadal survey

量云层等大气数据。

NASA 发射 CALIPSO 卫星目前仍然在轨运行, 实现正交偏振、多通道探测星载激光雷达技术, 突破长寿命星载全固态激光器技术, 获得全球大气、海洋的激光雷达探测数据, CALIPSO 使星载激光雷达设计八年寿命成为可能。

“风神 Aeolus”卫星为全球首个风场多普勒探测激光雷达, 研制历时 20 年, 空间激光器防污染首次采用在轨“充氧”设计, 卫星三年设计寿命, 耗资 5.5 亿美元。2019 年 6 月, 在第 29 届 ILRC (International Laser Radar Conference) 会议上, ALADIN (The Atmospheric Laser Doppler Instrument) 研制团队公开在轨 355 nm 激光器运行数据, 激光器单脉冲能量以每周 1 mJ 的速度下降, 于 2019 年初启动备份激光器, 目前状态基本良好。ALADIN 突破星载激光器高精度稳频、风场多普勒信号检测激光雷达技术; 在轨期间激光器充氧气, 突破 355 nm 紫外波段全固态激光器防污染技术。

ICESat-2 卫星, 为 ICESat-1 卫星的后续星, 实现了空间激光器高重频、多波束、单光子回波探测激光雷达技术; 获取极地海冰厚度、冰盖变化、海表高程、植被高度, 提供全球城市、海洋、陆地测绘信息, 对南北极海冰物质平衡和计算全球生物总量具有重大科学意义。

2.2 国内现状

我国对地观测激光雷达经过多年发展, 目前已发射了三颗卫星, 分别为: 2016 年资源三号 02 星、2019 年高分七号, 以及 2020 年 7 月发射资源三号 03 星。这三颗卫星都搭载了对地观测激光测高载荷, 用于承担星下高程控制点的测距任务, 辅助光学立体测绘相机, 实现提高光学卫星影像无控立体测绘精度。

其中, 高分七号搭载的激光测高仪载荷, 是我国首个对地观测的双波束激光测高仪。实现单频、高能量、高光束质量输出, 设计寿命八年。标志着我国具备长寿命、大能量空间全固态激光器研制能力, 对推动对地遥感载荷发展具有重要意义。

目前, 我国在研的民用大气环境监测卫星, 主载荷为大气探测激光雷达, 在国际上首次采用三波长双体制激光雷达探测技术, 利用 532 nm 波长进行云和气溶胶的偏振与高光谱探测, 利用 1 064 nm 进行云和气溶胶后向散射, 以及地面高程信息探测, 利用 1 572 nm (On 及 Off 双波长) 激光脉冲进行 CO₂ 柱浓度差分吸收探测。其中, 532 nm 接收通道探测器采用大动态范围、通道拼接技术, 在轨期间可获得海洋次表层数据产品, 未来大气环境监测卫星海洋环境探测值得期待。2019 年 3 月, 大气探测激光雷达完成机载校飞试验 (见 图 5)。大气环境监测卫星预计 2021 年发射。



图 5 大气探测激光雷达校飞样机测试

Fig.5 Flight calibration prototype test of atmospheric lidar

3 海洋星载激光雷达技术产品

目前, 由于在轨没有星载海洋激光雷达, 现有 532 nm 波长星载激光雷达都进行了海洋方面的探索。如 CALIPOS0 激光雷达卫星在海洋探测领域已经有一定的应用, 主要包括海洋水色、POC (Particulate Organic Carbon) 等^[8, 14]。近期 Icesat-2 卫星也公布了其在海洋次表层 20 m 左右获取的海洋数据信息^[6]。

综上, 对星载海洋激光雷达预期的数据产品进行梳理^[4-8, 14-17], 可技术应用的数据产品, 如图 6 所示。

- Parameter of the ocean dynamic:
 - Ocean temperature
 - Depth of the ocean
 - The warm-core eddy
- Parameter of the seawater:
 - Optical properties of water
 - Particle distribution in water
 - Chlorophyll concentration
- Parameter of the sea surface:
 - Surface roughness
 - Aerosol concentration
 - Sea ice elevation

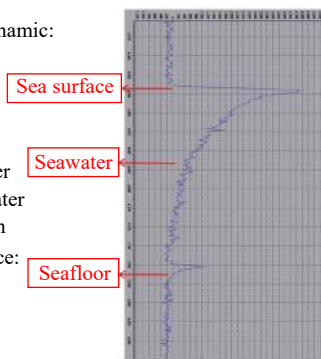


图 6 星载海洋激光雷达预期的数据产品

Fig.6 Expected data products of future spaceborne ocean lidar

3.1 海洋次表层光学参数探测

海洋激光雷达可获得水下剖面散射层信息, 这些散射层大部分是单一或多细胞的浮游植物, 以及大量由直径超过 1 mm 的单个非球型藻类细胞构成, 其中多细胞的非球形藻类细胞群落尺寸可能更大, 结构也更复杂, 入射的光子将在个体细胞内产生光学高阶散射。这些水下散射层信息都可利用海洋激光雷达进行探测。

在浮游植物与藻类细胞组成的散射层中, 包含高浓度营养物质与浮游植物构成的稀薄层, 这些层可能只有 10 cm 左右, 但延伸数千米, 并持续数天, 常常与海洋密度跃层息息相关。这些集中层可以影响海洋上层的地球生物化学过程, 包括海洋初级生产力和有害藻类的形成。所以, 通过正交偏振激光雷达的回波退偏情况, 可获取海水中粒子、POC、浮游植物(海藻细胞)、鱼群等分布信息^[4-8, 14-16]。如图 7 所示, 利用机

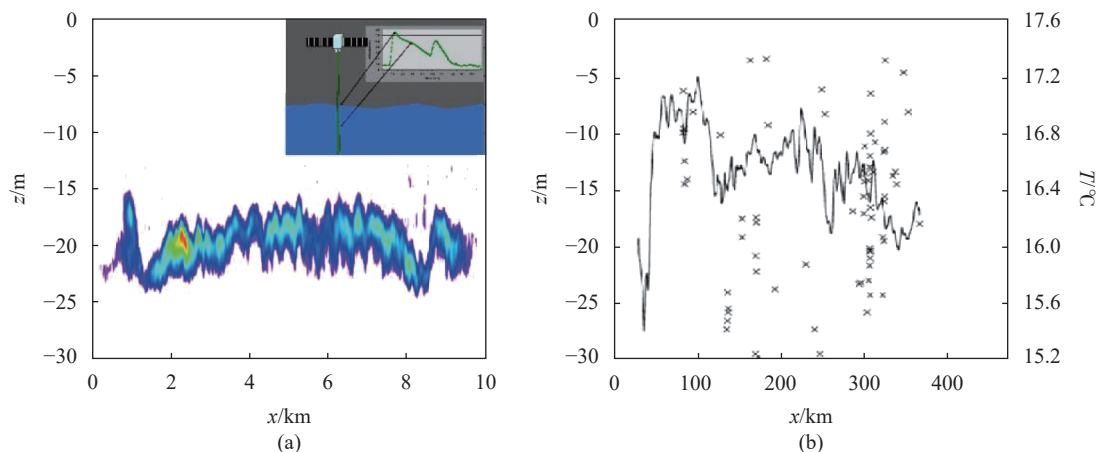


图 7 美国阿拉斯加湾水下涡流内浮游生物层与俄勒冈水域探测鱼群位置分布^[8]

Fig.7 Plankton layer within a warm-core eddy in the Gulf of Alaska and the positions of individual fish that were detected in the Oregon coast^[8]

载海洋激光雷达获取水下浮游生物散射层与鱼群分布信息。

高光谱激光雷达 HSRL (high-spectral-resolution lidar) 技术, 源于区分在大气探测中气溶胶与分子散射信号的方法; 同样的概念可以应用于海水, 利用海洋激光雷达高光谱技术, 可获得海水的衰减与后向散射系数, 从而获得海水的固有光学参数剖面信息^[8, 15]。

3.2 叶绿素浓度探测

在海洋光学中, 存在于每一个浮游植物细胞中的光合作用色素能够降低或将 CO₂ 固化为有机碳, 将太阳能转化为化学能, 并产生 O₂。这些色素包含无处不在的叶绿素 a, 辅助色素叶绿素 b 和叶绿素 c, 以及光合的类胡萝卜素。由于叶绿素 a 是所有浮游植物中唯一的光合色素, 因此提供了一种用于测量浮游植物丰度和生物量的方法。

叶绿素 a 的发射光谱很重要的一个特性就是在 683 nm 左右出现荧光峰, 在荧光峰处, 浮游植物激发的辐射荧光能够被卫星监测。所以, 利用蓝绿激光发射到海洋中, 海水中叶绿素 a 受激发会出现 683 nm 左右波长的红色荧光, 根据接收到的荧光强度能够反演出海水中叶绿素 a 的柱浓度, 以及通过 647 nm 左右喇曼回波获取海面溢油情况, 探测精度可达 35%~

40%^[4-8, 22]。如图 8 所示, 利用海洋激光雷达 532nm 激光, 获得海洋叶绿素 a 荧光与喇曼散射光谱。

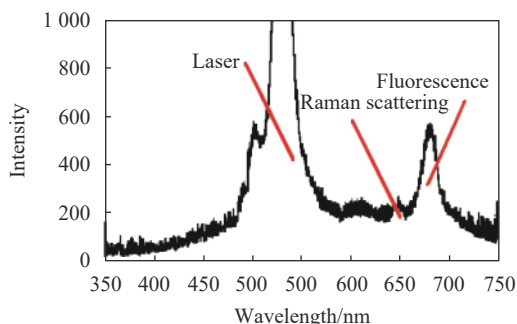


图 8 叶绿素浓度测量原理^[22]

Fig.8 Diagram of the chlorophyll concentration measurement^[22]

3.3 海洋温度剖面探测

用海洋激光雷达探测水体非弹性(布里渊)散射信号, 获得海洋剖面温度是项前沿技术。入射海洋中的激光束, 水中声子与激光相互作用, 产生布里渊频移; 利用 532 nm 的绿色激光入射纯水, 将产生窄带的 7.5 GHz 频移, 通过激光雷达接收光路鉴频器, 可精确获得水中声速, 通过已知海水中盐度与压强, 能够反演海水剖面温度信息^[8, 17-22], 水体剖面温度测量原理如图 9 所示。

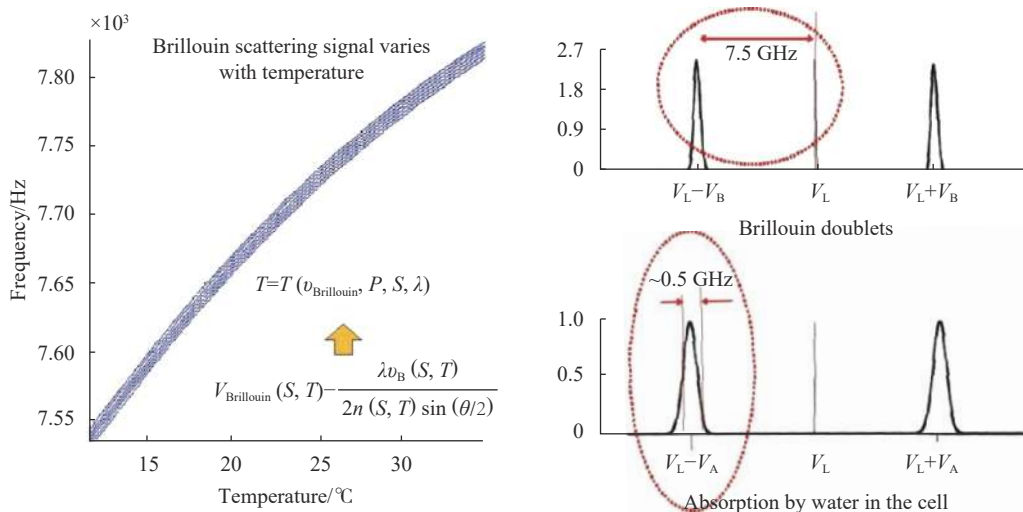


图 9 布里渊散射信号随温度的变化与水体的吸收^[4, 17-21]

Fig.9 Brillouin scattering signal varies with temperature and absorption by water^[4, 17-21]

3.4 海水深度和海冰高程探测

与测高激光雷达原理基本一致, 海洋激光雷达工作期间, 同时获得陆地、海冰(海表)和海底的回波

信号, 测量原理如图 10 所示, 采用脉冲整形和时间数字转换(TDC)技术测量激光脉冲到陆地、海冰(海表)回波信号的时间延迟, 用于测量陆地和瞬时海冰

(海表)的斜程。采用高速 AD 采样激光海冰(海表)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,计算海冰(海表)和海底的回波时间延迟来获得海底的斜程。通过海洋激光雷达探测,能够获得海水深度、海冰高程、以及海表粗糙度等信息^[11]。

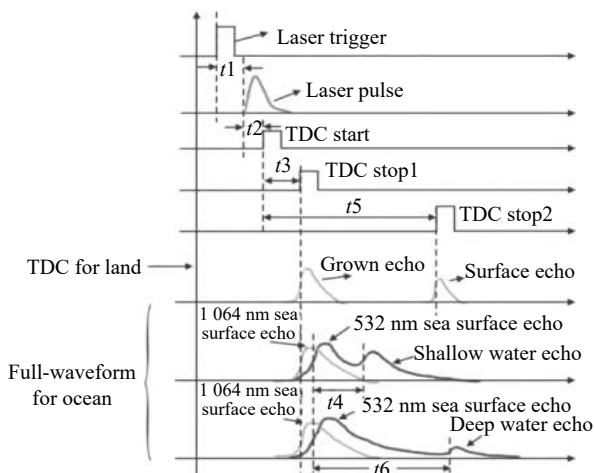


图 10 测量浅海水深与海冰高程原理^[11]

Fig.10 Schematic diagram of measuring shallow water depth and sea ice elevation^[11]

3.5 海洋内波探测

通过海洋激光雷达的探测数据,采用浮游生物和藻类细胞的散射作为示踪物,可提供次表层海洋的动力信息,如混合层深度、内波和湍流等信息。其内波总能量密度可以通过激光雷达二次扫描内波传播速度被估算^[4-8](见图 2)。

4 关键技术分析

目前,上海航天技术研究院正在积极论证高精度海洋激光探测卫星,对卫星的技术指标和关键技术进行了初步梳理。认为轨道采用低倾角的太阳同步轨道设计,有效载荷为海洋探测激光雷达,配备被动光学或微波载荷;星载激光雷达激光波长具备蓝绿双波长输出,单脉冲能量 400 mJ 以上;接收系统口径为 2 m 以上,采用偏振与光致荧光检测、双频高光谱激光雷达技术接收后向散射与海洋荧光信号^[9, 11, 14]。

可获取全球海洋次表层的温度剖面、水体固有光学参数、叶绿素浓度,以及散射层、浮游生物、水中颗粒物、POC、海洋内波、湍流、海冰等信息^[4-8, 22]。

4.1 激光载荷技术

(1) 高效蓝绿波段大功率、高可靠空间激光器技术

激光器是激光雷达探测的核心部件,直接制约了载荷的性能以及寿命。目前,532 nm 探测波段主要受到激光器成熟度的影响,并非海洋探测的最佳波段,亟需发展 460~505 nm 之间的新型大功率、长寿命空间激光器,进一步提升海洋穿透能力。星载大功率蓝绿双频激光器原理样机出光测试如图 11 所示。

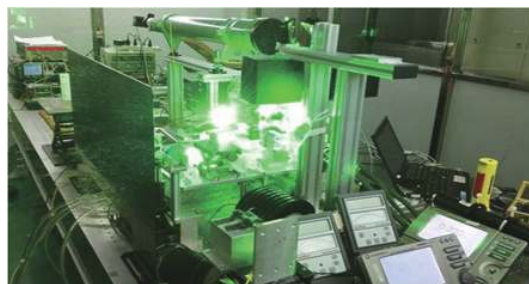


图 11 大功率蓝绿激光器原理样机

Fig.11 Prototype of high power blue-green laser

(2) 低噪声、高宽带、高灵敏度和高量子效率探测技术

海洋激光探测尤其是利用布里渊散射进行海水温度剖面探测,对信噪比、灵敏度要求特别高,需要突破高效率的探测技术。

(3) 大口径激光雷达载荷技术

经仿真分析,获取预期海洋探测数据产品,海洋激光雷达需要 2 m 以上口径接收装置。2018 年 ESA 发射的星载测风激光雷达 ALADIN 的光机结构如图 12 所示,接收望远镜口径 1.5 m,为目前在轨接收口径最大激光雷达。

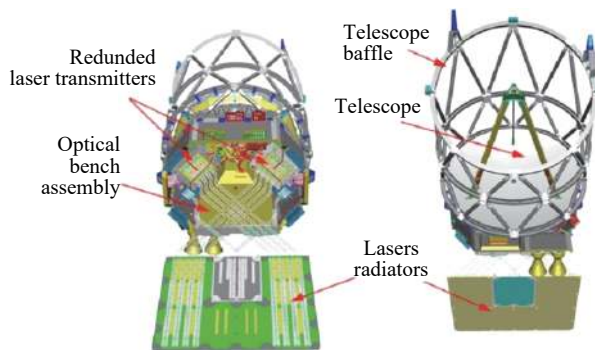


图 12 ALADIN 测风激光雷达光机结构

Fig.12 ALADIN wind lidar opto-mechanical structure

(4) 高速、低噪声、大动态范围数据采集技术

海洋激光探测相对其他要素对动态范围要求更高,需要突破高速低噪声数据采集技术。通过模拟采集和单光子技术融合,实现大动态范围(100 dB)、高速(采样频率 20 MHz)的激光雷达信号采集。如图 13 所示。

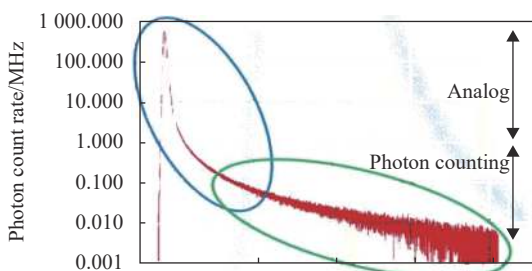


图 13 海洋激光雷达探测器动态范围仿真^[9,11]

Fig.13 Ocean lidar detector simulation of dynamic range^[9,11]

4.2 应用技术

海洋次表层结构参数往往相互耦合,如布里渊温度测量受盐度的耦合影响。如何进行有效的参数分析提取,还有待应用的深入研究,以确保有合理可行的应用处理方法,以及合理可行的探测指标要求与应用产品。

(1) 海洋激光探测高精度反演技术

针对海洋激光不同探测要素,需提前开展数据高精度反演技术研究,保证后续在轨应用效能^[15-17,23]。

(2) 主被动结合高精度反演技术

针对海洋探测要素,综合利用主动激光和其它探测手段,进行多元数据融合反演研究^[23]。

5 结束语

海洋激光雷达探测技术是实现海洋高精度次表层参数探测的可行、有效的手段,是海洋卫星遥感技术的方向,将在海洋探测领域发挥重要作用。

通过若干年的共同努力研究,在充分继承我国激光遥感卫星及雷达技术良好的技术基础上,可以在“十四五”期间完成海洋激光雷达探测卫星的研制和应用,填补我国及国际的海洋激光遥感空白,极大推进国家海洋强国战略的建设。

参考文献:

[1] Jiang Xingwei, Lin Mingsen, Zhang Youguang. Progress and

prospect of Chinese ocean satellites [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2016, 20(5): 1185-1198. (in Chinese)

蒋兴伟,林明森,张有广. 中国海洋卫星及应用进展[J]. 遥感学报, 2016, 20(5): 1185-1198.

[2] Lin Mingsen, He Xianqiang, Jia Yongjun, et al. Advances in marine satellite remote sensing technology in China [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2019, 41(10): 99-112. (in Chinese)

林明森,何贤强,贾永君,等. 中国海洋卫星遥感技术进展[J]. 海洋学报, 2019, 41(10): 99-112.

[3] Jiang Xingwei, He Xianqiang, Lin Mingsen, et al. Progresses on ocean satellite remote sensing application in China [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2019, 41(10): 113-124. (in Chinese)

蒋兴伟,何贤强,林明森,等. 中国海洋卫星遥感应用进展[J]. 海洋学报, 2019, 41(10): 113-124.

[4] Jamet Cedric, Ibrahim Amir, Ahmad Ziauddin, et al. Going beyond standard ocean color observations: Lidar and polarimetry [J]. *Frontiers in Marine Science*, 2019, 6: 1-24.

[5] Michael R Roddewig, James H Churnside, Joseph A Shaw. Lidar measurements of the diffuse attenuation coefficient in Yellowstone Lake [J]. *Applied Optics*, 2020, 59(10): 3097-3101.

[6] James H Churnside, Joseph A Shaw. Lidar remote sensing of the aquatic environment: invited [J]. *Applied Optics*, 2020, 59(10): C92-C99.

[7] Timothy S Moore, James H Churnside, James M Sullivan, et al. Vertical distributions of blooming cyanobacteria populations in a freshwater lake from LIDAR observations [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 225: 347-367.

[8] James H Churnside. Review of profiling oceanographic lidar [J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(5): 051405.

[9] He Yan, Hu Shanjiang, Chen Weibiao, et al. Research progress of domestic airborne dual-frequency LiDAR detection technology [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(8): 082801. (in Chinese)

贺岩,胡善江,陈卫标,等. 国产机载双频激光雷达探测技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(8): 082801.

[10] Tuell G, Barbor K, Wozencraft J. Overview of the coastal zone mapping and imaging lidar (CZMIL): a new multisensor airborne mapping system for the US Army Corps of Engineers[C]// Proceedings of SPIE, 2010, 7695: 7695R.

[11] Hu Shanjiang, He Yan, Chen Weibiao, et al. Design of airborne dual-frequency laser radar system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(9): 0930001. (in Chinese)

胡善江,贺岩,陈卫标,等. 机载双频激光雷达系统设计和研制[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(9): 0930001.

- [12] Luan Xiaoning, Li Jingwen, Guo Jinjia, et al. Ocean lidar for fishery resources survey and ecological environment monitoring [J]. *Acta Laser Biology Sinica*, 2014, 23(6): 534-541. (in Chinese)
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.
- [13] Michael G Solonenko, Curtis D Mobley. Inherent optical properties of Jerlov water types [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(17): 5392-5401.
- [14] Xu Peituo, Tao Yuting, Liu Zhipeng, et al. Comparison of oceanic lidar experiments and simulation results [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(2): 0203007. (in Chinese)
徐沛拓, 陶雨婷, 刘志鹏, 等. 海洋激光雷达实验与仿真结果的对比[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(2): 0203007.
- [15] Liu Dong, Zhou Yudi, Zhu Xiaolei, et al. Investigation on discrimination characteristics of atmospheric and oceanic high spectral resolution lidar [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2020, 15(1): 48-54. (in Chinese)
刘东, 周雨迪, 朱小磊, 等. 大气海洋高光谱分辨率激光雷达鉴别特性研究[J]. *大气与环境光学学报*, 2020, 15(1): 48-54.
- [16] Xu Peituo, Liu Dong, Zhou Yudi, et al. Modeling and analysis of oceanic lidar returns with multiple scattering [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2020, 49(2): 0203007. (in Chinese)
徐沛拓, 刘东, 周雨迪, 等. 海洋激光雷达多次散射回波信号建模与分析[J]. *遥感学报*, 2020, 49(2): 0203007.
- [17] Edward S. Fry, Yves Emery, Quan Xiaohong, et al. Accuracy limitations on Brillouin lidar measurements of temperature and sound speed in the ocean [J]. *Applied Optics*, 1997, 36(27): 6887-6894.
- [18] Zhou Bo, Fan Qiming, Ma Yong, et al. Experimental analysis on the rapid measurement of a high precision Brillouin scattering spectrum in water using a Fabry-Perot etalon [J]. *Laser Physics Letters*, 2016, 13(5): 1-9.
- [19] Chengyong Feng, Xiaozhen Xu, Jean-Claude Diels. Generation of 300 ps laser pulse with 1.2 J energy by stimulated Brillouin scattering in water at 532 nm [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(12): 3367-3370.
- [20] Liu Jintao, Chen Weibiao, Song Xiaoquan, et al. Potential for measurement of water Brillouin scattering with heterodyne lidar [J]. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 2002, 32(1): 139-144. (in Chinese)
刘金涛, 陈卫标, 宋小全, 等. 外差激光雷达测量水体布里渊散射可行性研究[J]. *青岛海洋大学学报*, 2002, 32(1): 139-144.
- [21] Gao Wei, Lv Zhiwei, He Weiming, et al. Effects of salinity and pressure on the ocean temperature measurement by Brillouin lidar [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2008, 40(3): 354-357. (in Chinese)
高玮, 吕志伟, 何伟明, 等. 盐度和压强对布里渊雷达遥测海洋温度的影响[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2008, 40(3): 354-357.
- [22] Joyanto Mukerjee. Remote Sensing of Ocean Waters with Raman and Brillouin Scattering[M]. Australia: DSTO Aeronautical and Maritime Research Laboratory, 2001: 2-22.
- [23] James H Churnsidei, Richard D Marchbanks. Calibration of an airborne oceanographic lidar using ocean back scattering measurements from space [J]. *Optics Express*, 2019, 27(8): A536-A542.