

海洋激光雷达实验与仿真结果的对比

徐沛拓,陶雨婷,刘志鹏,刘 群,崔晓宇,周雨迪,刘 崇*,刘 东

(浙江大学 光电科学与工程学院 现代光学仪器国家重点实验室,浙江 杭州 310027)

摘要: 海洋激光雷达是探测上层海水并构建海洋立体观测网络的重要遥感设备。文中将激光雷达实验数据与 MC (Monte Carlo) 仿真、解析模型、原位数据进行综合对比,检验它们的匹配程度。与实验实测的激光雷达回波信号相比,MC 仿真和解析模型均有很高的一致性($R^2 > 0.97$),将原位漫射衰减系数(K_d)近似代入普通激光雷达方程也有较好的一致性($R^2 > 0.92$)。反演得到的激光雷达衰减系数(α)表现出了相似的结果,MC 仿真和解析模型具有更佳的一致性。结果表明:海洋激光雷达实验结果能与 MC 和解析模型的仿真结果很好地匹配。

关键词: 海洋遥感; 海洋激光雷达; MC 仿真; 解析模型

中图分类号: P715.7 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA202049.0203007

Comparison of oceanic lidar experiments and simulation results

Xu Peituo, Tao Yuting, Liu Zhipeng, Liu Qun, Cui Xiaoyu, Zhou Yudi, Liu Chong*, Liu Dong

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, College of Optical Science and Engineering,
Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Oceanic lidar is a vital remote sensing device for detecting the upper ocean and constructing the 3-D ocean observation network. In this paper, the experimental data of lidar were compared with Monte Carlo (MC) simulation, analytical model and in situ data to find their matched-degree. Compared with experimental lidar signals, the MC simulation and analytical model have high agreement ($R^2 > 0.97$). The normal lidar equation approximately adopting the in situ diffuse attenuation coefficient (K_d) also has good consistency ($R^2 > 0.92$). The retrieved lidar attenuation coefficients show similar results. The MC simulation and the analytical model have better consistency. The results show that the experimental results of oceanic lidar match well with the simulation results of MC and analytical model.

Key words: ocean remote sensing; oceanic lidar; Monte Carlo simulation; analytical model

收稿日期:2019-11-01; 修订日期:2019-12-21

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC1400900, 2016YFC020070);国家自然科学基金(41775023);浙江省自然科学基金杰青项目(LR19D050001);中央高校基本科研业务费;现代光学仪器国家重点实验室创新项目

作者简介:徐沛拓(1994-),男,博士生,主要从事海洋激光雷达的研制和应用方面的研究。Email: xupeituo@zju.edu.cn

导师简介:刘东(1982-),男,教授,博士生导师,主要从事光电检测与遥感等方面的研究。Email: liudongopt@zju.edu.cn

通讯作者:刘崇(1978-),男,教授,博士生导师,主要从事激光器技术和大气海洋遥感等方面的研究。Email: chongliu78@hotmail.com

0 引言

海洋与地球的生态环境和气候气象密切相关,对人类的生产生活至关重要。光学遥感是获取上层海水信息的一种重要手段,有利于人们认识海洋、经略海洋^[1]。自 1978 年世界上首台星载水色扫描仪 (Coastal Zone Color Scanner, CZCS) 发射以来,水色遥感历经 40 多年的发展已趋向于成熟,在海洋水色环境监测中发挥了重要的作用^[2]。随着日益凸显的海洋环境保护、海洋资源开发和海洋权益维护等需求,人们亟需建立起更全面、更高效、更精确的海洋观测体系。受限于工作机理,水色遥感无法获得海水光学参数的垂直分布信息,也难以在夜间弱光环境和极地高纬地区有效工作。海洋激光雷达是一种主动遥感设备,突破了上述限制,在白天和夜晚均可探测海面以下数十米范围内的海水光学参数,探测区域可覆盖包括极地在内的全球海域,这些优势使得海洋激光雷达成为构建海洋立体观测网络的重要组成部分^[3-4]。

1998 年以来,Churnside 进行了一系列的机载激光实验,开展了鱼类探测、浮游植物分布、海水内波等方面的研究^[5]。Behrenfeld 等利用星载激光雷达有限的海水数据进行了全球碳存量、极地浮游植物生物量、海洋动物的垂直迁移等研究^[6]。激光雷达正逐渐成为海洋光学遥感的重要组成部分,有望在海洋研究发挥更重要的作用。

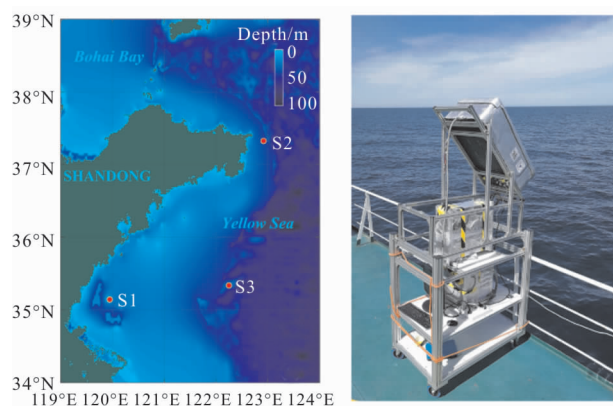
激光自发射到接收,在海水中经历了吸收和散射,海水组分的多样性也增加了该过程的复杂性,因此开发一套高精度的反演算法并非易事。为了深入研究激光雷达多次散射信号,蒙特卡罗 (Monte Carlo, MC) 方法和解析模型被广泛用于仿真激光雷达回波信号。MC 方法可仿真光子在水中的完整传输轨迹,因此可仿真得到最接近实际的激光雷达回波信号^[7]。Poole 和 Zaccanti 等对比了实验室条件下实测的和 MC 仿真的激光雷达数据,但未进行外场实验测量实际海水。解析模型能够快速高效地仿真激光雷达多次散射信号,它采用准小角度近似将复杂的多次散射过程简化为一段后向单次散射和两段前向多次散射。在采用准小角度近似的解析模型的基础上, Walker 等推导出了适用于均匀水体的激光

雷达方程, Kopilevich 等推导了基于高斯响应特性接收器的激光雷达方程, Katsev 等在傅里叶空间推导的激光雷达方程则不受上述条件限制^[8]。浙江大学研制了一套海洋激光雷达系统,并在内陆水体、黄海均开展了外场实验,刘志鹏等进行了激光雷达衰减系数反演算法的开发^[9],刘东等对比了激光雷达实测数据与 MC 仿真数据^[10],周雨迪等验证了 Katsev 解析模型的有效性^[11]。为进一步验证研制的激光雷达的有效性,文中对激光雷达回波信号及其反演得到的激光雷达衰减系数进行处理,与原位仪器数据、MC 仿真数据、解析模型仿真数据进行综合对比。文中充分验证了研制的海洋激光雷达探测结果的可靠性,为进一步推进海洋激光雷达的数据应用奠定了基础。

1 原理和方法

1.1 海洋激光雷达系统和实验

针对海水光学参数的探测需求,研制了一套海洋激光雷达,于 2017 年 8 月搭乘海力号科考船在黄海进行了首次海试。实验获得了大量的走航数据和固定站点数据,在固定站点有同步进行的原位仪器测量数据。如图 1 所示,图(a)展示了实验海域并标出了具有代表性的 3 个固定站点,站点 S1 和 S2 离海岸线较近,而 S3 离海岸线较远,图(b)展示了实验中的海洋激光雷达仪器。



(a) 实验站点分布

(b) 激光雷达系统

(a) Distribution of experiment stations (b) Lidar system

图 1 海洋激光雷达黄海实验

Fig.1 Experiment of oceanic lidar in the Yellow Sea

研制的海洋激光雷达主要由 3 部分组成,激

光发射系统、光学接收系统、以及数据采集和控制系统,如图 2 所示。激光发射系统采用一台 532 nm 脉冲激光器,发射脉冲能量为 5 mJ、脉冲宽度为 10 ns、重复频率为 10 Hz 的脉冲激光。光学接收系统包括望远镜、可调光阑、窄带干涉滤光片和光电倍增管等,接收口径 80 mm,接收视场全角 200 mrad。数据采集和控制系统由计算机、高速采集卡等组成。

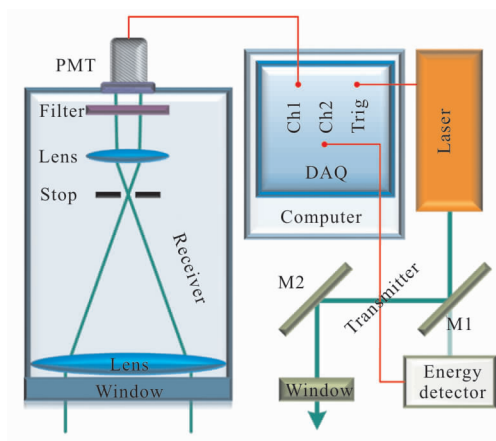


图 2 海洋激光雷达系统简图
Fig.2 Schema of the oceanic lidar system

同期实验的还有原位光学仪器,在后甲板上进行固定站位的观测。原位仪器用于测量水体的固有光学参数,仪器包括 ac-9 吸收衰减仪、CTD 温盐深剖面仪、以及 HS6P 后向散射测量仪。由 ac-9 可得到 532 nm 处的吸收系数 a 和光束衰减系数 c 。HS6P 在 140° 测量了 488 nm 和 550 nm 的后向散射系数 b_b ,由线性插值可得到 532 nm 的 b_b 。漫射衰减系数 K_d 由 b_b 和 a 计算得到。为方便后续使用,所有原位仪器测量的光学参数统一处理为深度分辨率 1 m 的数据集。由于未配备测量相函数的原位仪器,需要对相函数做一定假设,后向散射假设为各向同性,前向散射采用 Dolin 的模型。因此,相函数 $\tilde{\beta}(\theta)$ 可以表示为^[10]:

$$\tilde{\beta}(\theta) = \begin{cases} \frac{m}{2\pi\theta} \exp(-m\theta), & 0 \leq \theta < \frac{\pi}{2} \\ \frac{1}{2\pi} b_b, & \frac{\pi}{2} \leq \theta < \pi \end{cases} \quad (1)$$

式中:参数 m 的取值范围为 6~8,对应的散射角平均余弦为 0.86~0.96。在近岸站点 S1 和 S2, m 设为 8,在远岸站点 S3, m 设为 6。

1.2 海洋激光雷达方程

海洋激光雷达回波信号可表示为采用准小角度近似的激光雷达方程,在该近似下,激光雷达回波信号主要由经历了多次前向散射和单次 180° 后向散射的光子组成,激光雷达方程为:

$$P(z) = \frac{A\beta^\pi(z)}{(nH+z)^2} \exp\left[-2 \int_0^z \alpha(x) dx\right] \quad (2)$$

式中: A 为激光雷达系统常数; H 为激光雷达距海面的高度; z 为水深; n 为海水折射率; β^π 为 180° 体积散射函数; α 为激光雷达衰减系数。水深 z 可由激光雷达距离 r 转换得到,即 $z = r\sqrt{1 - (\sin\theta/n)^2}$, θ 为激光雷达在大气中的天底角。受到多次散射的强烈影响, α 与激光雷达的结构参数以及水体的光学性质均有关系。当仅有单次散射的情况下, α 接近于 c , 当视场角足够大时, α 接近 K_d 。

在对回波信号进行对比后,还需进一步对反演得到的 α 进行对比。根据公式(2), α 可表示为:

$$\alpha(z) = -\frac{1}{2} \frac{d \ln \left[\frac{S(z)(nH+z)^2}{A\beta^\pi(z)} \right]}{dz} \quad (3)$$

1.3 激光雷达回波信号的 MC 仿真

以概率和统计理论方法为基础的 MC 方法常被用于模拟最接近实际的物理过程,该方法也广泛应用于激光雷达回波信号的仿真。由于在仿真过程采用了极少的假设,MC 仿真可以得到高精度的激光雷达回波信号。标准 MC 仿真将光子作为仿真对象,最大程度地模拟了实际激光雷达回波信号,但也存在仿真效率较低的明显不足。为解决仿真效率和统计误差的矛盾, Poole 将随机过程和解析模型结合起来形成了半解析 MC 方法,极大地提高了仿真效率。

半解析 MC 方法将仿真的光子视为一个巨大的光子包,每次散射时均有部分光子满足接收条件参与形成激光雷达信号。在任意一次散射后,直接返回接收器的统计期望值为:

$$E = \beta(\theta) \Delta\Omega \exp(-cL_0) T_s \quad (4)$$

式中: $\beta(\theta)$ 为进入接收器立体角 $\Delta\Omega$ 内平均散射角 θ 的散射相函数; $\exp(-cL_0)$ 为光子从散射点经距离 L_0 到达海面时的比例; c 为光束衰减系数; T_s 为平静海面的菲涅耳反射率。仿真过程中,根据原位仪器数据将非均匀海水分为若干层,每层内的海水视为均匀

水体。当光子经过多层海水时, c 会发生变化。文中涉及的 MC 仿真均为 10^{11} 个及以上光子包的仿真结果, 以降低统计误差。在与实测信号进行对比前, MC 信号还需卷积了实验系统的时间响应特性曲线。

1.4 激光雷达回波信号的解析模型

尽管 MC 仿真具有能够仿真最真实激光雷达回波信号的显著优势, 但在计算资源和时间有限的条件下, 建立在辐射传递理论基础上的解析模型更加合适。

解析模型将多次散射考虑在内, 假设能够进入接收器的激光的传播过程由一段向下的多次前向散射、一次近 180° 后向散射和一段向上的多次前向散射组成, 称为准小角度近似。该近似建立在水体的散射相函数在前向具有突出峰值的特征上, 即激光在水体中的散射光能量主要分布于前向, 具有很高的真实性。基于准小角度近似, Katsev 等在傅里叶空间采用小角度近似对辐射传输方程进行求解, 得到激光雷达信号 $P(z)$ 的解析形式为^[8]:

$$P(z) = W_0 \frac{b(z)}{4\pi} \frac{V}{2} \int dr \int dn' \int dn'' \beta^b(z; |n' - n''|) \times I_{src}(z, r, n') I_{src}^{rec}(z, r, n'') \quad (5)$$

式中: W_0 为激光脉冲的能量; $b(z)$ 为水深 z 处的散射系数; V 为激光在水中的传播速度; 矢量 r 表示散射面上的位置; 矢量 n' 和 n'' 表示激光传输方向在散射面上的投影; β^b 为后向散射相函数, 代表了在散射位

置的单次后向散射; I_{src} 和 I_{src}^{rec} 为激光辐照度从出射位置到散射位置的往返变化, 代表了两段前向散射过程。

上述解析模型极大地降低了多次散射计算的复杂度, 且具有非常直观的物理意义, 文中采用该模型与激光雷达信号进行对比。

2 实验结果与分析

2.1 激光雷达回波信号

文中采用 MC 方法、解析模型、普通激光雷达方程 3 种仿真信号与实测的激光雷达回波信号进行对比。图 3 对比了黄海海试中 3 个代表性站点的激光雷达回波信号, 青绿色点线为激光雷达仪器实验探测的回波信号, 土黄色直线为 MC 方法仿真的回波信号, 红色点划线解析模型仿真的回波信号, 紫色虚线为普通激光雷达方程得到的回波信号。

为降低系统随机误差并提高信噪比, 图 3 中每条实测的激光雷达回波信号均由 100 发脉冲平均得到, 每个站点画出了 10 条激光雷达回波信号, 以便观察信号波动情况。MC 仿真的回波信号由 1.3 节所述的半解析 MC 方法得到, 仿真参数采用了同步原位仪器测量的水体光学参数。解析模型仿真的回波信号由 1.4 节所述的基于小角度近似的解析模型得到, 仿真参数同样也采用了同步原位仪器测量的水体光学参数。普通激光雷达方程仿真的回波信号则是由公式(2)得到, 由于工作视场角较大, 式中的 α

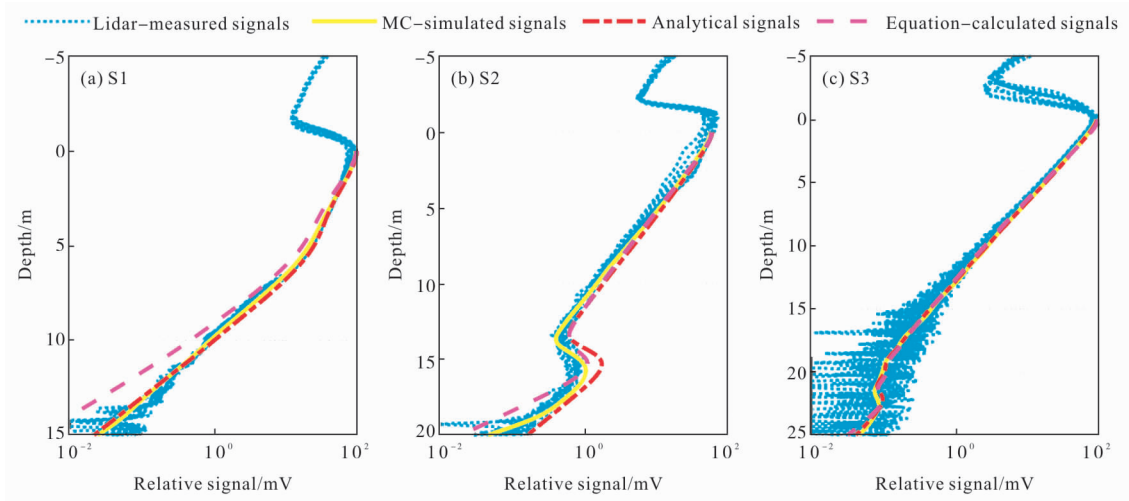


图 3 实测的激光雷达回波信号与 MC 方法、解析模型、普通激光雷达方程仿真的回波信号进行对比

Fig.3 Comparison of measured lidar signal with MC method, analytical model, and normal lidar equation simulated lidar signals

由原位数据计算的漫射衰减系数 K_d 代替。

为了量化激光雷达回波信号的校验结果, 引入两项评价指标, 可决系数 R^2 和相对误差的均方根 δ , 它们的计算公式表示为:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2} \quad (6)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left(1 - \frac{y_i}{\hat{y}_i} \right)^2} \quad (7)$$

式中: m 为采样点数; y_i 为原始值, 即实测激光雷达数据; \hat{y}_i 为模型预测值, 包括 MC 方法、解析模型和普通激光雷达方程 3 种模型仿真的信号; \bar{y} 为原始值的均值。在计算激光雷达回波信号的 R^2 时, 采用了取对数后激光雷达回波信号, 以便更好地同时体现浅水和深水信号的拟合优度。对比结果列于表 1, R_1^2 、 R_2^2 、 R_3^2 和 δ_1 、 δ_2 、 δ_3 分别为实测数据与 MC 方法、解析模型、普通激光方程的可决系数和相对误差均方根。

总体来看, 实测激光雷达回波信号与 3 种仿真模型均表现出了良好的一致性, 平均可决系数 R^2 均大于 0.92。普通激光雷达方程未考虑多次散射的影响, 相对于实测信号的偏移最大, 特别是在近岸站点 S1, 可决系数 R_3^2 明显低于平均水平, 相对误差均方

表 1 实测的激光雷达回波信号与仿真信号对比的可决系数 R^2 和相对偏差均方根 δ

Tab.1 R^2 and δ of the measured lidar signal compared with simulated lidar signals

| Station | S1 | S2 | S3 | Average value |
|------------|-------|-------|-------|---------------|
| R_1^2 | 0.980 | 0.990 | 0.986 | 0.986 |
| R_2^2 | 0.976 | 0.948 | 0.986 | 0.970 |
| R_3^2 | 0.863 | 0.935 | 0.988 | 0.929 |
| δ_1 | 0.304 | 0.168 | 0.216 | 0.230 |
| δ_2 | 0.396 | 0.302 | 0.212 | 0.303 |
| δ_3 | 3.202 | 0.788 | 0.195 | 1.395 |

根 δ_3 明显高于平均水平。站点 S2 在水深 15 m 左右存在一个强层次, 对比结果仍表现出很好的一致性。在离岸较远的站点 S3, 可探测深度有了明显的提升。

2.2 激光雷达衰减系数

激光雷达衰减系数 α 表征了激光在水体中传输时的衰减特征, 与上一相似, 本节采用 MC 仿真信号反演结果、解析模型仿真信号反演结果以及原位数据对激光雷达衰减系数进行检验。

图 4 展示了黄海海试中 3 个典型站点的衰减系数, 带误差条的青绿色实线是由实测信号反演得到的 α , 土黄色直线是由 MC 仿真信号反演得到的 α , 红色点划线是由解析模型仿真信号反演得到的 α ,

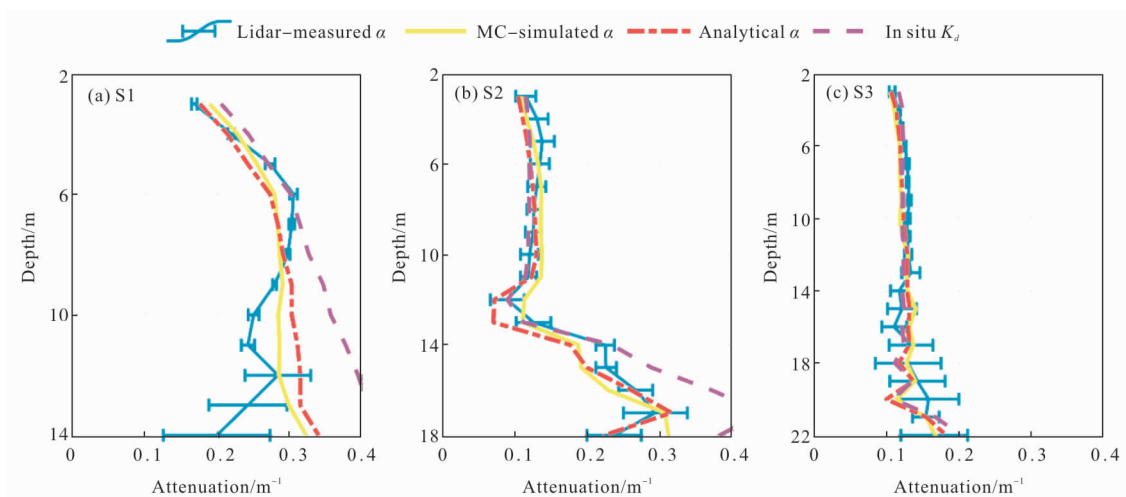


图 4 由实测激光雷达回波信号反演的 α 与 MC 方法、解析模型仿真信号反演的 α , 以及由原位数据计算的 K_d 进行对比
Fig.4 Comparison of α retrieved from experimental lidar signals, α retrieved from simulated signals of MC method and analytical model, and K_d calculated from in situ data

紫色虚线是根据原位仪器数据计算的 K_d 。实测 α 的误差条由图 3 中相应的 10 条激光雷达回波信号计算得到。从图 4 的反演结果中可以发现一些与图 3 密切相关的信息,例如,站点 S1 具有较大的 α 且随着水深的增加而与 K_d 逐渐分离,站点 S2 在 13 m 后逐渐出现一个强层次,站点 S3 的 α 则相对较小。

采用公式(7)表示的相对误差均方根来评价激光雷达衰减系数的校验结果,此时 y_i 为实测激光雷达回波信号反演得到的 α , \hat{y}_i 为 MC 方法和解析模型仿真信号反演得到的 α , 以及由原位仪器数据计算的得到 K_d 。结果列于表 2, δ_1 、 δ_2 、 δ_3 分别为实测数据反演的 α 与 MC 方法和解析模型反演的 α , 以及原位 K_d 进行对比的相对误差均方根。从图 4 和表 2 可见,各站点的激光雷达衰减系数的平均相对偏差均方根小于 19%, 并且其受到深水处大幅波动的影响较大,例如在站点 S1, 实测激光雷达信号反演的 α 与原位仪器数据计算的 K_d 相对误差均方根在 26% 以上。

为了进一步评价激光雷达衰减系数的校验结果,提取站点 S1 水深 3~12 m、站点 S2 水深 3~16 m、站点 S3 水深 3~20 范围内的衰减系数,将 MC- α 、解析 α 、原位 K_d 与实测 α 分别进行线性回归计算,分别得到可决系数 $R_1^2=0.916$ 、 $R_2^2=0.866$ 、 $R_3^2=0.611$, 相对误差均方根 $\delta_1=0.116$ 、 $\delta_2=0.187$ 和 $\delta_3=0.145$ 。 R^2 反应了绝对误差的大小, 其值越接近 1 误差越小; δ 体现的是相对误差的大小, 其值越小相对误差越小。

表 2 实测数据反演的 α 与仿真信号反演的 α 、原位数据计算的 K_d 对比的相对偏差均方根 δ

Tab.2 δ of the α retrieved from experimental data compared with α retrieved from simulated signals and K_d calculated from in situ data

| Station | S1 | S2 | S3 | Average value |
|------------|-------|-------|-------|---------------|
| δ_1 | 0.147 | 0.137 | 0.113 | 0.132 |
| δ_2 | 0.173 | 0.240 | 0.146 | 0.186 |
| δ_3 | 0.267 | 0.171 | 0.127 | 0.188 |

上述结果表明, 实测激光雷达回波信号反演的

激光雷达衰减系数 α 与 MC 方法和解析模型仿真信号反演的衰减系数 α 、以及根据原位仪器数据计算的 K_d 有较好的比对结果。MC 仿真信号反演的 α 与之匹配情况最佳, 在各个场景下具有相对最好的适应能力和抗干扰能力; 解析模型仿真信号反演的 α 与之匹配情况较好, 在浑浊非均匀水体中也具有很好的匹配程度。

3 结 论

文中采用 MC 仿真、解析模型、原位数据三种方法对实验海洋激光雷达回波信号和衰减系数进行了综合对比, 结果具有很好的一致性。原位仪器为海洋激光雷达仿真和反演提供了重要的原始数据, MC 仿真最真实地模拟了激光在海水中的传输过程, 在各类海水情况下具有最佳的仿真准确度, 解析模型能够高效地仿真海洋激光雷达回波信号, 并且可在反演研究中发挥重要作用。

文中的车载激光雷达在对比分析的过程中 α 近似采用了 K_d 。下一步可通过设置不同的接收视场角, 进一步厘清两者的关系。此外, 基于米散射的弹性激光雷达无法在不做假设的条件下独立反演 α 和 β^π , 能够分离米散射和布里渊散射信号的高光谱分辨率激光雷达可以很好地解决这一问题^[12], 是未来海洋激光雷达的重要发展方向。事实证明, 海洋激光雷达能够准确地探测上层海水的信息, 是未来构建海洋三维观测体系的重要支柱。

参考文献:

[1] Dickey T, Lewis M, Chang G. Optical oceanography: recent advances and future directions using global remote sensing and in situ observations [J]. *Reviews of Geophysics*, 2006, 44(1): RG1001.

[2] McClain C R. A decade of satellite ocean color observations [J]. *Annual Review of Marine Science*, 2009, 1(1): 19-42.

[3] Hostetler C A, Behrenfeld M J, Hu Y, et al. Spaceborne lidar in the study of marine systems [J]. *Annual Review of Marine Science*, 2018, 10(1): 121-147.

- [4] Jamet C, Ibrahim A, Ahmad Z, et al. Going beyond standard ocean color observations: lidar and polarimetry [J]. *Frontiers in Marine Science*, 2019, 6: 251.
- [5] James H C. Review of profiling oceanographic lidar [J]. *Optical Engineering*, 2013, 53(5): 051405.
- [6] Behrenfeld M J, Gaube P, Della P A, et al. Global satellite-observed daily vertical migrations of ocean animals [J]. *Nature*, 2019, 576(7786): 257–261.
- [7] Poole L R, Venable D D, Campbell J W. Semianalytic monte carlo radiative transfer model for oceanographic lidar systems [J]. *Applied Optics*, 1981, 20(20): 3653–3656.
- [8] Katsev I L, Zege E P, Prikhach A S, et al. Efficient technique to determine backscattered light power for various atmospheric and oceanic sounding and imaging systems [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1997, 14(6): 1338–1346.
- [9] Liu Z P, Liu D, Xu P T, et al. Retrieval of seawater optical properties with an oceanic lidar [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2019, 23(5): 944–951.
- [10] Liu D, Xu P T, Zhou Y D, et al. Lidar remote sensing of seawater optical properties: experiment and monte carlo simulation [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, 57(11): 9489–9498.
- [11] Zhou Y D, Chen W, Cui X Y, et al. Validation of the analytical model of oceanic lidar returns: comparisons with monte carlo simulations and experimental results [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(16): 1870.
- [12] Zhou Y D, Liu D, Xu P T, et al. Retrieving the seawater volume scattering function at the 180° scattering angle with a high-spectral-resolution lidar [J]. *Optics Express*, 2017, 25(10): 979–993.