

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_d 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_d 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_d 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 10 m 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 1 m 作为垂直分辨率, 双偏振通道分层反演海洋剖面 K_d 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: O436 **文献标识码:** A

Layered inversion of ocean diffuse attenuation coefficient based on polarization LiDAR

LEI Zi-Ang, YANG Song, SHEN Zhen-Min, LI Tong, WANG Zi-Hao, ZHANG Rui-Zhe,
ZHANG Jing-Hao, ZHENG Yong-Chao*
(Beijing Institute of Space Mechanical and Electrical Engineering, Beijing 100094, China)

Abstract: The diffuse attenuation coefficient (K_d) 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 possessing a distinct advantage in mapping the vertical distribution of K_d within the ocean. By combining Fernald's backward iteration and slope approaches, this study proposes a layered inversion method for oceanic profile K_d estimation, utilizing dual-polarization channel signals. The vertical polarization channel is specifically used to suppress surface signals and enhance near-shore oceanic back scatter. Conducted in the Yellow Sea and the East China Sea, 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 K_d 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 traditional Fernald algorithm, demonstrating a 32.4% improvement in precision.

Key words: ocean optics, LiDAR, polarization, diffuse attenuation coefficient, inversion algorithm

收稿日期: 2025-07-17, 修回日期: 2025-07-23

Received date: 2025-07-17, Revised date: 2025-07-23

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)

Foundation items: Supported by the National Natural Science Foundation of China (62175072), the 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

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

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所产生的环境光场,海洋光学参数可以分为两大类:固有光学量(Inherent Optical Properties, IOP)和表观光学量(Apparent Optical Properties, AOP)。其中,漫射衰减系数 K_d 便是一个关键的AOP,它精确描述了由光谱下行平面辐照度随深度增加而呈指数衰减的现象^[1-2]。 K_d 数值不仅与海水中的吸收系数、光束衰减系数等IOP紧密相连,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_d 已成为利用光学手段探测海洋表层乃至次表层信息的重要指标^[3-4]。

传统的 K_d 探测方法主要依赖原位船载测量和水色遥感技术两种途径。原位船载测量虽然具有高精度探测的优点,能够通过压力计辅助来探测不同海水深度下的 K_d ,但是受限于船载平台的走航效率,难以实现对全球海域的实时探测。水色遥感是主要的遥感海洋光学参数的观测手段^[5-7],通过将传感器搭载在卫星平台上,实现了对全球海洋的覆盖观测。然而,其信号光源依赖太阳光的反射,因此在探测海洋剖面的 K_d 信息方面能力有限。鉴于此,海洋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水表层,获取海洋剖面的精细信息,从而为海洋立体观测提供了有力的补充手段^[8-10]。

海洋激光雷达反演 K_d 的主要算法有斜率法和Fernald后向迭代法,这两种算法虽源于大气激光雷达探测,但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_d 。斜率法由Mobley等人于1994年提出用于海洋光学参数反演^[11]。该方法通过简化海洋激光雷达方程,假设海水为均匀水体,对回波信号取对数后,利用曲线斜率来估算 K_d 。该方法局限在于只适用于均匀水体的反演。相比之下,Fernald后向迭代法更为常用。2019年,浙江大学刘志鹏利用Fernald法反演研究漫射衰减系数 K_d ,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486 nm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后向迭代法的精度主要受限于所假设的激光雷达比。为提高反演精度,可以从两方面考虑:一是

改进算法本身,以减少计算误差,二是在激光雷达系统接收端引入双偏振通道,获取剖面散射信息,为反演算法提供更丰富的数据支撑,从而提升反演精度。

海洋激光雷达接收的双偏振信号包括平行偏振和垂直偏振两种。平行偏振通道接收与发射激光偏振状态相同的回波,其信号来源多样,包括海表的反射、海水散射和海底反射。垂直偏振通道接收与发射激光偏振方向垂直的海洋回波,其信号主要来源于近海面的水体剖面,因而能有效抑制海表散射的影响,从而增强海水散射信号^[15-19]。自研的激光雷达系统中,通过优化激光器的发射角度,使得垂直偏振通道所接收海表信号强度降至最低,同时仍能接收平行偏振态的回波信号,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,提出一种分层反演海洋漫射衰减系数的方法。实验选取1 m作为海水垂直分辨率,分层反演了水深10 m的海洋剖面的漫射衰减系数 K_d 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,以及对不同反演方法的精度进行了评估。

1 激光雷达反演方法

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]:

$$P(z, \lambda) = \frac{A(\beta^\pi(z, \lambda)) \exp[-2 \int_0^z (\alpha(z')) dz']}{(nH + z)^2}, \quad (1)$$

式(1)中, $P(z, \lambda)$ 是海洋剖面回波功率强度, A 为激光雷达常数, $\beta^\pi(z, \lambda)$ 是 180° 后向体散射系数, $\alpha(z)$ 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_d 来表征这一衰减过程。对于海

洋激光雷达系统,大视场的接收系统的漫射衰减系数 K_d 近似等于衰减系数 $\alpha(z, \lambda)$ ^[23-25]:

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

此外,漫射衰减系数 K_d 与浮游植物含量、叶绿素浓度等紧密相关,它为生物学和光学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_d 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_d 与信号强度随探测距离变化的斜率关系^[26]:

$$\alpha_p(I-1) + \frac{S_p}{S_w} \alpha_w(I-1) = \frac{X(I-1)\exp(+K(I-1,I))}{\frac{X(I)}{\alpha_p(I) + \frac{S_p}{S_w} \alpha_w(I)} + [X(I) + X(I-1)\exp(+K(I-1,I))]\Delta Z} \quad (4)$$

式中, $X(z) = P(z)(nH+z)^2$ 表示经过距离校正后的回波信号, S_p 、 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_m 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。 $K(I-1, I) = (S_w - S_p)(\beta_w^\pi(I) + \beta_w^\pi(I+1))\Delta Z$, ΔZ 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,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_d 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。接收系统采用双偏振通道设计来捕获信号,偏振平行通道接收与发射光偏振方向平行的信号,偏振垂直通道则接收与之垂直的信号。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

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

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_d 进行标定,无法准确描述整个海洋剖面中的 K_d 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]:

表反射,从而提高海水散射信号的信噪比。不过,垂直通道仅接收垂直偏振分量,限制了其探测信号强度和距离。正是由于双偏振通道信号因偏振特性而获得不同的回波信号,反演算法可以在迭代初期优先利用信号更明显的平行通道数据,在后续迭代过程中更多地使用垂直偏振通道信号。通过综合运用这两个偏振通道的特性,能够更精确地反演 K_d 。

基于双偏振通道信号,结合 Fernald 后向迭代法和斜率法的基本原理,提出一种分层反演海洋漫射衰减系数的方法。该算法的核心步骤如下:第一步,以 1 m 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信号数据,末端采样点间隔取决于采样的频率,利用斜率法对这些末端信号进行初步反演,所得结果作为该层进行 Fernald 后向迭代计算的初始标定值;第三步,采用 Fernald 法迭代直至收敛,并将收敛结果作为该层的 K_d 值。特别地,若某层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信号无效,该层反演将仅依赖平行偏振通道完成。该算法的反演流程如图 1 所示。

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。发射单元由激光器与准直扩束镜构成,发射 532 nm 线偏振绿光经扩束镜准直后以最佳入射角度斜射入海水,激光脉宽约为 5 ns,发射的能量为 5 mJ。接收单元主要由卡塞格林构型的接收望远镜、垂直和平行偏振通道、窄带

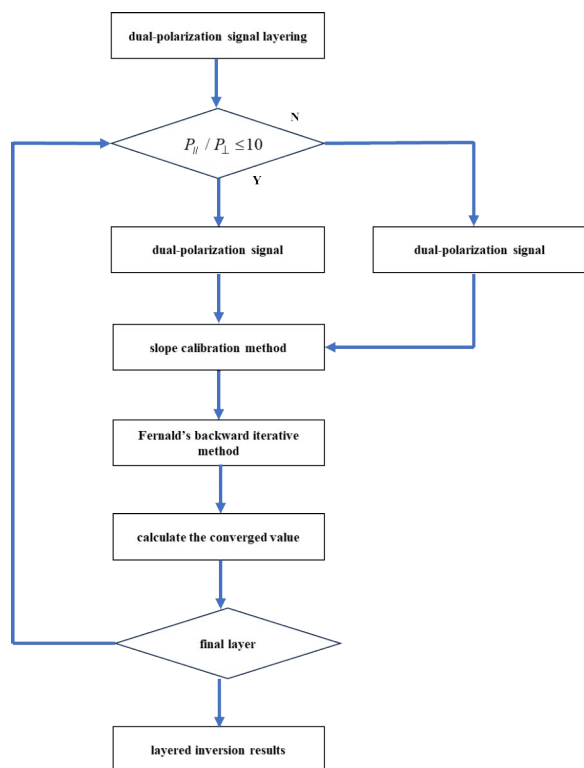


图1 分层反演算法流程图

Fig. 1 Flowchart of layered inversion algorithm

滤波片及光阑构成,接收视场角为 3 mrad。综合控制处理单元包含滨松生产的光电探测器和采样频率为 1 GHz 的高速采集卡以及上位机。系统的垂直分辨率理论上由 5 ns 激光脉宽和 1 GHz 采样频率决定,约为 0.6 m,但会受到海水脉冲展宽效应的实际影响而增大。实验海域位于深度范围在 10~15 m 的近海区域,受潮汐效应影响,在观测时间段内,10 m 深度范围内的信号表现明显。

实验区域位于黄东海上的海洋卫星应用中心的海上平台,具体地理坐标经度为 121.70°,纬度为 37.68°,该海域最大水深约 15 m。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 532 nm 处海水的离水下行辐照度来确定不同深度处的 K_d ,下行辐照度与漫射衰减系数 K_d 的关系为^[25]:

$$K_d(z, \lambda) = \frac{d \ln(E_d(z, \lambda))}{dz}, \quad (5)$$

式中, $E_d(z, \lambda)$ 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。图中信号将五分钟内采集的 1 500 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,将预处理信号强度取对数后得到图中信号。在近海表处,无偏振通道的回波信号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,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

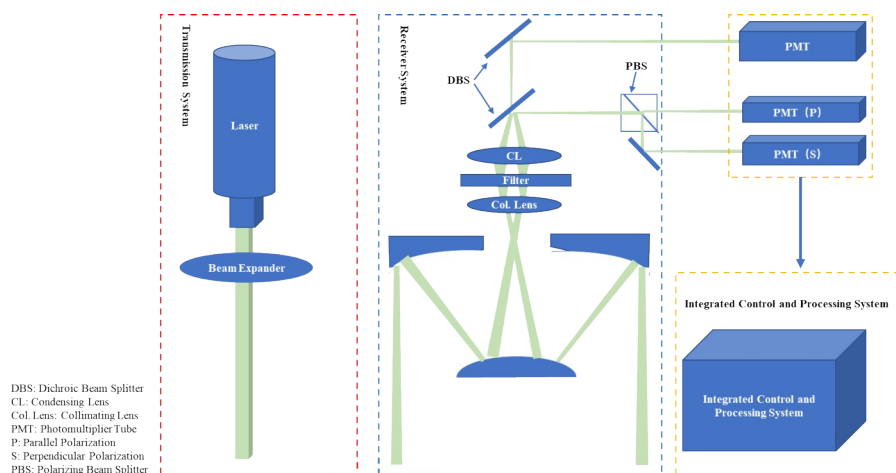


图2 激光雷达系统结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of LiDAR system structure

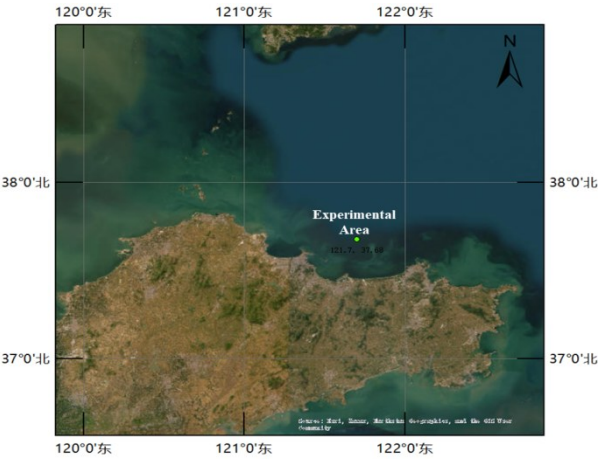


图3 实验海域

Fig. 3 Experimental sea area

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10 m水深范围内,其中垂直偏振通道信号在0~7 m范围内有显著散射信号,平行偏振通道信号在0~9 m范围内有明显的散射信号,无偏振通道信号在0~9 m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,垂直偏振通道则可以抑制海表信号,能够为近岸深度信号提供更丰富的数据。

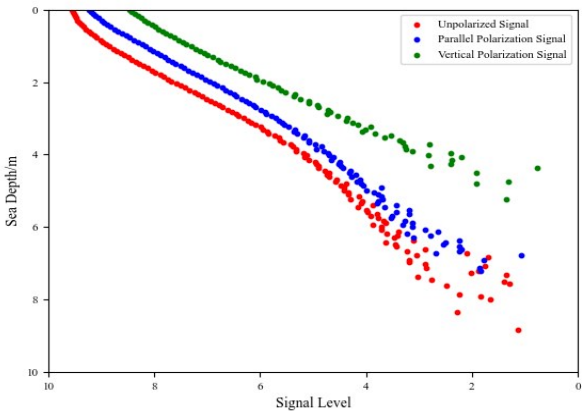


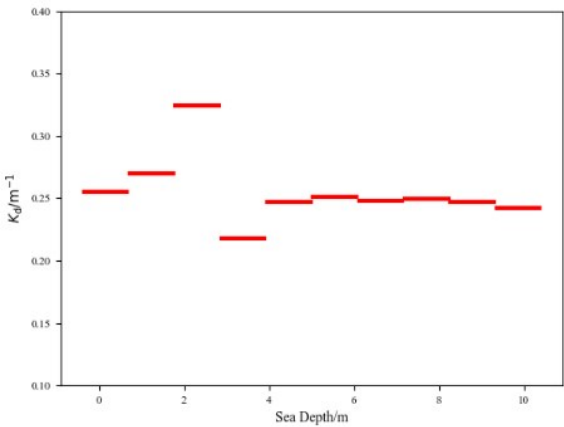
图4 三种通道信号比较

Fig. 4 Comparison of three channel signals

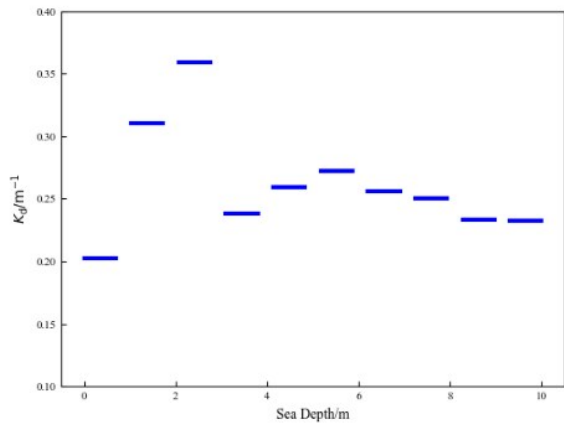
2.2.2 基于双偏振通道的 K_d 反演结果

图5(a)中展示了基于双偏振通道分层反演 K_d

的结果,以1 m作为距离分辨率分层反演漫射衰减系数 K_d ,从水深10 m处的信号进行标定反演。反演结果显示, K_d 在近岸10 m水深波动范围在0.23~0.28之间。0~2 m处 K_d 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;2~5 m处的 K_d 波动起伏较大,可能是这块区域中海水浮游植物含量升高,悬浮颗粒物和叶绿素浓度可能较高。5~10 m处 K_d 变化较小,表明此处海水中颗粒物分布比较均匀。



(a)



(b)

图5 双偏振通道分层反演结果与原位测量分层结果:(a)双偏振通道分层反演结果;(b)原位测量分层反演结果

Fig. 5 Layered inversion results of dual-polarization channels and in-situ measured layering results: (a) layered inversion results from dual-polarization channels; (b) layered inversion results from in-situ measurements

图5(b)中为原位测量分层 K_d 的结果,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_d 随深度变化的关系,求得原位测量分层的 K_d 结果。1 m作为距离分辨率,对10 m水深进行分层,结果显示,0~3 m处 K_d 变化起伏剧烈,一方面是由于0~3 m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颗粒物或者浮游植物含量较高,或存在叶绿素散射层,3~5 m之间的数据结果趋于稳定,5~10 m处 K_d 变化相对较小,这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0.103 5,垂直偏振通道和平行偏振通道的均方根误差分别为0.101 7、0.052 0,结果显示,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 K_d 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0.072 8,无偏振、水平偏振和垂直偏振的均方根误差分别为0.074 1、0.082 0、0.104 5。结果显示,分层反演算法的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分别提升了10%、15%、20%。

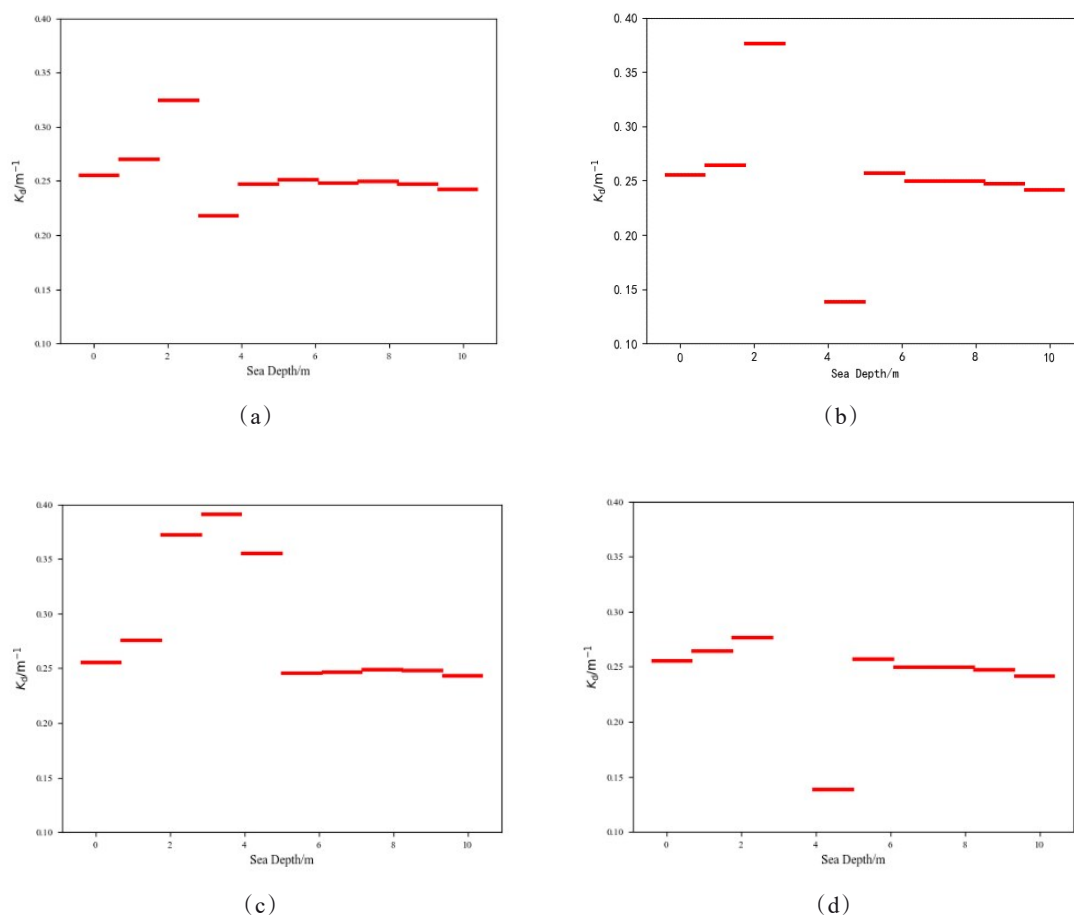


图6 不同偏振通道下分层反演结果:(a)双偏振通道分层反演结果;(b)垂直偏振通道分层反演结果;(c)平行偏振通道分层反演结果;(d)无偏振通道分层反演结果

Fig. 6 Layered inversion results under different polarization channels: (a) layered inversion results from dual-polarization channels; (b) layered inversion results from vertical polarization channels; (c) layered inversion results from horizontal polarization channels; (d) layered inversion results from unpolarized channels

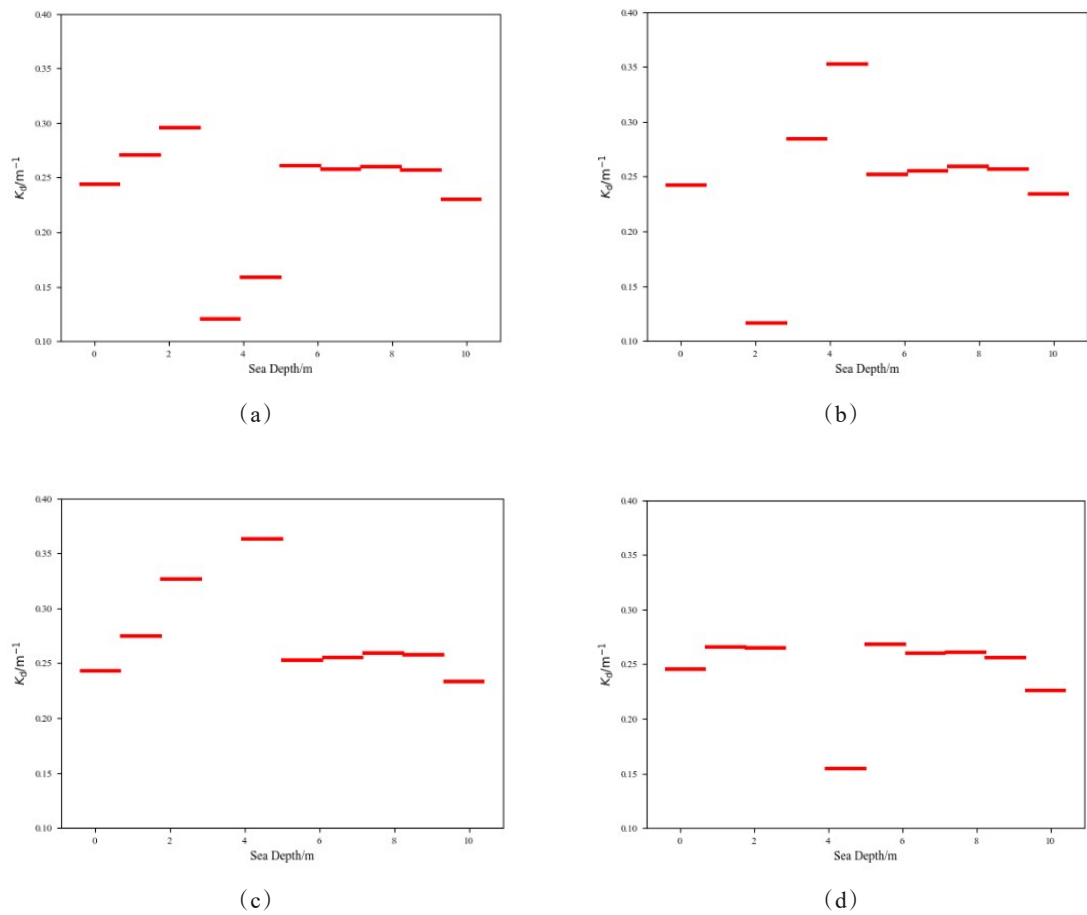


图7 不同偏振通道下Fernald算法结果:(a)双偏振通道Fernald反演结果;(b)无偏振通道Fernald反演结果;(c)平行偏振通道Fernald反演结果;(d)垂直偏振通道Fernald反演结果

Fig. 7 Fernald algorithm results under different polarization channels: (a) Fernald inversion results from dual-polarization channels; (b) Fernald inversion results from unpolarized channels; (c) Fernald inversion results from horizontal polarization channels; (d) Fernald inversion results from vertical polarization channels

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_d ,相比于无偏振、垂直偏振和平行偏振通道,精度分别提升了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,精度分别提升了32.4%、10%、2.8%、17.2%。

3 结论

海洋激光雷达精确反演 K_d 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。本研究首先梳理了激光雷达传统反演 K_d 的主要方法及其固有缺陷。鉴于偏振特性能够捕捉更丰富的海洋剖面散射信息,利用自研激光雷达系

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 errors of layered inversion algorithm and Fernald algorithm in three channels

Inversion Algorithm Signal Channel	RMSE	
	Layered inversion algorithm	Fernald inversion algorithm
Dual-polarization channels	0.049 2	0.072 8
Non-polarized channels	0.103 5	0.115 1
Vertical polarization channels	0.101 7	0.104 5
Horizontal polarization channels	0.063 0	0.076 1

统,增设了双偏振通道以接收信号,并提出了一种分层反演漫射衰减系数的算法,从偏振海洋激光雷达信号中精确提取 K_d 值。以1 m作为垂直分辨率,

采用双偏振通道分层反演海洋剖面 K_d 结果与实际原位测量数据的均方根误差为 0.049, 这一精度相较于仅使用非偏振通道信号的结果提升了 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%。尽管利用偏振特性反演海洋剖面的光学参数还需要考虑器件本身特性、海面的波浪、气泡等诸多因素, 但研究结果显示出激光雷达在海洋光学参数探测方向上的潜力和价值。

References

- [1] Liu Hou Tong, Zhao Jian Xin. 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. 一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 Wen Jing, Cao Wen Xi, Hu Shui Bo, et al. Accuracy comparison of MODIS-Aqua diffuse attenuation coefficient product $K_d(490)$ 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 $K_d(490)$ 在南海海域的精度对比[J]. *光学精密工程*, 2018, 26(01): 14–24.
- [3] Tao Yu Ting, Zhao Hong Kai, Zhou Yu Di, 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 Xiao Juan, Liu Bing Yi, Yang Qian, et al. Simulation study on measuring water optical parameters using ship-borne 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 X Y, Chen W B, 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 Cong Li, Zhou Jun Zhuo, 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 Zhi Peng, Liu Dong, Xu Pei Tuo, 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 Xiao Bin, Zhao Hong Kai, Zhou Yu Di, 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 Kai Peng, He Yan, Hou Chun He, et al. Dual-wavelength ocean LiDAR detection of chlorophyll profiles from coastal to oceanic waters [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(20): 156–166.
李凯鹏, 贺岩, 侯春鹤, 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 F G. Analysis of atmospheric LiDAR observations: some comments [J]. *Applied Optics*, 1984, 23(5): 652.
- [12] Tang Jun Wu, Zhu Pei Zhi, Liu Bing Yi, 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 space-borne CALIOP LiDAR measurements [J]. *Optics Express*, 2016, 24(25): 29001–29008.
- [14] Zibordi G, Yu Xue Min. Analysis of coastal marine water color with aerial remote sensors [J]. *Space return and remote sensing*, 1994, (02): 50–65.
Zibordi G, 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 Pei Zhi, Liu Bing Yi, Kong Xiao Juan, et al. Estimation of chlorophyll profile detection capability of space-borne 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 Guo Fang, Duan Jin, Wang Jia Lin, et al. Analysis of polarized light transmission characterization based on multilayer sea fog environment [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2024, 53(10): 20240205.
谢国芳, 段锦, 王佳林, 等. 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.
- [18] Shu Xiao Zhou, Wang Jun Fa, Shen Ming Ming, et al. 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, 沈鸣明, 等. 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, et al. 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,等. 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 De Ren, 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 Chi Ming, Bao Yun Fei, Huang Qiao Lin, 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]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2004, 23(1): 11-15.
- 刘堂友,匡定波,尹球. 湖泊藻类叶绿素-a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.