文章编号:1001-9014(XXXX)XX-0001-08

DOI:10. 11972/j. issn. 1001-9014. XXXX. XX. 001

基于偏振激光雷达分层反演海洋漫射衰减系数

雷子昂,杨颂,沈振民,李同,王子豪,张睿哲,张景豪,郑永超* (北京空间机电研究所,北京 100094)

摘要:漫射衰减系数 K_a 是海洋光学中的核心参数之一,是由海水本身的光学性质和海水中的环境光场共同决定的 表观光学参数,与海水水质和叶绿素浓度等密切相关。作为主动遥感手段,海洋偏振激光雷达发射能够穿透海水 的蓝绿波段光源,具备全天时探测能力,这对于探测海洋 K_a 的剖面分布具有独特的优势。基于激光雷达的主动遥 感手段,采用双偏振通道信号作为数据源,其中垂直偏振通道可用于抑制海表信号来增强近岸的海洋剖面后向散 射信号,结合Fernald后向迭代法和斜率法,提出了一种分层反演海洋剖面漫射衰减系数 K_a 的方法。黄东海海域作 为实验区域,将海洋激光雷达设备部署在海上实验平台,以10m水深作为分层算法的实验验证。实验结果显示,双 偏振通道信号在海表处的偏振度为0.479,以1m作为垂直分辨率,双偏振通道分层反演海洋剖面 K_a 结果与实际原 位测量数据的均方根误差为0.049,与非偏振通道信号相比,精度提升了52.4%;分层反演算法与传统Fernald算法 相比,精度提升了32.4%。

关键 词:海洋光学;激光雷达;偏振;漫射衰减系数;反演算法
 中图分类号:0436
 文献标识码:A

Layered Inversion of Ocean Diffuse Attenuation Coefficient Based on Polarization Lidar

LEI Zi-ang, YANG Song, SHEN Zheng-Ming, LI Tong, WANG Zi-Hao, ZHANG Rui-Zhe, ZHANG Jing-Hao, ZHENG Yong-Chao*

(Beijing Institute of Space Mechanical and Electrical Engineering, Beijing 100094)

Abstract: The diffuse attenuation coefficient (Kd) is a crucial parameter in ocean optics, representing an apparent optical property influenced by the inherent optical characteristics of seawater and the surrounding light field. It is closely related to factors such as seawater quality and chlorophyll concentration. As an active remote sensing instrument, marine polarized lidar emits light in the blue-green wavelength band capable of penetrating seawater, offering all-weather detection potential, and possesses a distinct edge in mapping the vertical distribution of Kd within the ocean. By combining Fernald's backward iteration and slope approaches, this study proposed a layered inversion method for oceanic profile Kd estimation, utilizing dual-polarization channel signals. The vertical polarization channel is specifically used to suppress surface signals and enhance near-shore oceanic backscatter. Conducted in the Yellow and East China Seas, the ocean lidar was mounted on a marine experimental platform, with a 10-meter water depth used to validate the stratification algorithm. Results show a polarization degree of 0. 479 at the sea surface for the dual-polarization channel signal. With a vertical resolution of 1 meter, the stratified inversion of the oceanic profile Kd using dual-polarization channels yields a root mean square error of 0. 049 compared to actual in-situ measurements, representing a 52. 4% improvement in accuracy over non-polarized channel signals. Additionally, the layered inversion algorithm outperforms the tradition- al Fernald algorithm, demonstrating a 32. 4% improvement in precision.

Key words: Ocean optics, Lidar, Polarization, Diffuse attenuation coefficient, Inversion algorithm PACS:

基金项目:国家自然科学基金(62175072),民用航天技术预先研究项目(D040107)

*通讯作者(Corresponding author):邮箱(Corresponding author):laser0371@163.com

Foundation items: Supported by the National Natural Science Foundation of China (62175072), Supported by Civil Space Technology Pre-Research Project (D040107)

作者简介(Biography):雷子昂(1997-),男,湖南长沙人,博士研究生,主要研究领域为海洋激光雷达,E-mail: 2263930388@ qq. com

0 引言

海洋光学参数是描述海洋水体的光学性质以 及光与海水相互作用产生的环境光场,光学参数可 以分为固有光学量(Inherent Optical Properties, IOP) 和表观光学量(Apparent Optical Properties, AOP)。 漫射衰减系数K_a作为一种AOP,描述了由光谱下行 平面辐照度随深度呈指数衰减的现象^[1-2]。海水中 的K_a值不仅与海水中的吸收系数、光束衰减系数等 IOP紧密相关,还与浮游植物含量和叶绿素浓度等 生物光学特性有直接的联系,从而架起了生物学与 光学的桥梁。凭借这些特性,漫射衰减系数K_a成为 利用光学手段探测海洋表层或是次表层信息的重 要指标^[3-4]。

传统的K_a探测方法主要包括原位船载测量和 水色遥感技术。原位船载测量虽然具有高精度的 优点,能够通过压力计辅助探测不同海水深度下的 K_a,但是受限于船载平台的走航效率,难以实现对全 球海域的探测。水色遥感技术是将测量仪器搭载 在卫星平台上^[5-7],可以实现全球范围内的探测,是 主要的遥感海洋光学参数的观测手段,但是信号光 源依赖太阳光的反射,对海洋剖面的K_a探测能力有 限。激光雷达作为一种主动的遥感手段,发射的蓝 绿激光能够穿透海表,获取海洋剖面的相关信息, 为海洋立体观测遥感手段提供有效补充^[8-10]。

海洋激光雷达反演KI的主要算法有斜率法和 Fernald后向迭代法,两种算法最初是应用于大气激 光雷达的探测,后来经海洋激光雷达方程修正后适 用于反演海水的漫射衰减系数K_a。1994年, Mobley 等人综述了光在水体中的辐射传输特性以及用于 计算光学参数的数值方法,其中就提出了用大气激 光雷达方程中的斜率法反演海洋光学参数^[11]。斜 率法通过简化海洋激光雷达方程,假设海水为均匀 水体,对对数的回波信号曲线斜率计算K_a,但是该 方法局限在于只适用于的均匀水体的反演。2019 年,浙江大学刘志鹏使用Fernald法反演研究漫射衰 减系数K,,以原位测量数据为基准寻找最佳激光雷 达比[12-13]。2021年上海光学精密机械研究所李凯鹏 基于海洋激光雷达486nm通道数据,使用反演算法 分析了南海海域的次表面层叶绿素散射层^[14]。Fernald后向迭代法通过综合考虑了海水分子和海水中 颗粒物对光的散射和吸收作用,从某一标定深度开 始后向迭代反演K_a,其精度受限于所假设的激光雷 达比。由于海洋激光雷达对于浅海海域剖面 K_a的 反演算法存在一定程度上的误差,因此在接收端使 用双偏振通道来获取剖面散射信息可以为反演算 法提供更多的信号补充,提升反演精度。

海洋激光雷达接收的双偏振信号分别为平行 偏振信号和垂直偏振信号。平行偏振通道接收与 激光发射偏振状态相同的海洋回波信号,其中包括 海表的反射信号、海水散射信号和海底反射信号。 垂直偏振通道接收于激光发射偏振方向垂直的海 洋回波信号,可以抑制海表散射信号的接收强度, 从而增强了海水散射信号。由于海水中悬浮物颗 粒物分子在与激光相互作用时会改变激光的偏振 态,因此垂直偏振通道中的接收信号能够丰富所需 要的海水剖面中的散射信号[15-19]。自研的激光雷达 系统中,激光器在发射端以最佳角度入射,该角度 的垂直偏振通道所接收海表信号为最低强度,同时 测量不同偏振态的回波信号,从而为海洋剖面提供 更全面的信息。本研究基于双偏振通道信号,结合 Fernald 后向迭代法和斜率法的基本思想,提出一种 分层反演海洋漫射衰减系数的方法。采用1米作为 海水垂直分辨率,分层反演了水深10米的海洋剖面 的漫射衰减系数K,用于验证实验效果。此外,本研 究还讨论了在不同偏振通道情况下的分层反演结 果,以及不同反演方法下的精度分析。

1 激光雷达反演 K_d方法

1.1 激光雷达方程及反演算法

激光经发射系统准直后发射至海洋,在此过程 中,激光将经历大气介质的辐射传输、海洋表面的 反射与折射,海水介质内的辐射传输等多个物理过 程。这一系列大气至海洋的能量辐射传输现象,均 由海洋激光雷达方程所描述^[20-22]:

$$P(z,\lambda) = \frac{A(\beta^{\pi}(z,\lambda))\exp\left[-2\int_{0}^{1} (\alpha(z')) dz'\right]}{(nH+z)^2} \quad (1)$$

式中,*P*(*z*, *λ*)是海洋剖面回波功率强度,A为激光雷 达常数,*β*^π(*z*, *λ*)是180°后向体散射系数,*α*(*z*)表示 海洋剖面的衰减系数,n为海水折射率,H是探测器 离海平面高度,z代表距离海表的水下深度,λ表示 入射海水的激光波长。在激光与海水相互作用过 程中,海水分子和颗粒物对激光产生的后向散射和 吸收是造成回波能量损耗的主要因素。180°后向体 散射系数量化了激光在海水中发生的后向散射效 应。衰减系数则描述了激光在海水中传输时能量 的衰减情况。由于原位测量仪器在直接测定衰减 系数等固有光学参数时存在一定困难,因此通常使 用漫射衰减系数 K_a来表征这一衰减过程。对于激 光雷达系统,大视场的接收系统的漫射衰减系数 K_a 近似等于衰减系数α(z,λ)^[23-25]:

$$K_d(z,\lambda) \approx \alpha(z,\lambda)$$
 (2)

此外,漫射衰减系数 K_a与浮游植物含量和叶绿 素浓度等紧密相关,它为生物学和光学领域之间搭 建了一座桥梁。在海洋激光雷达方程的基础上,反 演 K_a的基本算法之一是斜率法。斜率法的基本理 念是将海水视作均匀介质,假设后向散射系数在垂 直深度上保持不变,据此推导出 K_a与信号强度随探

$$K_d(z,\lambda) = -\frac{1}{2} \frac{dS(z,\lambda)}{dz}$$
(3)

式中, $S(z, \lambda) = \ln((nH + z)^2 \times P(z, \lambda))$ 。鉴于海洋 水体的高度不均匀性,斜率法仅适用于对特定距离 处的 K_a 进行标定,无法准确描述整个海洋剖面中的 K_a 随深度的变化情况。

Fernald后向迭代法是主流的反演技术,该方法 基于海洋激光雷达方程,同时考虑了海水分子和海 水悬浮物颗粒的散射和衰减效应,引入了激光雷达 比的概念,并建立了一套稳定的后向迭代算法^[11]:

$$\alpha_{p}(I-1) + \frac{S_{p}}{S_{w}}\alpha_{w}(I-1) = \frac{X(I-1)\exp(+K(I-1,I))}{\frac{X(I)}{\alpha_{p}(I) + \frac{S_{p}}{S}\alpha_{w}(I)} + [X(I) + X(I-1)\exp(+K(I-1,I))]\Delta Z}$$
(4)

式中 $X(z) = P(z)(nH + z)^2$ 表示经过距离校正后的 回波信号,S_n,S_w分别表示水体悬浮物激光雷达比和 海水分子激光雷达比,z_为选择标定值所在的深度, $\alpha_{p}(z_{m})$ 和 $\alpha_{w}(z_{m})$ 为深度 z_{m} 处的海水悬浮物颗粒和海 水分子的衰减系数。 $K(I - 1, I) = (S_w - S_P)(\beta_w^{\pi}(I) +$ $\beta_{x}(I+1))\Delta Z, \Delta Z 表示每次迭代距离间隔, I 为迭代$ 次数。在迭代运算过程中,使用公式(4)时,我们假 设海水分子的衰减系数不随深度变化,并且在所反 演的海域内保持为固定值。迭代过程从标定深度 开始,向后逐步迭代至海表附近,从而反演出悬浮 颗粒物的衰减系数随深度变化的值。Fernald算法 的基本思想是从选定的标定值出发,后向迭代反演 参数,采用等距离逐步迭代来揭示海洋剖面K。随深 度的变化。该算法优点在于能够得到稳定回波的 收敛值和数值解,但是其算法的精度依赖于所假设 的激光雷达比。

1.2 分层反演算法

激光发射的线偏振光在与海水相互作用的过程中,其偏振状态会发生改变。在激光雷达系统中,水平和垂直偏振是指激光束的偏振方向相对于某一参考平面的取向。水平偏振是指激光束的偏振方向与参考平面平行。垂直偏振是指激光束的偏振方向与参考平面垂直。激光以斜角度入射海面以减弱强烈的海表反射。接收系统通过双偏振通道来捕获信号,其中偏振平行通道负责接收与激光发射偏振方向平行的信号,偏振垂直通道则接收与激光发射偏振方向垂直的信号。两个偏振通道所收集的信号虽然均包含了从海表反射以及海水内部散射的激光信号,但两者之间存在差异,偏振

平行通道接收到的海表信号更为强烈,偏振垂直通 道能够有效抑制强烈的海表反射,从而提高海水散 射信号的信噪比,但该通道仅接收激光的垂直偏振 分量,因此探测信号强度和距离会受到限制。双偏 振通道信号因偏振特性会得到不同的回波信号,反 演算法在后向迭代开始时可以用信号更明显的平 行偏振通道信号,在迭代过程中更多的使用垂直偏 振通道信号,因此综合运用两个偏振通道信号的特 性来更精确地反演K₄。

基于双偏振通道信号,结合 Fernald 后向迭代法 和斜率法的基本思想,提出一种分层反演海洋漫射 衰减系数的方法。该分层反演算法的核心思路是: 第一步,以1米的分辨率对双偏振信号进行分层处 理;第二步,截取每一层的末端的双偏振信号,末端 采样点间隔取决于采样的频率,对末端信号使用斜 率法所得反演结果作为此层后向迭代反演的标定 值;第三步,利用 Fernald 法反演得到的收敛结果作 为该层的 K_a值结果。若在某一层中,平行偏振通道 的信号强度超过垂直偏振通道的10倍以上,则判定 垂直偏振通道无法有效接收该层的信号,此时仅采 用平行偏振通道进行反演计算。该算法的反演流 程如下所述:

2 实验结果与分析

2.1 系统结构及实验海域

激光雷达系统由发射单元,接收单元,综合控制处理单元三部分构成。发射单元中,主要由激光器,准直扩束镜构成,激光器发出线偏振光经扩束 镜准直后以最佳入射角度斜射入海水,激光器采用



图1 分层反演算法流程图

Fig1 Flowchart of Layered Inversion Algorithm



图 2 激光雷达系统结构示意图

Fig 2 Schematic Diagram of LiDAR System Structure

激光波长为532nm的线偏振绿光,激光脉宽约为 5ns,激光发射的能量为5mJ。接收单元主要由接收 望远镜,偏振通道,窄带滤波片,光阑构成。接收望 远镜使用的是卡塞格林构型,接收视场角为3mrad, 双偏振通道分为垂直偏振通道和平行偏振通道,同 时接收来自不同偏振态的回波信号。综合控制处 理单元包含光电探测器和高速采集卡以及上位机, 光电探测器为滨松生产的PMT,用于将光信号转化 为电信号,高速采集卡的采样频率为1GHz。激光脉 宽、高速采集卡的采样频率以及海水对信号的脉冲 展宽效应共同决定了海水垂直分辨率。5纳秒(ns) 的激光脉冲宽度和1吉赫兹(GHz)的采样频率理论 上能够实现的垂直深度分辨率约为0.6米。然而, 海水对脉冲的展宽效应实际上会增加海水的垂直 分辨率。实验海域位于深度范围在10米至15米的 近海区域,受潮汐效应影响,在观测时间段内,10米 深度范围内的信号表现明显。



图 3 实验海域 Fig 3 Experimental Sea Area

实验区域位于黄东海上的海洋卫星应用中心的海上平台,具体地理坐标为经度为121.70°,纬度为37.68°,该海域最大水深约15m。原位测量值来源于TriOS RPMS自由落体式高光谱辐射剖面测量系统,通过测量532nm处海水的离水下行辐照度来确定不同深度处的K_a,下行辐照度与漫射衰减系数K_a的关系为^[25]:

$$K_{d}(z,\lambda) = -\frac{d\ln\left(E_{d}(z,\lambda)\right)}{dz}$$
(5)

式中 E_d(z,λ)为离水下行辐照度,漫射衰减系数的 单位为m⁻¹。原位测量仪器在实验当天分三次测量 了实验海域的不同光谱下的离水下行辐照度,离水 上行辐亮度以及海水深度,完成原位测量工作后进 行了激光雷达系统探测实验海域实验并收集实验 数据。

2.2 实验结果

2.2.1 激光回波偏振特性分析

图4展示了偏振激光雷达三个通道的回波信号,分别是无偏振通道、垂直偏振通道以及平行偏振通道的信号。图中信号是将五分钟内采集的 1500帧数据汇总为一包进行累加处理,并对数据进 行了预处理,以消除底部噪声电平的影响。无偏振 通道的回波信号在海表处的信号强度比平行偏振 通道高出20%。对于双偏振的海表信号回波,我们 选择与入射面——即入射光束与海面法线构成的 平面——垂直的平面作为偏振参考面。在这种设 置下,观测到垂直通道的信号强度大约是平行偏振 通道信号强度的一半。回波信号的偏振度被测定 为0.479,这一数值反映了海面反射、海面粗糙度以 及海水中物质的散射共同作用的结果。这表明,垂 直通道信号在提供近岸部分丰富的海水散射信息 的同时,还能有效抑制来自海表的强烈平行偏振信 号,偏振信号增强了对海水特性的探测能力。对海 水散射的信号取对数后显示,信号主要集中在10m 水深范围内,其中垂直偏振通道信号在0-7.5m范 围内有明显的散射信号,平行偏振通道信号在0-9m 范围内有明显的散射信号,无偏振通道信号在0-9.5m范围内有明显的散射回波信号,平行偏振通道 信号强度随深度的变化趋势与非偏振通道信号强 度随深度变化趋势相似,这表明平行偏振通道的信 号能够全面反映回波信号随深度变化趋势,垂直偏 振通道由于可以抑制海表信号,能够为近岸深度信 号提供更丰富的数据。

2.2.2 基于双偏振通道的 K₄反演结果

图 5(a) 中展示了基于双偏振通道分层反演 K



图4 三种通道信号比较

Comparison of Three Channel Signals Fig4

的结果,以1m作为距离分辨率分层反演漫射衰减 系数K₄,从水深10m处的信号进行标定反演。反演 结果显示 K。在近岸10m 水深波动范围在0.23-0.28 之间。0-2m处K,的波动可能受到信号在海表附近 产生展宽从而导致失真,也有可能是强烈的后向散 射导致的,2-5m处的K,波动起伏较大,可能是这块 区域中海水浮游植物含量升高,此范围内的悬浮颗 粒物和叶绿素浓度可能较高。5-10m处K,变化较 小,表明此处海水中颗粒物分布比较均匀。

图5(b)中为原位测量分层K。结果,基本流程是 利用原位测量仪器测出不同深度下的下行辐照度, 根据公式(1)中下行辐照度和K。随深度变化的关 系,求得原位测量分层的K。结果。1m作为距离分 辨率,对10m水深进行分层,结果显示,0-3m处K。 变化起伏剧烈,一方面由于是0-3m数据深度太浅, 分层得到的斜率值不稳定,更有可能的原因是这附 近海水深度的悬浮物颗粒物或者浮游植物含量较 高,或存在叶绿素散射层,3-5m之间的数据结果趋 于稳定,5-10m处K。变化相对较小,与双通道偏振 分层反演结果所展现的趋势相近。图中比较了双 偏振通道分层反演结果与原位测量结果,使用均方 根误差来表征两者之间的误差,结果显示双偏振通 道分层的均方根误差为0.04,说明反演结果能够与 原位测量结果保持吻合。

2.2.3 精度分析

图6中显示双偏振通道分层反演结果分别与无 偏振通道、垂直偏振通道、平行偏振通道的精度比 较。无偏振通道分层反演结果相对于原位测量结 果的均方根误差为0.1035,垂直偏振通道和平行偏 振通道的均方根误差分别为0.1017,0.0520,结果



图 5 双偏振通道分层反演结果与原位测量分层结果

Fig 5 Layered Inversion Results of Dual-Polarization Channels and In-situ Measured Layering Results

显示双偏振通道分层结果对无偏振通道、垂直偏振 通道、平行偏振通道精度分别提升了15%,20%, 25%。

图 7 中显示分层反演结果与使用单一 Fernald 算法反演 Kd 在无偏振通道、垂直偏振通道、平行偏 振通道的结果,其中双偏振通道 Fernald 反演结果的 均方根误差为 0.0728,无偏振、水平偏振和垂直偏 振的均方根误差分别为 0.0741,0.0820,0.1045。 结果显示分层反演结果相比于单一使用 Fernald 算 法在无偏振通道、垂直偏振通道、平行偏振通道的 精度提升了 10%,15%,20%。

表1显示了不同偏振通道间和不同算法之间的 精度分析,结果与原位测量相比较,使用均方根误 差作为误差表征,表中结果显示,双偏振通道分层 反演结果精度最高。基于双偏振通道反演K_a,相比 于无偏振、垂直偏振和平行偏振通道,精度提升了 52.4%,51.6%,21.9%;对于使用分层算法,相比于 不同偏振通道中使用 Fernald 算法,精度提升了 32.4%,10%,2.8%,17.2%。

3 结论

海洋激光雷达精确反演 K_a对于准确评估海洋 剖面叶绿素浓度的分布以及海洋水质具有重要意 义。本研究分析了激光雷达传统反演 K_a的主要方 法以及所存在的缺点,利用偏振特性能够接收更为 表1 分层反演算法和 Fernald 算法在三种通道的均方根误 差

 Table 1 _Root Mean Square Error of Layered Inversion

 sion Algorithm and Fernald Algorithm in

 Three Channels

均方根误差	分层反演算法	Fernald反演算
		法
双偏振通道反演结果	0.0492	0.0728
无偏振通道反演结果	0. 1035	0.1151
垂直偏振通道反演结果	0.1017	0.1045
平行通道反演结果	0.0630	0.0761

丰富的海洋剖面散射信号的特点,在自研的激光雷 达中设置了双偏振通道来接收信号,利用偏振海洋 激光雷达系统分层反演漫射衰减系数K_a。以1米作 为垂直分辨率,通过双偏振通道分层反演海洋剖面 K_a结果与实际原位测量数据的均方根误差为 0.049,相较于非偏振通道信号,其精度提升了 52.4%,同时,与传统的Fernald算法相比,分层反演 算法的精度提升了32.4%。利用偏振特性反演海 洋剖面的光学参数需要考虑器件本身特性,海面的 波浪、气泡等诸多因素,研究结果显示出偏振激光 雷达在海洋光学参数探测方向上的潜力和价值。



图6 不同偏振通道下分层反演结果

Fig 6 Layered Inversion Results under Different Polarization Channels



图7 不同偏振通道下Fernald算法结果

Fig 7 Fernald Algorithm Results under Different Polarization Channels

参考文献

Liu Houtong, Zhao Jianxin. Theoretical study on an optimized design scheme for airborne lidar polarization detection [J]. Laser and Optoelectronics Progress, 2013, 50 (04): 64-69.
 (刘厚通,赵建新.—种机载激光雷达偏振探测优化设计

方案的理论研究[J].激光与光电子学进展),2013,50 (04):64-69.

- [2] Zhao Wenjing, Cao Wenxi, Hu Shuibo, et al. Accuracy comparison of MODIS-Aqua diffuse attenuation coefficient product Kd(490) in the South China Sea [J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(01): 14-24.
 (赵文静,曹文熙,胡水波,等.MODIS-Aqua 漫射衰减产品 Kd(490)在南海海域的精度对比[J].光学精密工程), 2018,26(01):14-24.
- [3] Tao Yuting, Zhao Hongkai, Zhou Yudi, et al. Overview of the CALIOP inversion method for ocean particulate backscattering coefficient [J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(06): 65-73.
 (陶雨婷,赵泓楷,周雨迪,等.CALIOP反演海洋颗粒物

后向散射系数方法概述[J].红外与激光工程),2021,50 (06):65-73.

[4] Kong Xiaojun, Liu Bingyi, Yang Qian, et al. Simulation study on measuring water optical parameters using shipborne lidar [J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49 (02): 185-192.
(孔晓娟,刘秉义,杨倩,等.船载激光雷达测量水体光学 金粉的位克 萬期 研究[1] 在加点激化工程), 2020, 40

参数的仿真模拟研究[J]. 红外与激光工程), 2020, 49 (02):185-192.

- [5] Liu Q, Cui XY, Chen WB, et al. A semi-analytic Monte Carlo radiative transfer model for polarized oceanic lidar: Experiment-based comparisons and multiple scattering effects analyses [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2019, 237: 106638.
- [6] Zhang Congli, Zhou Junzhuo, Zong Yuan, et al. Suppression of sea surface sun glint based on polarization information [J]. Optics and Precision Engineering, 2023, 31 (15): 2181-2192.
 (张聪立,周俊焯,纵园,等.基于偏振信息的海面太阳耀光抑制[J].光学精密工程),2023,31(15):2181-2192.
- [7] Hu L B, Zhang X D, Xiong Y H, et al. Variability of relationship between the volume scattering function at 180° and the backscattering coefficient for aquatic particles [J]. Applied Optics, 2020, 59(10): C31–C41.
- [8] Liu Zhipeng, Liu Dong, Xu Peitu, et al. Ocean lidar inversion of water optical parameters [J]. Journal of Remote Sensing, 2019, 23(05): 944-951.
 (刘志鹏,刘东,徐沛拓,等.海洋激光雷达反演水体光学参数[J].遥感学报),2019,23(05):944-951.
- [9] Wang Xiaobin, Zhao Hongkai, Zhou Yudi, et al. Detection of jellyfish characteristics in the Yellow Sea using polarized ocean lidar [J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50 (06): 122-128.
 (王晓彬,赵泓楷,周雨迪,等.偏振海洋激光雷达探测黄

海水母特性[J]. 红外与激光工程), 2021, 50(06): 122-128.

[10] Li Kaipeng, He Yan, et al. Dual-wavelength ocean lidar detection of chlorophyll profiles from coastal to oceanic waters [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48 $\left(20\right)$: 156–166.

(李凯鹏,贺岩,等.双波长海洋激光雷达探测近岸到大 洋水体的叶绿素剖面[J].中国激光),2021,48(20): 156-166.

- [11] Fernald. analysis of atmospheric LiDAR observations: some comments [J].Optical Society of America, 1983, 10
- [12] Tang Junwu, Zhu Peizhi, Liu Bingyi, et al. Particle polarization scattering in ocean profile lidar detection [J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(12): 9–28.
 (唐军武,朱培志,刘秉义,等.海洋剖面激光雷达探测 中颗粒物偏振散射问题[J].光学学报),2022,42(12): 9–28.
- [13] LU X, HU Y, PELON J, et al. Retrieval of ocean subsurface particulate backscattering coefficient from spaceborne CALIOP lidar measurements [J]. Optics Express, 2016, 24(25): 29001–29008.
- [14] ZIBORDI, YU Xuemin. Analysis of coastal marine water color with aerial remote sensors [J]. Space return and remote sensing, 1994, (02): 50-65.
 (ZIBORDI,余雪敏.用航空遥感器对海岸带海洋水色的分析 [J]. 航天返回与遥感), 1994, (02): 50-65.
- [15] Zhang X D, Hu L B, Xiong Y H, et al. Experimental estimates of optical backscattering associated with submicron particles in clear oceanic waters [J]. Geophysical Research Letters, 2020, 47(4): e2020GL087100.
- [16] Zhu Peizhi, Liu Bingyi, Kong Xiaojuan, et al. Estimation of chlorophyll profile detection capability of spaceborne oceanographic lidar [J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(2): 20200164.
 (朱培志,刘秉义,孔晓娟,等. 星载海洋激光雷达叶绿 素剖面探测能力估算[J]. 红外与激光工程),2021,50
 (2):20200164.
- [17] XIE Guofang, DUAN Jin, WANG Jialin, FU Qiang, ZHANG Su, ZHAN Juntong, QIN Yuze. Analysis of polarized light transmission characterization based on multilayer sea fog environment [J]. Infrared and Laser Engineering, 2024, 53 (10): 20240205. DOI: 10.3788/IR-LA20240205
 (谢国芳,段锦,王佳林,付强,张肃,战俊彤,秦语 泽.基于多层海雾环境的偏振光传输特性分析[J]. 红 外与激光工程), 2024, 53(10): 20240205. DOI: 10. 3788/IRLA20240205
- [18] Shu Xiao-Zhou, Wang Jun-Fa, Shen Ming-Ming, Kuang Ding-Bo. Remote Sensing of Water Quality Monitoring Using an Airborne Imaging Spectrometer [J]. J. Infrared Millim. Waves, 2000, 19(4): 273-276. (疏小舟 汪骏发.航空成像光谱水质遥感研究[J].红外 与毫米波学报),2000,19(4):273~276.
- [19] TAN Chong-Tao, YU Wen-Bo, XIANG Yu-Yan, LI Shao-Hui, YU Jing, WANG Qian-Ying, LI Song. Real time denoising method for spaceborne photon counting laser ranging radar[J]. J. Infrared Millim. Waves, 2024, 43 (2):241~253.
 (谭崇涛,于文博,向雨琰,李少辉,余婧,王倩莹,李松. 星载光子计数激光测距雷达的实时去噪方法[J].红外
- 与毫米波学报),2024,43(2):241~253. [20] LI Deren, WANG Mi. Review of high-resolution optical satellite mapping techniques [J]. Space return and remote

sensing, 2020, 41(02): 1-11.

(李德仁,王密.高分辨率光学卫星测绘技术综述[J]. 航天返回与遥感), 2020, 41(02): 1-11.

- [21] TONG Chiming, BAO Yunfei, HUANG Qiaolin, et al. Research progress of solar induced chlorophyll fluorescence satellite remote sensing technology [J]. Space return and remote sensing., 2022, 43(02): 45-55.
 (仝迟鸣,鲍云飞,黄巧林,等.太阳诱导叶绿素荧光卫 星遥感技术研究进展 [J]. 航天返回与遥感), 2022, 43 (02): 45-55.
- [22] LIU Tang-You, Kuang Ding-Bo, Yin Qiu. Study on Hyperspectral Quantitative Model of Concentrations for Chlorophyll-a of Algae and Suspended Particles in Tai Lake [J]. Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves,

2004, 23(1): 11-15.

(刘堂友 匡定波 尹球.湖泊藻类叶绿素-α和悬浮物浓 度的高光谱定量遥感模型研究[J].红外与毫米波学报),2004,23(1):11~15.

- [23] Churnside J H. Review of profiling oceanographic lidar [J]. Optical Engineering, 2013, 53(5): 051405.
- [24] Gordon H R. Interpretation of airborne oceanic lidar: effects of multiple scattering[J]. Applied Optics, 1982, 21 (16): 2996-3001.
- [25] Mobley C D. Light and Water: Radiative Transfer in Natural Waters [M]. Academic Press, 1994.
- [26] Klett J D. Stable analytical inversion solution for processing lidar returns [J]. Applied Optics, 1981, 20 (2): 211-220.