

星载海洋剖面多要素探测技术与系统研究

孙倩^{1,2}, 沈振民^{1,2}, 杨颂^{1,2}, 王子豪^{1,2}, 王元庆³, 梁琨³, 尚卫东^{1,2}, 王培培^{1,2},
俞越^{1,2}, 赵号^{1,2}, 吕红^{1,2}, 刘正坤⁴, 郑永超^{1,2}

- (1. 北京空间机电研究所, 北京 100094;
2. 中国空间技术研究院 空间激光信息感知技术核心专业实验室, 北京 100094;
3. 华中科技大学 电子信息与通信学院, 湖北 武汉 430074;
4. 中国科学技术大学 国家同步辐射实验室, 安徽 合肥 230026)

摘要: 海洋立体结构信息是未来实现海洋透明与海洋强国的基础, 针对海洋剖面探测能力不足的问题, 以及星载海洋剖面多要素同源同域一体化探测空白, 开展星载海洋剖面多要素探测技术与系统方案研究, 提出新型激光主被动复合、能谱复用探测技术体制, 面向未来星载应用, 完成星载海洋剖面多要素探测载荷系统设计。其中, 激光器谱段设计为 486、532 nm 多波长一体化最佳配比输出, 光电接收探测系统选用 1 m×5 m 超大口径可折叠光栅主镜, 经过仿真分析, 探测系统可实现大洋水深 100 m 深度、温度、盐度以及后向散射系数等多要素同源探测能力, 同等体积包络条件下, 能量收集能力提升 5 倍。

关键词: 激光雷达; 海洋剖面探测; 主被动复合; 大口径光栅

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20230466

0 引言

海洋认知已经从表面观测进入立体探测时代。剖面探测是研究全球海洋光学和生物参数的三维剖面分布规律、海洋碳和能量循环的重要基础和手段, 是认知海洋环境现状、保障海洋生态文明建设、支撑“双碳”战略的重要基石的必要信息。根据全球海洋观测系统委员会 CEOS 提出 31 个核心海洋观测变量, 涉及的重要海洋剖面要素包括深度、温度、盐度、光学参数等。海洋资料的匮乏和海洋观测数据获取手段的不足, 特别是缺乏全球尺度的水下多要素剖面数据, 已经成为全面认识和了解海洋从而建设海洋强国的瓶颈问题。目前, 海洋剖面遥感探测主要依赖接触式实测或机载探测, 受限于地域、以及不能稳定获取长时间序列测点数据, 星载海洋剖面多要素探测技术作为大范围覆盖、可连续观测、不受地域限制的光学遥感手段, 成为解决以上问题的重要途径。

星载海洋光学遥感探测载荷和星载微波雷达技

术, 经过多年发展分别在水深、海表温度和海表盐度要素探测方面取得进展^[1-9]。激光雷达主动光学水深遥感基于蓝绿激光良好的海水穿透特性, 成为解决海洋剖面探测的一种重要手段^[10-11]。2018 年, 美国 NASA 发射 ICESat-2 卫星上搭载了单光子激光雷达 (ATLAS), 采用 532 nm 波段的激光, 白天测得清洁海水最大水深可达 19.5 m, 夜间测得的清洁海水最大水深可达 42.7 m, 对于沿海浑浊水体最大水深分别为 7.5 m, 和 10.1 m^[12]。为了弥补单一的激光探测手段难以满足大面积、高密度的海洋测深数据应用需求, Hsu 等结合 ICESat-2 和 Senital-2 光学数据的蓝绿波段, 使用线性、多项式、指数 3 个半经验模型, 得出南海 6 个岛屿和珊瑚礁的浅水深 (深度 < 20 m)^[13]。2018 年南京大学程亮团队在南海岛屿开展了激光雷达点云结合被动多光谱数据的联合水深反演, 实现 20~30 m 清洁水体反演; 2020 年, 海洋三所陈本清团队利用 ICESat-2 激光雷达数据和 GeoEye-1/GF-2 多光谱数据进行了主被动融合水深反演, 实现

收稿日期: 2023-07-28; 修订日期: 2023-12-04

基金项目: 国家自然科学基金项目 (62105240, 62075159); 国家重点研发计划项目 (2019YFB2203002)

作者简介: 孙倩, 女, 高级工程师, 博士, 主要从事水下激光探测方面的研究。

15~20 m 水深反演^[14-16]。2010 年 NASA 发射的“宝瓶座”Aquarius 卫星的设计值为月平均 0.2 psu@100 km, 目前仅能测量海表情况^[17]。激光光谱探测可实现水下温盐要素剖面探测, 2004—2011 年期间, 德国达姆施塔特工业大学的 T. Walther 团队用布里渊散射方法测量海水温度, 通过频移测量的温度精度最高能达到 0.1 K 以上, 深度分辨 1 m, 声速测量精度 3 m/s。2010 年, 日本的 Asahara 等人用布里渊散射的方法, 测量了 900 K 高温、25 GPa 高压情况下水中的声速值, 表明了布里渊散射技术可以应用到深海和地幔状况中^[18]。

综上所述, 海洋遥感探测是面向多要素相互作用、垂直结构分化、时间变化不均一、跨域多介质传输的复杂体系, 探测要素多、难度大、范围广、时间长, 而星载平台具有不受国界限制、大范围、长时间获取信息的优势, 是进行海洋观测的最佳平台。目前传统多载荷协同观测或星地联动的观测模式能够获得分时分区域的多要素信息, 海洋剖面温、盐、深多要素的一体化探测仍处于空白, 水下光学生物参数与物理化学参数的非同源、非同域、非同时的探测数据反演一致与准确度差, 无法有效获取海洋三维立体结构满足科学研究需求。光学遥感反演水深可有效

地实现大范围的浅海水深宏观动态观测但探测深度、精度不足, 主动光学水深遥感难以兼顾高精度大深度与高密度大范围。面向未来海洋剖面多要素包括深度、温度、盐度信息, 需要解决高灵敏、高精度、高密度、大范围兼顾的难题, 文中通过对海洋剖面多要素探测任务需求, 经过系统指标分析与论证, 提出一种新型的星载近海岸剖面多要素探测技术方案, 采用主被动复合探测, 激光能量与光谱同步探测体制相集合, 利用超大口径可折叠光学主镜保证水下微弱信号高效搜集, 利用激光光谱通道获得全部弹性与非弹性散射光谱, 高精度辨别和解耦水中分子与粒子散射信号, 从而获得更加精确的激光雷达后向散射系数, 具备水下温度、盐度、深度、光学后向散射系数等多要素探测能力, 数据的同源同域同时性好。

1 探测系统体制与指标仿真分析

1.1 探测体制与载荷配置

为满足未来星载海洋剖面要素立体结构, 文中构建集多光谱影像、激光能量与激光光谱为一体的“图、深、谱”复合立体探测系统, 利用激光能量-光谱联合测量+多光谱影像进行多源数据融合获得广域高精度的水深及水底地形、海洋环境剖面信息, 如图 1 所示。

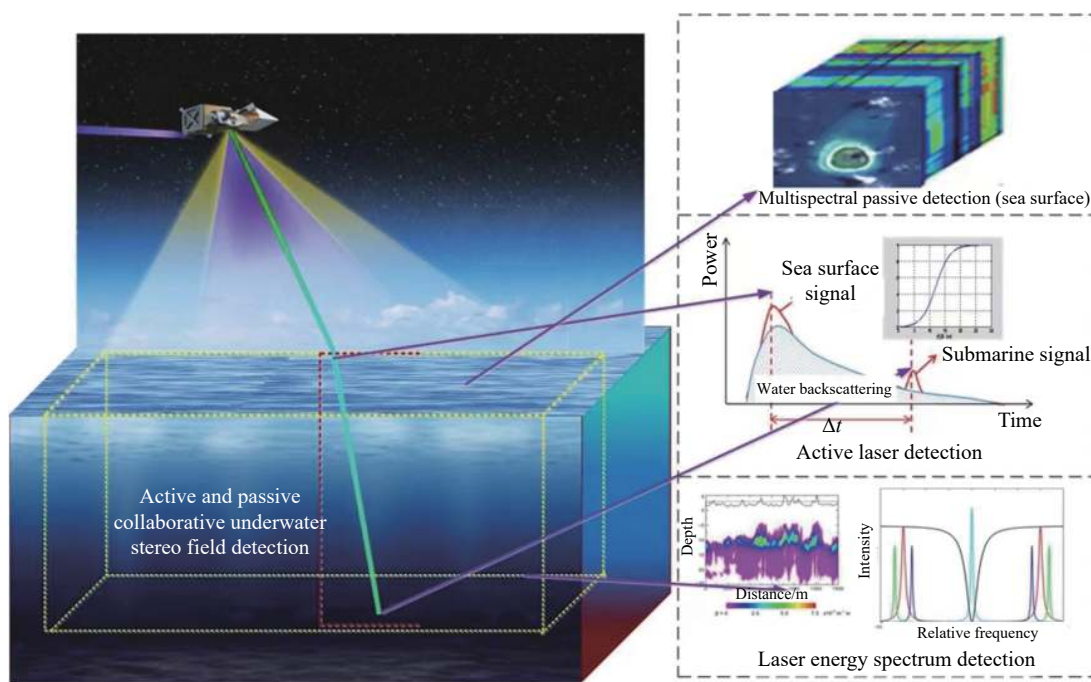


图 1 探测体制示意图

Fig.1 Schematic diagram of detection system

其中被动光谱探测实现广域、高分辨率的海表多要素信息的探测。

激光主动能量探测,实现高精度、大深度的水下地形及海洋光学生物参数剖面信息探测。

激光光谱探测,通过精细光谱测量来提升海洋光学生物参数剖面、温度盐度剖面的反演精度,核心鉴

频系统拟采用费佐干涉仪来实现瑞利米散射与布里渊散射谱的分离。

1.2 探测系统指标仿真分析

星载海洋剖面多要素探测系统指标如表 1 所示,主要功能指标包括海水深度、光学后向散射系数、温度、盐度。

表 1 系统指标参数

Tab.1 System indicator parameters

No.	Category	Target	Application
1	Orbital height	≥ 400 km	Efficient global measurement of ocean parameters
2	Depth of ocean profile	≥ 100 m	Acquisition of underwater topography and profile information of ocean
3	Depth of shore profile	$\geq 4/Kd$	Acquisition of underwater topography and profile information of shore
4	Vertical resolution	≤ 0.5 m	Vertical hierarchical information
5	Backscatter measurement error	$\leq 25\%$	Water quality inversion and monitoring
6	Temperature profile error	≤ 0.5 °C	Global climate projections, air-sea interaction research, marine biology protection
7	Salinity profile error	≤ 1 psu	Aquaculture, sea water chemical industry

1.2.1 发射系统工作波长的选择

综合考虑了大气透过率、地物的反射率、海水透过窗口、制造大功率激光器的技术成熟度和激光接收器件的响应谱段范围等因素,如图 2 所示,激光波长选择 532 nm 和 486 nm 用于探测水体及水底,激光工作物质选用 Nd:YAG。

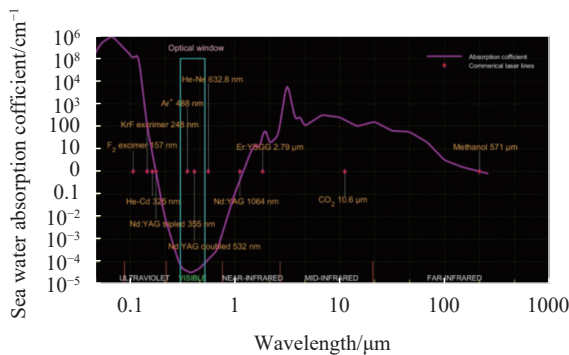


图 2 海水的光学透过窗口与激光工作物质材料的选择

Fig.2 The optical transmittance window of seawater and the selection of laser working materials

1.2.2 激光发散角的足印光斑直径

激光器的发散角在 2~4 mrad,以星载 400 km 轨道高度核算,到达地面的光斑直径约 1000 m。为了实现更远距离探测,光斑能量不宜扩散,根据雷达方

程可知,在激光发射功率和接收口径一定的情况下,需要对激光发散角进行压缩,采用发射望远镜对光束进行准直扩束使发散角压缩到 0.03 mrad,足印光斑直径在 12 m 左右,可以满足探测精度。

1.2.3 激光回波的接收视场

在系统设计时,应根据卫星运行速度、和激光跨越时间对激光发射和接收视场进行匹配设计,如图 3 所示。一般可以采用两种方法:1) 扩大接收视场,覆盖光斑偏离区域。这种方法所需的接收视场较大。

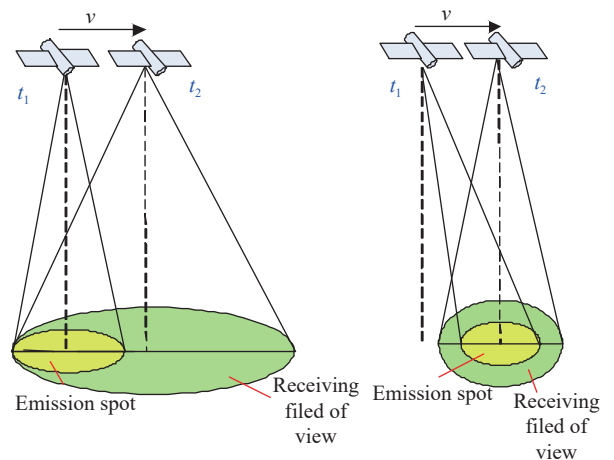
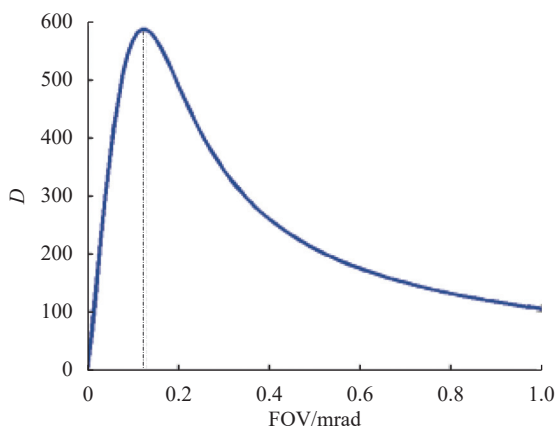


图 3 接收视场角的计算示意图

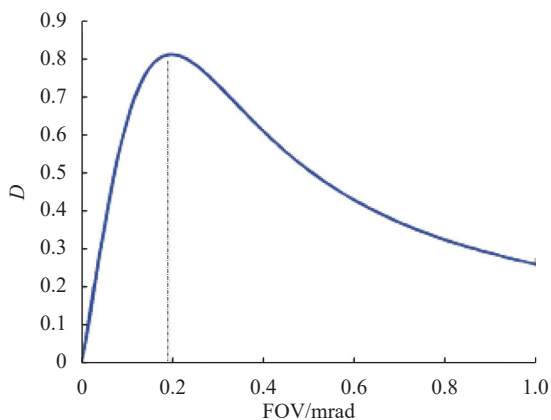
Fig.3 Schematic diagram of receiving FOV calculation

2) 将发射方向设置固定的沿轨方向的向前偏移角度补偿回波滞后接收带来的位移问题。这种方法所需的接收视场较小,但是装调比较困难。本方案按照方式 1) 设计计算。卫星下点飞行速度为 7.24 km/s,激光发射到回波接收共计 2.67 ms,接收系统光轴对应的地面中心位置偏离了激光足印中心位置 19.33 m,另外考虑激光足印尺寸约为 12 m,经过计算,采用增大视场方式,光学接收视场大于 60 μrad 即可。

由于不同水深激光散射信号的扩散情况不同,需要根据水深设置不同的视场大小以满足最佳探测性能,辨别力因子可衡量激光雷达探测的性能^[19],根据辨别力因子估算,水深 0~40 m (浅水) 回波信号的最佳视场角 0.12 mrad,对于水深 40~100 m (深水) 回波信号最佳视场角 0.2 mrad,如图 4 所示。



(a) 浅水 (深度: 40 m)
(a) Shallow water (Depth: 40 m)



(b) 深水 (深度: 100 m)
(b) Deep water (Depth: 100 m)

图 4 基于辨别力因子的最佳视场角

Fig.4 Optimal FOV based on discrimination factor

1.2.4 探测器选型与接收系统焦距

PMT (Photomultiplier Tube) 探测器灵敏度高,探测灵敏度高于 10^{-9} W,像元有效尺寸 8 mm,能量集中度为 90%,接收瞬时视场角 0.6 mrad,系统焦距为 13.3 m。

1.2.5 垂直分辨率

影响激光水下剖面探测垂直分辨率的因素主要包括激光脉宽、回波信号采样频率等。

其中由激光脉宽 τ 引起的距离分辨率为:

$$L_1 = c\tau/2n \quad (1)$$

式中: c 为真空中光速; n 为水体折射率。

回波信号采样频率 f 对应的回波信号采样间隔 t_2 , $t_2=1/f$, 由此引起的距离分辨率为:

$$L_2 = ct_2/2n \quad (2)$$

则垂直分辨率 $L = \max\{L_1, L_2\}$ 。其中激光脉宽取 4 ns,回波信号采样频率设置为 1 GHz。

1.2.6 激光发射功率与接收口径

在 Dolin-Levin 模型中,激光测深回波信号可表示为:

$$P_{bw,bot} = G \frac{P_t A_r (1 - \rho_s)^2 \eta}{(nH + h)^2} \times \exp(-2\tau_a) \exp[-2hK_d] F(m\psi, bh) \quad (3)$$

$$G = \begin{cases} \frac{\rho_b}{\pi}, & \text{for } \rightarrow P_{bot} \\ \frac{\tau c \beta(\pi)}{2n}, & \text{for } \rightarrow P_{bw} \end{cases}$$

式中: P_{bw} 和 P_{bot} 分别代表海水中后向散射回波功率和海底反射信号功率; K_d 为海水漫射衰减系数; P_t 为激光发射功率; A_r 为系统有效接收口径; ρ_s 为海表反射率; η 为系统收发光学效率; H 为载荷与海面的垂直距离; h 为水深; τ_a 为大气消光系数; m 为与水体相关的常数,一般取 6~8; $F(m\psi, bh)$ 取值 0~1 之间,与接收视场角及水体参数相关; ρ_b 为海底反射率; $\beta(\pi)$ 为水体 180° 体积散射系数。在同等接收功率下,当接收口径增加,所需激光发射功率减小,如图 5 所示。国内外星载激光雷达失效均因为激光器失效,激光器失效风险与输出能量正相关,百米级探测深度必须采用中等能量+大口径光学接收方案。该方案采用激光发射能量 35 mJ,光学接收口径 2.5 m,实现百米级深度探测。

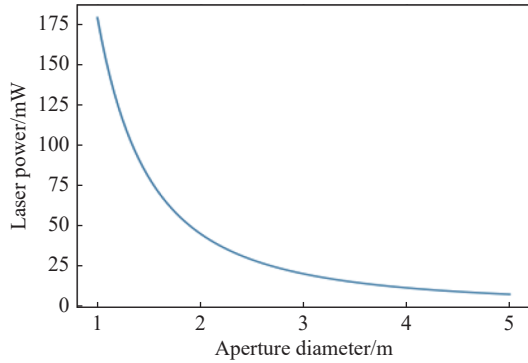


图 5 激光器能量与接收口径关系

Fig.5 The relationship between laser energy and receiving aperture

1.2.7 动态范围

根据不同水质条件下水深与回波功率关系的仿真结果,从图 6 可以看出,从海表到海底回波信号的动态范围约为 5 个数量级,单一探测器难以满足 5 个量级的动态范围,另外,结合上文所述的不同深度回波信号的最佳接收视场不同,因此采用分视场多通道光学系统设计。

532 nm 波段主要用于近海岸水域探测,分为深水通道、浅水通道,测量深度 50 m 以内。486 nm 主要用于大洋水域探测,分为深、浅水通道,测量深度 100 m 以内,如表 2 所示。仿真参数如下:激光发射能量 35 mJ,激光脉宽 4 ns,轨道高度 400 km,接收口径 2.5 m,波长 486 nm/532 nm,大气单程透过率 0.7,收发

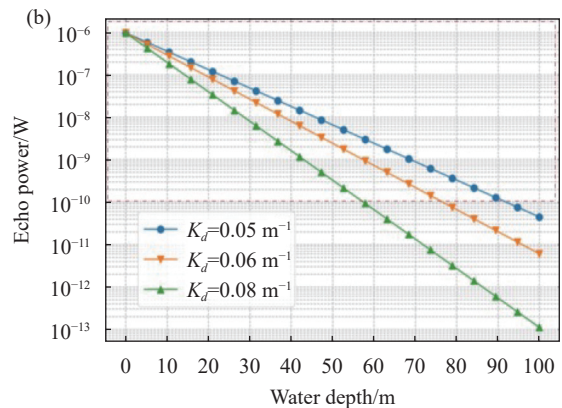
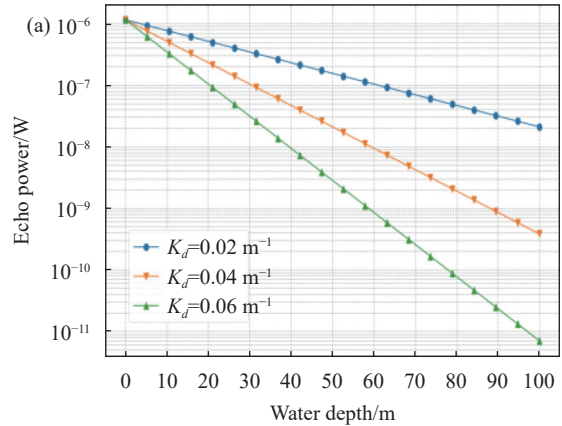


图 6 不同深度回波功率。(a) 波长 486 nm; (b) 波长 532 nm

Fig.6 Echo power at different depths. (a) At 486 nm; (b) At 532 nm

光学效率 0.5, 目标反射率 0.1。

表 2 各通道视场及动态范围设置

Tab.2 FOV and dynamic range settings for each channel

Channel	Wavelength/nm	FOV/urad	Method	Range/W
1	532	120	Shallow water/Linear	1.3×10^{-5} (0 m)
				8.1×10^{-8} W (20 m)
2	532	200	Deep water/Photonic	1.2×10^{-7} (15 m)
				4.4×10^{-10} (50 m)
3	532	120	Laser spectrum/Photonic	3.2×10^{-8} (0 m)
				1.4×10^{-9} (23 m)
4	486	120	Shallow water/Linear	1.4×10^{-6} (0 m)
				1.0×10^{-8} (55 m)
5	486	200	Deep water/Photonic	2.6×10^{-8} (50 m)
				5.2×10^{-10} (100 m)

1.2.8 光谱探测指标

针对温度为 15 °C 盐度为 30‰的水体环境,若温度误差为 0.5 °C,盐度误差为 1 psu 时,需满足布里渊频移不确定度为 8 MHz 布里渊线宽不确定度为 14 MHz,要求激光器线宽小于等于 200 MHz。同时针

对高光谱分辨激光雷达反演后向散射系数,激光器线宽要求 ≤ 200 MHz,频率稳定性 ≤ 500 MHz,该方法可有效分离分子的布里渊散射和粒子的米散射,精确求解激光雷达比,后向散射测量误差优于 25%。

光谱探测温盐反演模型如图 7 所示^[17], PMT 采

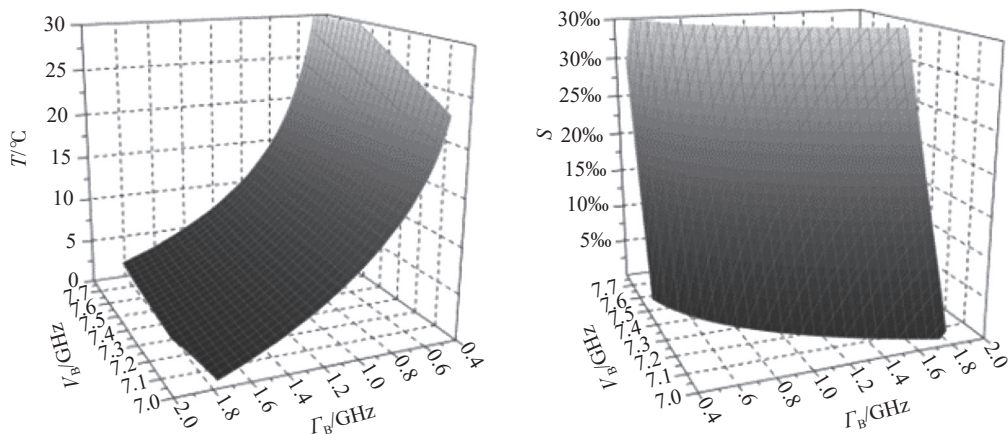


图 7 频移线宽反演温度和盐度

Fig.7 Inversion of temperature and salinity using frequency shift linewidth

用 16 通道, 通过光谱方式得到的温盐反演误差如图 8 所示^[20]。

在满足测量散射光谱信息信噪比大于 35 的情况下, 温度和盐度的测量误差分别为 0.5 °C 和 1‰。

采用 Fizeau 干涉仪加 PMT 阵列的方法, 测量完整水体散射光谱, 如图 9 所示。

采用拟合方法, 去除米散射干扰, 分离出分子散射能量和粒子散射能量计算后向散射系数, 见图 10。

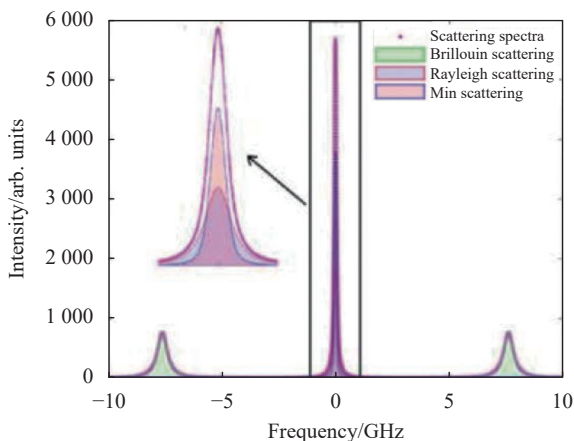


图 9 水体完整散射光谱

Fig.9 Complete scattering spectrum of water column

代入后向散射计算方程, 仿真实验表明后向散射系数与理论值测量误差小于 5%^[21-22], 如图 11 所示。

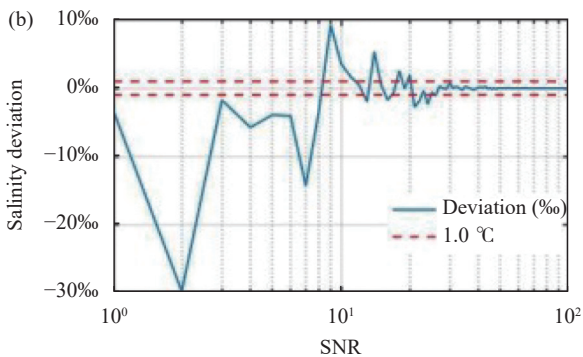
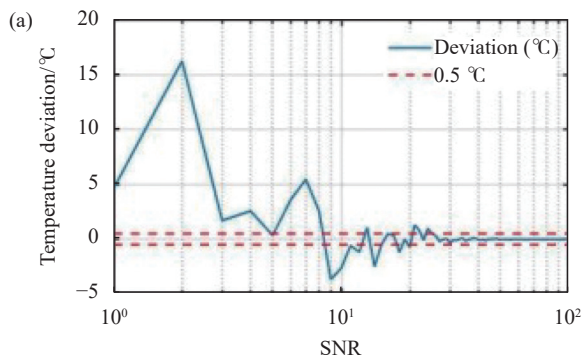


图 8 反演误差。(a) 温度测量误差; (b) 盐度测量误差

Fig.8 Inversion error. (a) Temperature inversion error; (b) Salinity inversion error

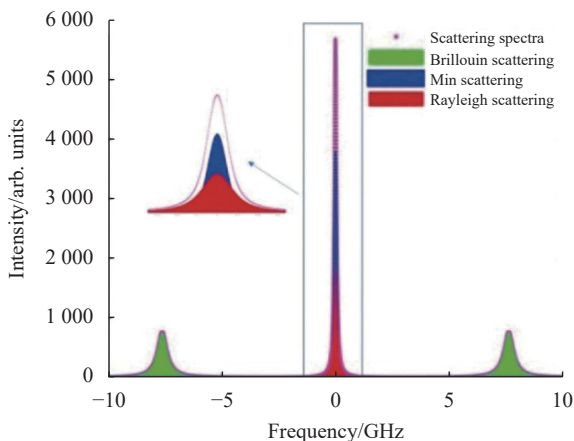


图 10 光谱分离

Fig.10 Spectral separation

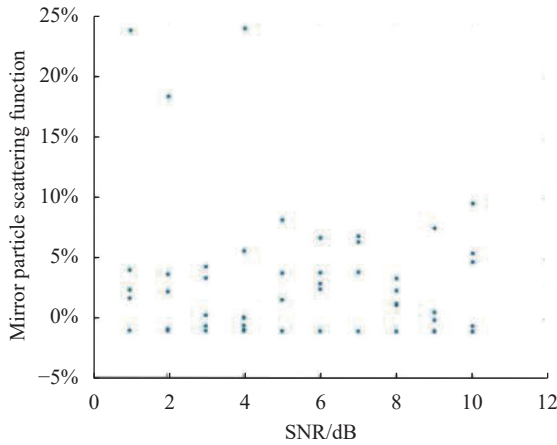


图 11 不同信噪比下粒子散射体函数误差分析

Fig.11 Error analysis of particle scattering function under different SNR

1.3 小结

通过系统指标分解与仿真论证,探测系统要满足星载轨道 400 km,实现大洋海水剖面测量深度不低于 100 m,垂直分辨率优于 0.5 m,后向散射测量误差小于等于 25%,温度剖面误差小于 0.5 °C,盐度剖面误差小于 1 psu,对激光器和光电接收与探测系统提出了明确指标,如表 3 所示。

表 3 系统指标

Tab.3 System indicators

Laser	30 mJ@486 nm
	35 mJ@532 nm
	4 ns
	Emission FOV ≤ 0.03 mrad
Photoelectric receiving and detecting system	Linewidth ≤ 200 MHz@532 nm
	Detection sensitivity ≤ 100 pW
	Optical efficiency 0.5
	532 nm: shallow channel 1, deep channel 2, spectrum channel 3; 486 nm: shallow channel 4, deep channel 5
	Diameter 2.5 m
Performance	Orbital height 400 km
	Depth of ocean profile ≥ 100 m
	Depth of shore profile ≥ 4/Kd
	Vertical resolution ≤ 0.5 m
	Backscatter measurement error ≤ 25%
	Temperature profile error ≤ 0.5 °C
	Salinity profile error ≤ 1 psu

2 基于主动复合-能谱复用的海洋剖面多要素探测技术方案

2.1 星载工作模式

星载近海岸海洋剖面多要素探测载荷,具备多光谱影像、激光能量与光谱探测三种功能,系统包括激光发射机、接收机、光轴监测机、综合管理控制器、数传系统和数管及供电系统。其中,接收机包括激光通道和可见光通道,激光通道包括能量探测和光谱探测。各分系统通过 1553 总线进行遥测遥控等管理,通过 LVDS(Low Voltage Differential Signaling) 总线进行图像数据及辅助数据的传输,如图 12 所示。

探测载荷系统包括被动多光谱相机以及主动激光剖面探测系统两部分,如图 13 所示。其中被动多光谱相机与主动激光雷达布局沿轨方向有一定夹角,大约在 0.1°,考虑 400 km 轨道高度,获取的被动影像与激光点间隔 700 m。被动多光谱载荷利用多通道滤光片与面阵探测器结合,通过单波段的线阵推扫模式结合 TDI 技术,获取海洋表层水柱积分信息。该项技术成熟成功应用于海洋系列卫星载荷,文中后续不再描述。

2.2 技术方案

2.2.1 发射机方案

该系统采用单频种子振荡器+板条功率放大器结构(MOPA)实现。首先通过单频 Nd:YAG 调 Q 种子振荡器技术,实现窄脉宽的单频 50 mJ@1064 nm 调 Q 激光输出。再采用侧面泵浦的 zigzag 板条放大器,实现 >1.2 J@1064 nm 激光能量放大输出,光光转换效率达到 35% 以上。利用 I 类非临界相位匹配 LBO 和 II 类临界相位匹配 LBO 分别实现倍频 532 nm 绿光与和频 355 nm 紫外光输出;再利用 355 nm 泵浦 BBO 晶体,搭建光参量振荡器,实现 486 nm 蓝光输出。

2.2.2 光学接收系统方案

激光探测属于特定波长窄波段、窄视场的能量探测,对于波前要求不高,可以采用超薄平板基底上的微浮雕结构对入射光线进行衍射变换实现会聚,面密度低、易加工、可量产、易扩展、成本低,因此该方案采用衍射光栅作为主镜接收,实现微弱信号收集。该项目采用超大口径平面光栅(1 m×5 m 等效 2.5 m 口

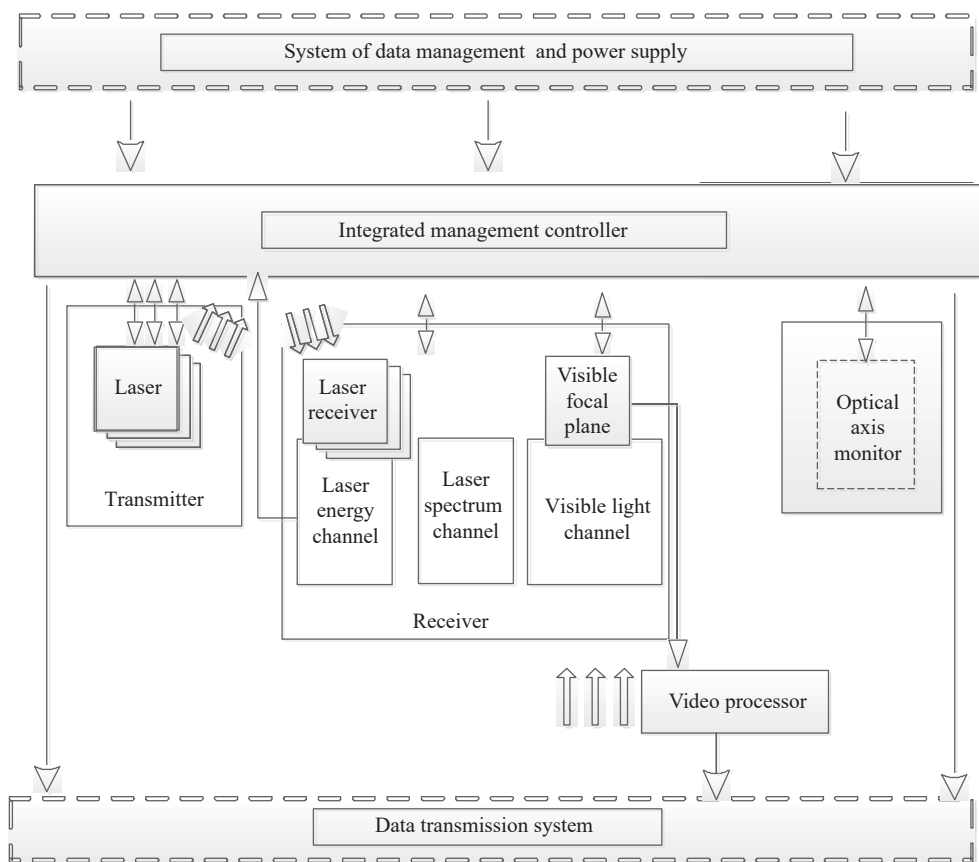


图 12 系统组成框图

Fig.12 System composition diagram

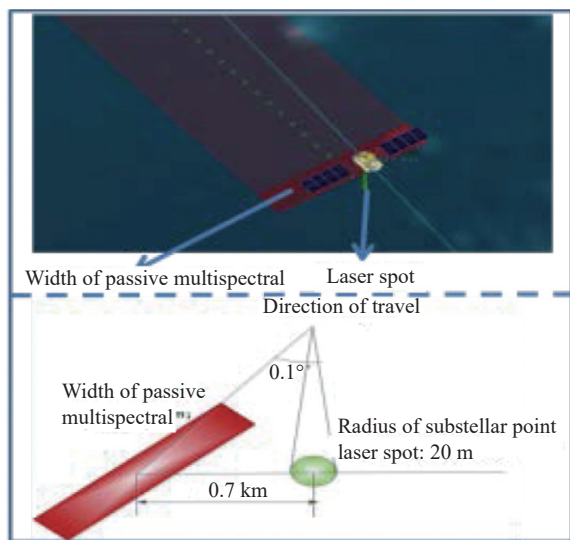


图 13 探测系统工作示意图

Fig.13 Schematic diagram of detection system operation

测以及激光光谱探测,通道 4 和 5 为两个 486 nm 通道实现大洋水体大深度剖面探测,通过分视场+分通道方式实现超大动态范围多波长同步高灵敏探测,光学系统设计图如图 14 所示。系统由光栅主镜、离轴三反系统和分光探测系统三部分组成。

其中,光栅主镜将 5 m 口径的光线进行压缩,经过离轴三反系统形成一次像由分光镜等分光元件最终完成 5 个通道的探测,各通道的能量集中度达到 90%,口径压缩比达到 5 : 1,如图 15 所示。

光栅主镜采用率反射式立轴聚焦全息闪耀光栅形式,利用非球面波与平行光束全息干涉曝光得到光栅线条二维分布,通过不同槽型与线密度的分区设计满足对光的偏折与聚焦功能,将光线聚焦于离轴三反主镜镜面上,如图 16 所示。经过仿真分析,光栅 5 个区域的具体参数如表 4 所示,以入射角度为 3°为前提,合理设置激光器的位置,保证对地出射角度为 3°,保证发射与接收的光线方向一致,同时水下回波接收角度最大为±0.006°,根据三维光栅方程:

径)、长焦距离轴三反主光学系统,实现系统口径大幅压缩(主反射镜尺寸仅 0.6 m×0.9 m);通道 1~3 为 3 个 532 nm 通道可以实现多种水体的大动态范围信号探

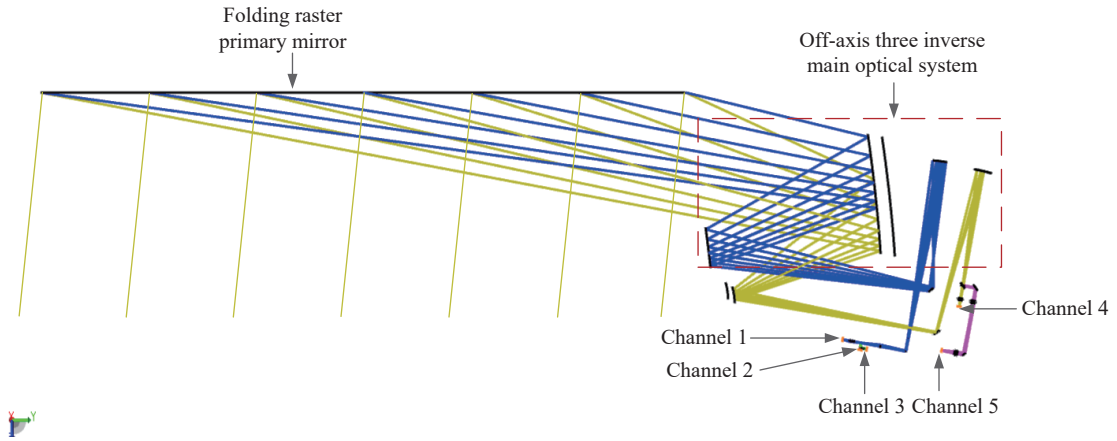


图 14 光学系统设计图

Fig.14 Optical system design drawing

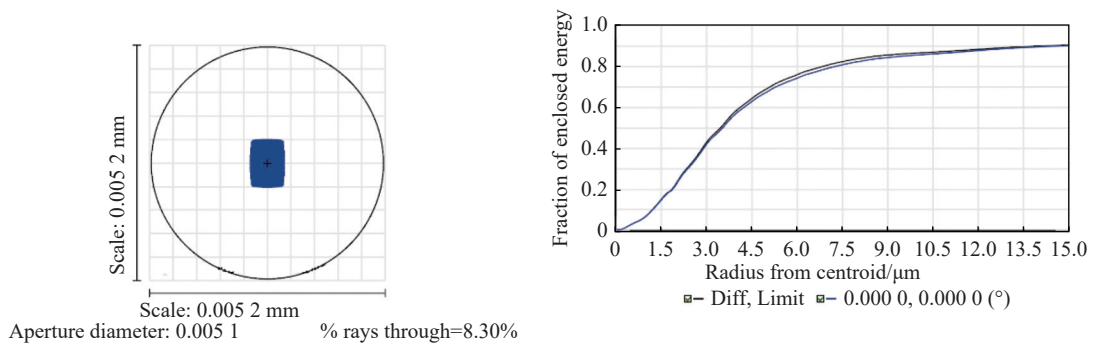


图 15 典型通道的能量集中度

Fig.15 Energy concentration ratio of typical channel

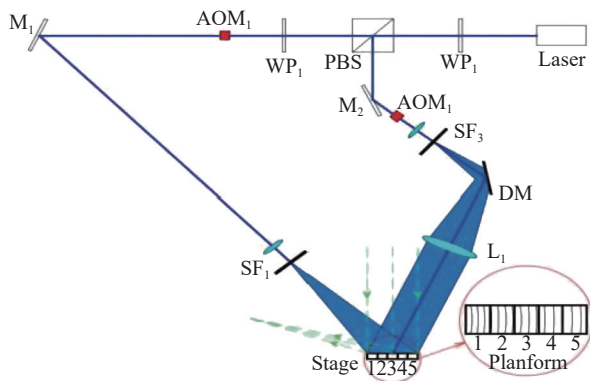


图 16 光栅加工示意图

Fig.16 Schematic diagram of grating processing

$$n^{(\pm 1)} \sin \theta_m^{(\pm 1)} \cos \phi_m^{(\pm 1)} = n^{(\pm 1)} \sin \theta \cos \phi + m \frac{\lambda}{d} n^{(\pm 1)}$$

$$\sin \theta_m^{(\pm 1)} \sin \phi_m = n^{(\pm 1)} \sin \theta \cos \phi$$

计算可得 486 nm 的衍射角为 70°~70.012°, 532 nm 的衍射角为 80°~80.017°, 该角度的出射光均可被离轴三反光学系统主镜接收。

表 4 光栅设计参数

Tab.4 Grating design parameters

No.	Grating groove/(°)	Density
1	20-24	1330-1611
2	25-28	1611-1727
3	29-31	1727-1783
4	32-33	1783-1813
5	34-35	1813-1831

2.2.3 光谱探测系统方案

大动态散射信号高灵敏光电集成探测光谱探测方案如图 17 所示, 回波信号通过望远镜进行接收。接收到的回波信号分成两个通道检测。其中一个通道用于光谱检测, 另外一个用于回波能量探测。对于光谱检测通道, 回波信号光经过滤光片滤除 486 nm 的散射光, 其余的 532 nm 产生的后向散射光通过偏

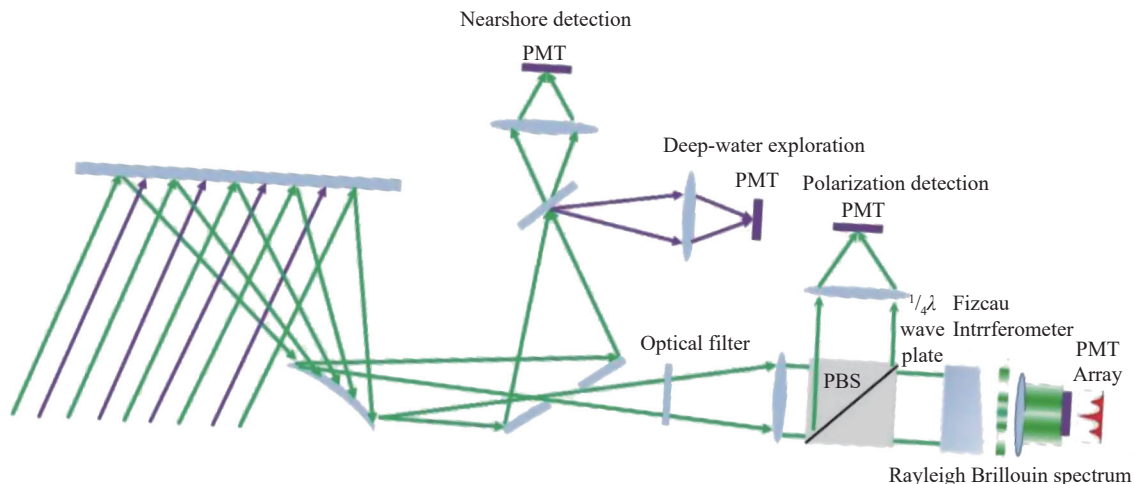


图 17 大动态散射信号高灵敏光电集成探测光谱探测方案示意图

Fig.17 Schematic diagram of a highly sensitive optoelectronic integrated detection spectral detection scheme for large dynamic scattering signals

振分光晶体, 反射的偏振光被 PMT 阵列接收, 另一部偏振光通过斐索干涉仪 (FI)。在多光束干涉原理下, 不同频率的光在 FI 后在空间中扩展, 并在光束整形后形成连续的 RB 散射光谱, 并精确分布在多通道 PMT 上。然后通过多通道 PMT 对连续光谱进行量化, 并获得离散的 RB 散射光谱。能量通道中回波信号通过二向色镜分别被两个 PMT 接收。

2.2.4 探测系统结构设计

光栅主镜采用厚度 5 mm 的 ULE(零膨胀玻璃) 材料, 主镜组件轻量化程度高, 主镜径厚比达到了 200 : 1, 整机采用采用轻量化设计理念, 在保证系统稳定性和刚度条件下, 基于桁架结构设计及拓扑优化, 降低系统体积密度, 为了保证发射包络满足要求降低发射成本, 发射阶段光栅处于折叠收拢状态, 光栅折叠后的体积包络 2200 mm×1800 mm×1030 mm, 相当于 1 m 口径相机发射包络尺寸, 经过估算系统质量约 685 kg, 如图 18 所示。

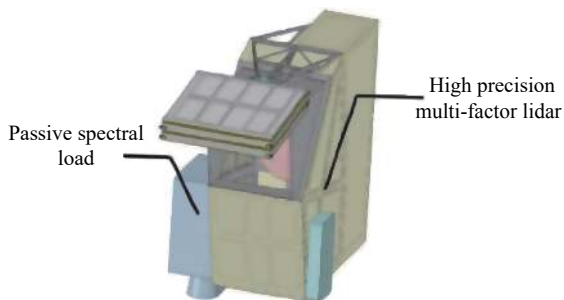


图 18 探测系统结构图

Fig.18 Detection system structure diagram

2.2.5 折叠光栅在轨调整方案

考虑光栅加工的尺寸限制以及光栅折叠与展开后调整的稳定性, 采用 5 片的 1 m 拼接光栅拼接方案。初步分析系统的误差来源, 由于激光剖面采集能量系统对像质等要求较低, 因此, 加工与装调过程精度均可达到波长量级满足要求, 主要的精度影响因素源于光栅分块镜的拼接过程, 即相对于理想光栅平面位置的移动与转动角度误差, 如图 19 所示。经过分析, 理想情况下光斑直径为 4 mm, 光栅角度的转动和平移会导致能量的分散, 光斑会不规则的扩大。根据入射波长、入射角、光栅常数、离轴三反可接受的视场角以及光栅主镜和离轴三反主镜的相对位置关系,

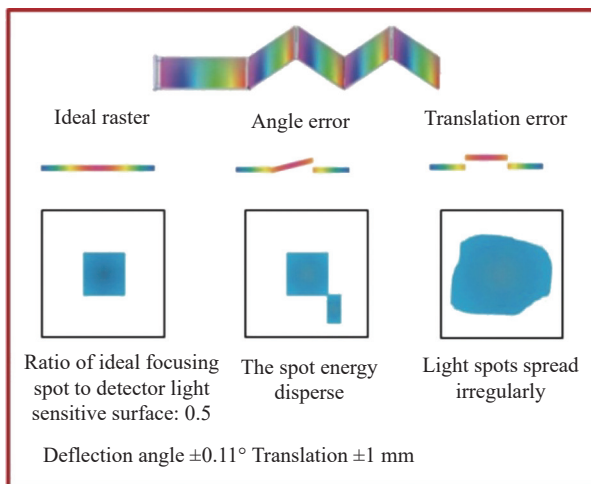


图 19 分块光栅角度及平移误差量分析示意图

Fig.19 Schematic diagram for analyzing the angle and translation error of segmented gratings

光栅转动角度小于 $\pm 0.11^\circ$ 或平移量小于 ± 1 mm 时分散的能量仍可以达到探测器靶面上,即光栅能量探测系统具备一定的容差范围。

光栅展开利用铰链机构采用主动展开方案,其中平面控制精度约为 2 mm,角度控制精度约为 0.02° ,结合光栅能量探测的容差范围,采用分级调控的方式,每片光栅 4 个角上分别布放多自由度制动器,用

于调整位置移动和角度引起的初级误差,然后利用次镜后布放的六自由度调整机构结合变形镜进行光斑精细调整,保证聚焦光斑的尺寸与质量,整个系统利用四象限探测器的能量探测系统进行监控和反馈,并接入控制闭环系统,为实现在轨长期稳定运行创造有利条件,如图 20 所示。

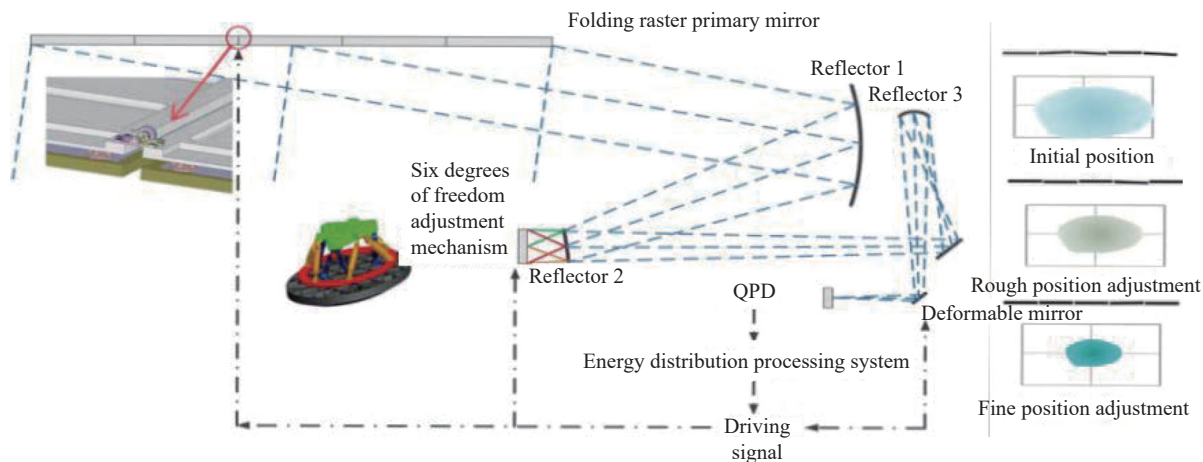


图 20 在轨展开与调整示意图

Fig.20 On orbit deployment and adjustment diagram

3 结 论

文中面向百米级海洋剖面探测需求,创新性地提出了主被动复合探测,激光能量与光谱同步探测体制方案,开展星载主动激光剖面探测系统的指标论证与详细方案设计,针对光栅的折叠展开进行了误差分析并形成了在轨调整方案,在 1 m 口径相机的发射包络下实现了等效 2.5 m 大口径探测能量的多功能光电接收与探测系统方案。

参考文献:

[1] Zhao L L, Chang W G, Gao L, et al. Feasibility study of extending multispectral depth retrieving model to sea area without in-situ data: A case study of North Island and Robert island [J]. *China Sciencepaper*, 2021, 16(5): 542-548. (in Chinese)

[2] Liu S, Wang L, Liu Hu X, et al. Deriving bathymetry from optical images with a localized neural network algorithm [J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2018, 56(9): 5334-5342.

[3] Lee Z, Carder K L, Mobley C D, et al. Hyper-spectral remote sensing for shallow waters 2 deriving bottom depths and water properties by optimization [J]. *Applied Optics*, 1999, 38(18): 3831-3843.

[4] Huang R, Yu K, Wang Y, et al. Bathymetry of the coral reefs of Weizhou island based on multispectral satellite images [J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(7): 750-775.

[5] Su H, Liu H, Wu Q. Prediction of water depth from multispectral satellite imagery-the regression kriging alternative [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2015, 12(2): 2511-2515.

[6] Wang Y, Xu X, Tan Y. Laser precision ranging technology [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2021, 42(6): 22-33. (in Chinese)

[7] Xu C, Zhou F. Development and applications of space-borne laser remote sensing technology [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2009, 30(4): 26-31. (in Chinese)

[8] Pan D, Lin S, Li S, et al. The application of watercolor remote sensing in General Management of Coast Zone [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2001, 22(2): 34-39. (in Chinese)

[9] Xu Haipen. Bathymetry inversion based on semi-empirical

- model and error analysis of different water depth ranges [J]. *Coastal Engineering*, 2014, 33(1): 19-25. (in Chinese)
- [10] Rodier S, Zhai P, Josset D, et al. CALIPSO lidar measurements for ocean sub-surface studies[C]//34th International Symposium on Remote Sensing of Environment, 2011.
- [11] James H. Churnside, Brandi J, et al. Subsurface ocean signals from an orbiting polarization lidar [J]. *Remote Sensing*, 2013, 5(7): 3457-3475.
- [12] Zhang W, Xu N, Ma Y, et al. A maximum bathymetric depth model to simulate satellite photon-counting lidar performance [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2021, 174: 182-197.
- [13] Hsu H J, Huang C Y, Jasinski M, et al. A semi-empirical scheme for bathymetric mapping in shallow water by ICESat-2 and Sentinel-2: A case study in the South China Sea [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2021, 178: 1-19.
- [14] Ma Y, Xu N, Liu Z, et al. Satellite-derived bathymetry using the ICESat-2 lidar and Sentinel-2 imagery datasets [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 250: 112047.
- [15] Chen Yifu, Zhu Zhen, Le Yuan, et al. Refraction correction and coordinate displacement compensation in nearshore bathymetry using ICESat-2 lidar data and remote-sensing [J]. *Opt Express*, 2021, 29(2): 2411-2430.
- [16] Xu N, Ma Y, Yang J, et al. Deriving tidal flat topography using ICESat-2 laser altimetry and Sentinel-2 imagery [J]. *Geophysical Research Letters*, 2022, 49(2): e2021GL096813.
- [17] Ebuchi N, Abe H. Evaluation of sea surface salinity observed by Aquarius[C]//2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Munich: IEEE, 2012, 5767-5769.
- [18] Yuki A, Motohiko M, Yasuo O, et al. Sound velocity measurement in liquid water up to 25 GPa and 900 K: Implications for densities of water at lower mantle conditions [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2010, 289: 479-485.
- [19] Feigl V I, Kopilevich Y I. Russian airborne lidar systems: Comparative analysis and new ideas[C]//SPIE, 1999, 3761, 129-147.
- [20] Liang K, Zhang R, Sun Q, et al. Brillouin shift and linewidth measurement based on double-edge detection technology in seawater [J]. *Applied Physics B*, 2020, 126: 1-9.
- [21] Wang Y, Xu Y, Chen P, et al. Remote sensing of seawater temperature and salinity profiles by the Brillouin lidar based on a Fizeau interferometer and multichannel photomultiplier tube [J]. *Sensors*, 2022, 23(1): 446.
- [22] Zhou Y. Research on oceanic lidar for detecting water optical properties [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020. (in Chinese)

Research on multi-element detection technology and system for spaceborne ocean profile

Sun Qian^{1,2}, Shen Zhenmin^{1,2}, Yang Song^{1,2}, Wang Zihao^{1,2}, Wang Yuanqing³, Liang Kun³, Shang Weidong^{1,2}, Wang Peipei^{1,2}, Yu Yue^{1,2}, Zhao Hao^{1,2}, Lv Hong^{1,2}, Liu Zhengkun⁴, Zheng Yongchao^{1,2}

(1. Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China;

2. Key Laboratory for Space Laser Information Perception Technology, China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China;

3. School of Electronic Information and Communications, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

4. National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230029, China)

Abstract:

Objective The development of marine ecology, marine science, and marine economy is inseparable from marine observation data, and the requirements for marine data have developed from sea surface data to ocean profile data. Ocean profiling is an important basis and means to study the three-dimensional profile distribution of global ocean optical and biological parameters, as well as ocean carbon and energy cycles. At present, ocean profile elements (temperature, salinity, optical parameters, etc.) mainly rely on in-situ detection and airborne detection, and the lack of global-scale, high-efficiency, and high-precision remote sensing observation methods has become a bottleneck problem for comprehensive understanding and fine perception of the ocean. At present,

the traditional multi-payload cooperative observation or satellite-ground linkage observation mode can obtain multi-element information in time and region, but the integrated detection of temperature, salinity and depth in the ocean profile is still blank, and the inversion of non-homologous, non-homogeneous and non-simultaneous detection data of underwater optical biological parameters and physicochemical parameters is consistent and accurate, which cannot effectively obtain the three-dimensional structure of the ocean to meet the needs of scientific research.

Methods An active and passive composite optical remote sensing system for multi-element detection of ocean profile is proposed, as shown in Figure 1. Based on the lidar equation calculation, the application indicators of the decomposition system, such as depth, backscatter measurement error, temperature, salinity error, etc., are calculated and calculated, and the energy, line width, optical system aperture, focal length, field of view, detector selection of the optical system of photoelectric reception and detection are confirmed through simulation analysis and calculation, as shown in Table 3. The grating primary mirror realizes the compression of light, and the diameter-thickness ratio of ULE material is 200 : 1 to realize the lightweight of the system. According to the incident wavelength, incident angle, grating constant, the acceptable field of view angle of the off-axis three-mirror and the relative position of the grating primary mirror and the off-axis three-mirror primary mirror, the on-orbit deployment accuracy requirements were analyzed. The optical system ensures that the field of view, transmittance and energy concentration of each channel are more than 90% through simulation design, so as to ensure that the core components meet the system demonstration indicators.

Results and Discussions The design of the multi-element detection payload system for the spaceborne ocean profile is completed. The laser spectral band is designed as the optimal ratio output of 486 nm and 532 nm multi-wavelength integration, and the photoelectric receiving and detection system selects 1m×5m super-large aperture foldable grating primary mirror, and after simulation analysis, the detection system can realize the homology detection ability of multiple elements such as ocean depth of 100 m, temperature, salinity and backscattering coefficient, and the ability collection capacity is increased by 5 times under the same volume envelope condition. The detection system can achieve a spaceborne orbit of 400 km, a measurement depth of ocean water profile of not less than 100 m, a vertical resolution of better than 0.5 m, a backscatter measurement error of less than or equal to 25%, a temperature profile error of less than 0.5 °C, and a salinity profile error of less than 1 psu.

Conclusions Based on the requirements of the multi-element detection task of the ocean profile, through the analysis and demonstration of the system indicators, a new type of spaceborne near-shore profile multi-element detection technology scheme was proposed, which adopted active and passive composite detection, the laser energy and the spectral synchronous detection system were integrated, the ultra-large aperture foldable optical primary mirror was used to ensure the efficient collection of weak underwater signals, and the laser spectral channel was used to obtain all elastic and inelastic scattering spectra, and the scattering signals of molecules and particles in water were identified and decoupled with high precision. In this way, a more accurate backscattering coefficient of LiDAR can be obtained, which has the ability to detect multiple elements such as underwater temperature, salinity, depth, and optical backscattering coefficient, and the data has good same-origin and same-domain simultaneity.

Key words: lidar; ocean profile detection; active and passive composite; large aperture grating

Funding projects: National Natural Science Foundation of China (62105240, 62075159); National Key Research and Development Program of China (2019YFB2203002)