

船载激光雷达测量水体光学参数的仿真模拟研究

孔晓娟¹, 刘秉义^{1,2,4}, 杨倩^{3,4}, 李忠平⁴

- (1. 中国海洋大学 信息科学与工程学院 海洋技术系, 山东 青岛 266100;
2. 青岛海洋科学与技术国家实验室区域海洋动力学与数值模拟功能实验室, 山东 青岛 266237;
3. 齐鲁工业大学(山东省科学院) 山东省科学院海洋仪器仪表研究所, 山东 青岛 266001;
4. 美国麻省大学波士顿分校, 美国 马萨诸塞州 02125)

摘要: 激光雷达能够高效获取海洋光学特性的垂直剖面信息, 是海洋光学探测的重要手段之一。利用蒙特卡罗仿真方法, 基于 Gordon(1982)的机载激光雷达测量水体光学参数模型, 研究了船载激光雷达在水中的传输过程和水中光场分布。特别研究考虑了接收视场角和望远镜半径等参数的影响, 建立了适用于船载海洋激光雷达的模拟系统。在激光雷达的传输等效为太阳光传输后, 该模拟系统与常用的 HydroLight 的模拟进行了对比印证并获得了一致的结果。在此基础上, 通过模拟得到的激光雷达回波信号分析了不同激光雷达测量模式及典型水体条件下激光雷达消光系数 α 和海水光学参数之间的关系。船载激光雷达结果表明, 在窄接收视场角情况下, 激光雷达消光系数 α 趋向于水体光束衰减系数 c ; 在宽接收视场角情况下, α 趋近于水体的向下辐照度漫射衰减系数 K_d 。相比机载观测, 船载观测的 α 趋近 K_d 的速度变缓。在垂直分层水体中, 激光雷达在下层水体中测量的 α 值会向上层水体的 α 值偏移。该结果为研究海洋激光雷达测量参数与海洋光学参数之间的关系提供了进一步的认知。

关键词: 海洋激光雷达; 蒙特卡罗模拟; 激光雷达消光系数; 垂直剖面

中图分类号: P714⁺.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA202049.0205010

Simulation of water optical property measurement with shipborne lidar

Kong Xiaojuan¹, Liu Bingyi^{1,2,4}, Yang Qian^{3,4}, Li Zhongping⁴

- (1. Department of Marine Technology, College of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Laboratory for Regional Oceanography and Numerical Modeling, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China; 3. Institute of Oceanographic Instrumentation, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), Qingdao 266001, China;
4. University of Massachusetts Boston, MA 02125, U.S.A.)

Abstract: As an important instrument for optical observation in the water, lidar is able to efficiently obtain vertical profiles of ocean optical properties. Based on the airborne lidar model of Gordon (1982) for measuring water optical property, the processes of shipborne lidar radiative transfer and distribution of underwater light field were investigated using Monte Carlo simulation. In particular, taking into

收稿日期: 2019-10-08; 修订日期: 2019-11-13

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC1400905, 2016YFC1400904)

作者简介: 孔晓娟(1994-), 女, 硕士生, 主要从事水中激光辐射传输模拟方面的研究。Email: xiaojuan_jia@163.com

导师简介: 刘秉义(1980-), 男, 副教授, 博士, 主要从事海洋和大气激光探测方面的研究。Email: liubingyi@ouc.edu.cn

consideration receiving FOV and telescope aperture, a shipborne oceanographic lidar simulator was developed. After lidar radiative transfer was equivalent to solar radiative transfer, the simulator was validated with commonly used HydroLight which showed good coincidence. On this basis, using simulated lidar return signal, the relationships between lidar extinction coefficient α and ocean optical properties were analyzed for different observation modes and typical water bodies. The results of shipborne lidar show that with narrow receiving field of view(FOV), lidar extinction coefficient α is close to beam attenuation coefficient c , and with large receiving FOV, lidar extinction coefficient α gradually approaches to diffuse attenuation coefficient of downwelling irradiance K_d . The extinction coefficient α measured with shipborne lidar approaches to K_d slower than the airborne situation. The results of stratified water show that the α values measured in lower layer water shift towards the α values in upper layer water. The results provide the further understanding for researching the relationship between parameters measured by oceanographic lidar and ocean optical properties.

Key words: oceanographic lidar; Monte Carlo simulation; lidar extinction coefficient; vertical profile

0 引言

激光雷达探测水体光学特性对于海洋环境监测、水下激光通信及海洋激光遥感等许多领域有着十分重要的意义,利用激光雷达探测水体光学参数逐渐成为研究热点。1982年,H. R. Gordon利用蒙特卡罗(Monte Carlo)仿真方法模拟海水辐射传输的过程,分析多次散射的影响,建立激光雷达消光系数 α 与 cr (c 为水体光束衰减系数, r 为海面光斑半径)的关系^[1]。1998年和1999年,Walker和McLean提出的Walker-McLean模型,建立了激光脉冲展宽和多次散射光束扩散的海洋激光雷达方程,描述了不同视场情况下激光雷达消光系数随深度的变化^[2-3]。由于海中激光传输过程受到海水多次散射的影响较为复杂,利用激光雷达回波信号探测海洋光学参数的方法仍然有待进一步研究。文中的主要内容是利用蒙特卡罗仿真模拟方法详细研究在各种激光雷达参数和水体光学参数情况下激光雷达消光系数 α 与水体光学参数的关系。

文中基于海洋激光雷达的系统参数,考虑水中激光传输的多次散射效应,通过模拟激光雷达回波信号,研究水体光学参数的激光雷达测量方法。利用 Monte Carlo 仿真方法,模拟不同水体条件下的光谱特征及水下光场分布特征,建立适用于船载激光雷达的三维水下激光传输的模拟系统,根据激光雷达

回波信号计算激光雷达消光系数 α , 探究 α 与海水光学特性参数的关系。

1 海洋激光雷达仿真模拟方法

1.1 海洋激光雷达方程

激光雷达向水中发射激光脉冲,经过水体散射后,不同光程的光信号先后返回激光雷达接收系统并被接收。根据激光雷达方程,在只考虑单次散射的情况下,海洋激光雷达弹性散射回波信号可以描述为:

$$N(z) = \frac{E_0}{h\nu} T_{\text{atm}}^2 T_{\text{sur}}^2 \frac{A_{\text{rev}}}{(nH+z)^2} \Delta z \beta(\pi, z) \cdot \exp[-2 \int_0^z \alpha(z') dz'] \quad (1)$$

式中: $N(z)$ 为激光雷达接收到的水深 z 处的信号光子数; E_0 为发射激光的单脉冲能量; h 和 ν 分别为普朗克常数和激光频率,其乘积为单光子能量; A_{rev} 为望远镜接收面积; n 为水体折射率; H 为激光雷达高度; T_{atm} 和 T_{sur} 分别为大气透过率和海气界面透过率; Δz 为垂直分辨率; $\beta(\pi, z)$ 为散射角为 π 时深度 z 处的体散射系数; α 为激光雷达消光系数。

激光雷达消光系数 α 在其他文献中也被称为激光雷达衰减系数 K_{lidar} ^[2],或有效衰减系数 K_{eff} ^[4],单位为 m^{-1} ,表示为激光雷达后向散射回波信号的衰减变化。由于多次散射的影响,激光雷达消光系数 α 同时受到水体光束衰减系数、吸收系数和激光雷达接收参数等因素的影响。根据 Walker 和 Mclean 在考虑多

次散射情况下给出的海洋激光雷达模型,激光雷达消光系数 α 与激光雷达接收视场角关系密切:在小视场角接收情况下,在一定深度范围内 α 基本保持不变并趋向水体光束衰减系数 c ;在大视场接收情况下, α 趋近于向下辐照度漫射衰减系数 K_d 。由于激光束在水中传输时存在光束扩散和距离混淆,使用激光雷达方程模拟水中激光传输及计算水体光学参数时会引入一定的误差,仍有必要利用蒙特卡罗仿真模拟进一步研究各种激光雷达参数和水体光学参数情况下激光雷达消光系数 α 与水体光学参数的关系。因此文中基于 Gordon 的机载激光雷达测量水体光学参数的模型^[1],考虑了接收视场角和望远镜半径等参数的影响,建立了适用于船载海洋激光雷达的蒙特卡罗仿真模拟系统。

1.2 蒙特卡罗仿真方法

蒙特卡罗仿真模拟方法将激光传输过程等效为大量独立光子的随机传输过程的叠加,通过模拟大量的单光子随机传输过程,最终叠加得到水中光场分布和激光雷达回波信号,从而分析水中激光传输特性。因为单光子随机传输过程的概率分布函数取决于给定的水体光学参数,所以基于蒙特卡罗仿真方法,通过分析大量光子的随机传输情况的叠加结果,能够更加真实准确地定量分析水中激光的传输特性。文中参考 Gordon 的机载激光雷达模型^[1],考虑了接收视场角和望远镜半径等参数的影响,建立了适用于船载海洋激光雷达的蒙特卡罗仿真模拟系统。

在蒙特卡罗仿真的模拟条件中,假设入射海面为平静无风界面,发射光束为垂直向下、无限细的准直光束,初始位置及方向余弦为 $r=(0,0,0), \Omega_0=(0,0,1)$,其中规定向下的方向为正。在均匀水体中,光子在相邻两次碰撞间的几何路径长度 $s=-\ln(\xi)/c$,其中 ξ 为 $(0,1)$ 内均匀分布的随机数。对于多层光学性质不同的水体,若光子从第 1 层跨越到第 2 层,则 $-\ln(\xi)=s_1c_1+s_2c_2$ 。其中 s_i 和 c_i 分别为第 i 层的几何路径长度和水体光束衰减系数($i=1,2$)。

传统蒙特卡罗仿真方法需要接收大量的光子以产生合适的回波信号,计算耗时较长。因此,为了防止光子被吸收而终止其轨迹,采用统计权值法,利用单次散射率 w_0 对光子能量进行调整,除此之外,采用半分析方法^[5]对传统蒙特卡罗方法进行改进,光子与海水介质碰撞后发生散射,判断光子所处的位

置是否在由接收视场角所决定的作用范围内(如图 1 所示)。若光子不在作用范围内,则继续跟踪光子路径;若光子在作用体积内,则利用折射定律确定连接散射点和探测器中心的路径,并按照解析概率计算直接散射到激光雷达接收器中的能量。其次剩余的光子能量继续进行散射。探测器接收概率为:

$$p(z)=\tilde{\beta}(\theta, z)\frac{A}{n^2(h+d/n)^2}\exp[-c(z)d]T_{\text{atm}}T_{\text{sur}}\omega(z) \quad (2)$$

式中: $\tilde{\beta}(\theta, z)$ 为水深 z 处的散射相函数,可以采用 Fournier-Fornad (FF) 相函数^[6]或 Henyey-Greenstein (HG) 相函数^[7-8]。碰撞后的运动方向通过散射角和方位角来确定,散射角通过散射相函数抽样获得,方位角为 $(0, 2\pi)$ 均匀分布函数的一个抽样值^[9]。 $c(z)$ 和 $\omega(z)$ 分别为水深 z 处的海水衰减系数和权值, $\omega(0)=1, \omega_{n+1}(z)=\omega_n(z)\cdot w_0(z)$, 其中 n 和 $n+1$ 分别为第 n 和 $n+1$ 次散射。

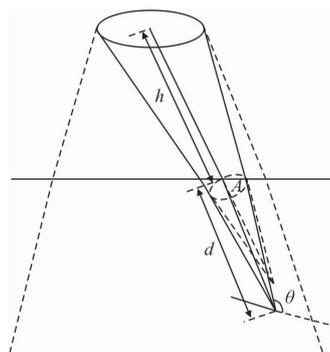


图 1 激光雷达接收几何关系

Fig.1 Lidar receiver geometric model

当光子的纵坐标小于 0 时,表示光子将要离开水体向海面上方传输。此时需要根据临界角,判断光子是否发生全反射。如果发生全反射,则返回海水继续传输,光子权值不变。反之,光子发生折射,根据菲涅耳定律确定海气界面透过率 T_{sur} 。根据折射定律可以求出折射角,并确定出水后光子的方向余弦。当出射角小于接收视场半角时,并且可以入射到探测器的接收面,则说明光子能被接收。

利用上述方法可以仿真模拟激光入射到水体后的传输过程,得到各种水体光学参数情况下的水下光场分布,进而根据设定的激光雷达参数模拟得到水体激光回波信号,并进一步分析激光雷达消光系数 α 与水体光学参数的关系,仿真模拟过程如图 2 所示。

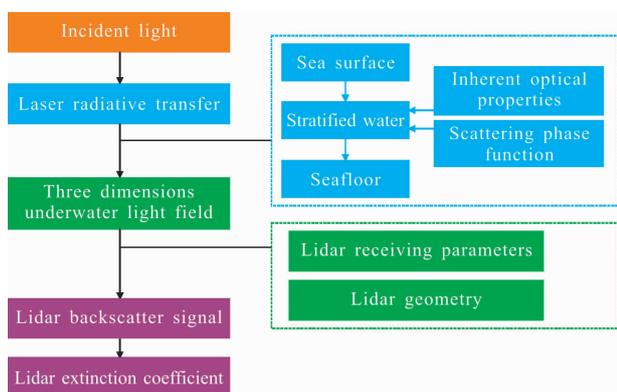


图 2 激光雷达水体光学参数探测的仿真模拟系统框图
Fig.2 Diagram of simulation model for water optical property detection with lidar

2 水中激光辐射传输过程模拟验证

船载激光雷达水中激光传输蒙特卡罗模拟系统的建立, 考虑了激光束入水传输后形成的光场具有三维分布特征, 以及海水组分在垂直方向上的分层情况。基于此模拟系统, 模拟生成并分析激光雷达回波信号, 进而得到海洋激光雷达回波信号与水体光学参数的关系。

2.1 验证海中激光传输机理仿真模拟系统

文中使用 HydroLight 的辐射传输模拟结果作为参考值对船载海洋激光雷达模拟结果进行了验证。考虑到 HydroLight 模拟中的被动探测方式与激光雷达主动探测模式的区别, 为了进行比对验证, 将入射光和水下光场的时间分辨、空间分布分别做了等效。首先将 HydroLight 中的入射光的太阳天顶角设为与激光入射角相同, 并将天空光漫射辐射设为 0, 从而

使主被动测量模式的入射光场完全一致。考虑到被动探测的连续光源与船载激光雷达蒙特卡罗模拟中的脉冲光源的不同, 将脉冲激光产生的时间分辨的回波信号进行时间累加, 等效为连续光产生的信号。另外, 由于激光入水后的水下光场具有水平方向特征, 因此需要在水平方向进行积分, 等效为被动探测模式的漫射光场。

激光在大气的传输过程中, 只考虑由大气分子及气溶胶对光的吸收和散射引起的激光能量的衰减。对于船载激光雷达系统, 由于激光雷达到海面的距离只有几米, 大气的衰减作用通常可以忽略不计。根据菲涅尔反射定律可求得激光在海气界面的透过率为 0.9789。由于 FF 散射相函数与水体颗粒物散射相函数的实测数据最为接近, 因此在此模拟系统中选用 FF 散射相函数。考虑到不同水体中光学特性的差异, 系统验证时设定了三种典型水体类型, 分别为: 清洁海水 ($c=0.2 \text{ m}^{-1}, w_0=0.3, n=1.138, \mu=3.837$)、沿岸海水 ($c=0.4 \text{ m}^{-1}, w_0=0.6, n=1.10, \mu=3.5835$) 和浑浊海水 ($c=2 \text{ m}^{-1}, w_0=0.8, n=1.10, \mu=3.5835$), 其中散射体折射率为 n 和水中散射体尺度分布的特征参数为 μ 。

在以上典型水体情况下, 利用蒙特卡罗仿真模拟水中光传输过程, 得到水中 0.1 m 分辨率的光场分布以及水体表观光学性质。首先将模拟的向下辐照度 E_d 与同样输入条件下的 HydroLight 的 E_d 模拟结果进行了比对, 进而将模拟结果和 HydroLight 的向下辐照度漫射衰减系数 K_d 进行了比对印证。典型水体情况下, 不同入射角时的向下辐照度 E_d 随深度的分布结果如图 3 所示, 向下漫射衰减系数 K_d 的比对结果如表 1 所示。

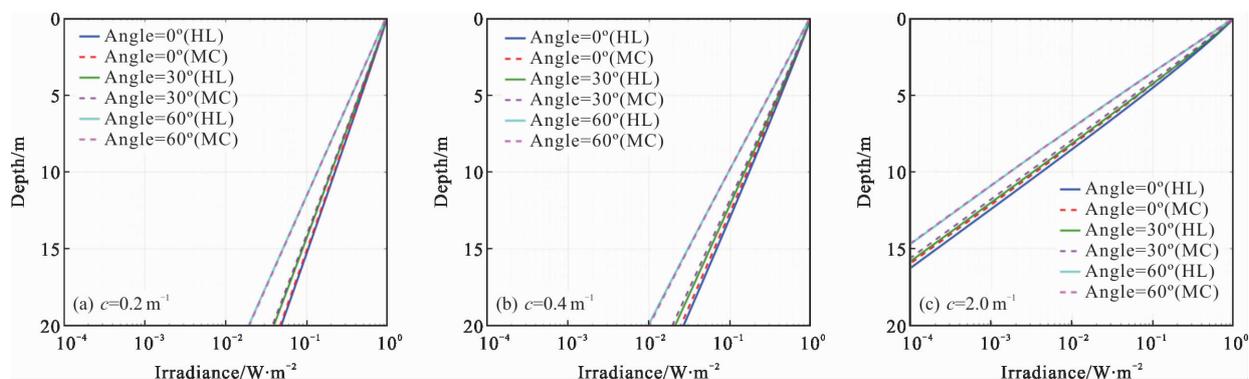


图 3 不同入射角情况下的向下辐照度 E_d 剖面

Fig.3 Downwelling irradiance E_d profile with different incident angles

表 1 向下漫射衰减系数 K_d 比对结果

Tab.1 Comparison of diffuse attenuation coefficient of downwelling irradiance K_d

Incident angle	0°			30°			60°		
	Model/m ⁻¹	HL	MC	Relative error	HL	MC	Relative error	HL	MC
$c=0.2$	0.153 0	0.153 8	0.52%	0.162 9	0.164 3	0.86%	0.195 7	0.194 1	0.82%
$c=0.4$	0.185 0	0.187 6	1.41%	0.196 1	0.198 7	1.33%	0.231 9	0.228 9	1.29%
$c=2.0$	0.556 0	0.568 5	2.25%	0.580 2	0.589 2	1.55%	0.653 2	0.640 8	1.90%

由图 3 可见,相同激光入射角,水体光束衰减系数 c 越大,水体越浑浊,穿透海水深度越浅, E_d 衰减越快, K_d 也越大。另外,向下辐照度漫衰减系数 K_d 不仅依赖于水体光学特性,还与入射光的角度有关。相同水体光学参数,随着激光入射角的增大,同样光强能够到达的海水深度变浅, E_d 衰减速度变快, K_d 相应的增大。蒙特卡罗与 HydroLight 的比对结果非常一致。

由表 1 可见,蒙特卡罗与 HydroLight 的 K_d 模型相对偏差大约在 0.5%~2.2%之间,随着海水浑浊度增加,二者偏差呈增大趋势。文中也将模拟结果与 Z. P. Lee^[10]的 K_d 模型结果进行了对比,由于 Lee 的模型中的入射光包含有天空背景光的贡献,与蒙特卡罗模拟激光入射情况不同,因此相对偏差略大(0.7%~8.6%)。另外,在蒙特卡罗模拟中使用 HG 相函数进行模拟时,与使用 FF 相函数相比,模拟结果的相对偏差小于 3.5%。

表 2 向下漫射衰减系数 K_d 的相对误差

Tab.2 Relative error of diffuse attenuation coefficient of downwelling irradiance K_d

Relative error	HL(FF)	MC(FF)	MC(HG)	Lee
HL(FF)	-	-	-	-
MC(FF)	0.5%~2.2%	-	-	-
MC(HG)	0.6%~2.3%	0~3.5%	-	-
Lee	0.05%~6.55%	0.7%~8.6%	0.06%~7.99%	-

以上对比印证结果表明:基于蒙特卡罗模拟建立的海洋激光雷达传输模拟系统能够准确模拟水下激光辐射传输和水中光场分布,与 HydroLight 的模

拟结果一致,从而验证了船载海洋激光雷达模拟系统,为海洋激光雷达探测海水光学参数提供了仿真数据基础。

2.2 海洋激光雷达探测海水光学参数

在不同光学性质的水体中,由于水体衰减和散射性质的差异,激光束在传输时发生的多次散射有所不同,使得激光回波的衰减速度不同,而激光雷达的接收视场角能够影响接收系统接收到的回波信号中多次散射信号的比例,进而影响激光回波信号的衰减速度,因此激光雷达探测的消光系数除了与水体光学特性相关,还与激光雷达的接收视场角(Field of View, FOV)有关。

模拟时假设激光束垂直入射到水中,并且光学接收望远镜与发射激光束同轴,接收望远镜的高度 H 及望远镜半径 R 为固定值($H=6\text{ m}$, $R=0.15\text{ m}$)。在不同典型水体中,分析了接收视场角 FOV 对激光雷达测量结果的影响。

激光垂直入射时,水中 0.1 m 分辨率的相对能量密度分布情况如图 4 所示。在清洁海水中,激光束的多次散射较少,光束能量较为集中,光束弥散较弱,激光的衰减速度较慢,穿透深度较深;相反,在浑浊海水中,激光束的多次散射明显增多,激光入水后光束能量迅速弥散,激光的衰减速度较快,穿透深度较浅。激光雷达接收到的信号包含光轴上的单次散射信号和光轴外的多次散射信号。其中单次散射信号的贡献不受接收视场角 FOV 的影响,但是对于多次散射信号,由于光束弥散程度的不同,采用不同视场角 FOV 进行接收时,随着 FOV 的增大,接收到的激光回波信号中的多次散射的强度会随之增加。而且由于接收视场限制的存在,激光雷达在不同深度处的光能量的接收效率也不同。

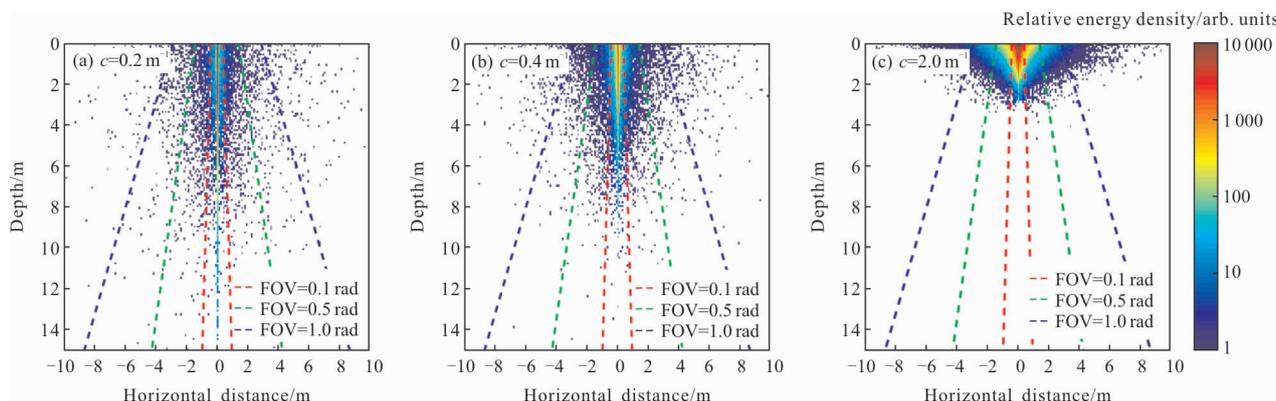


图 4 激光垂直入射时水中激光的相对能量密度分布

Fig.4 Relative intensity distribution of laser beam in water with vertically incident laser

受到传统被动光学遥感机制的限制，目前的水色遥感算法大多基于海水垂直均匀分布假设，与被动水色遥感相比，激光雷达具有探测水体垂直分层结构的优点。因此，文中在均匀水体和垂直分层水体两种情况下研究了激光雷达消光系数与水体光学参数的关系。

均匀水体中的激光雷达回波信号如图 5 所示，在海水光学参数一定的情况下，小视场时回波信号衰减较快，接收视场增大时，由于多次散射和光束扩散等现象导致回波信号的衰减速率减慢。相同接收视场角，随着水体光束衰减系数 c 的增大，海水越浑浊，回波信号衰减越快，探测深度越浅。分层水体中的激光雷达回波信号如图 6 所示，模拟时设定的水体为水平均匀的两层水体，分界深度为 5 m。个例 1 中的上层水体(0~5 m)和下层水体(>5 m)的 c 分别为 0.2 m^{-1} 和 0.4 m^{-1} ，由于在分界深度处光束衰减系数 c 和散射系数 b 同时增大，回波信号会突然增大然后加速衰减。在个例 2 中，上层水体(0~5 m)和下层水体(>5 m)的 c 分别为 0.4 m^{-1} 和 0.2 m^{-1} ，由于在分界深度处光束衰减系数 c 和散射系数 b 同时减小，回波信号会突然减弱，但之后的衰减速度变缓。

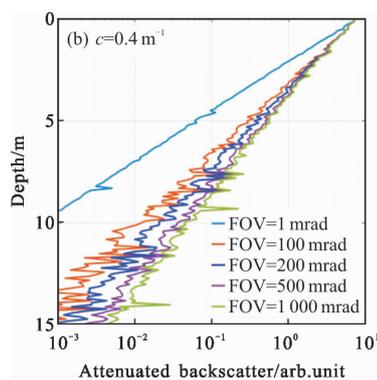


图 5 均匀水体激光雷达回波信号

Fig.5 Lidar backscatter signal of uniform water

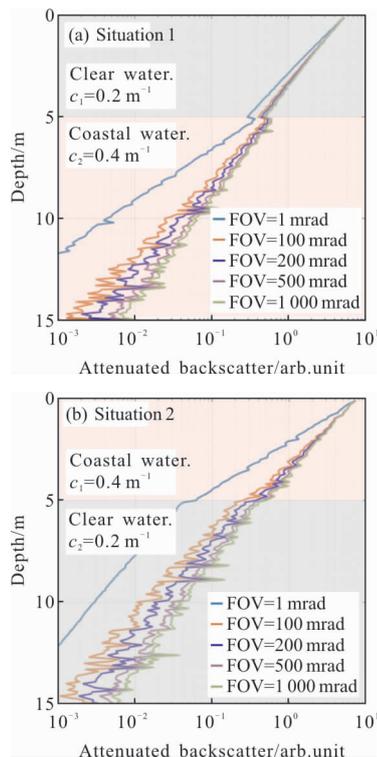
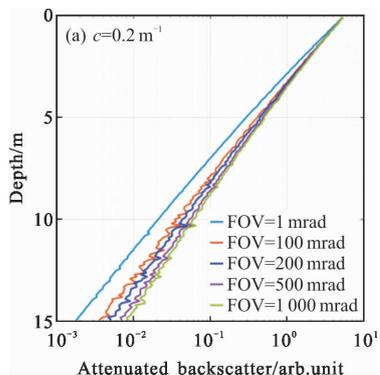


图 6 分层水体激光雷达回波信号

Fig.6 Lidar backscatter signal in stratified water

利用海洋激光雷达回波信号计算的激光雷达消光系数 α 与海水光学参数之间的关系如图 7 和图 8 所示。图 7 中的 3 条曲线分别表示船载激光雷达平台 ($H=6\text{m}, R=0.15\text{m}$, 蓝线)、机载激光雷达平台 ($H=300\text{m}, R=0.05\text{m}$, 紫红线) 和 Churnside^[11] 以 Gordon 的机

载激光雷达回波数据为基础得出的 α 与海水光学参数的关系 ($H=300\text{m}, R=0.05\text{m}$, 紫红线)。图 8 中的 4 条曲线分别表示均匀水体 ($c=0.2\text{m}^{-1}$ 、图 5(a))、均匀水体 ($c=0.4\text{m}^{-1}$ 、图 5(b))、分层水体(上层 $c=0.2\text{m}^{-1}$ 、下层 $c=0.4\text{m}^{-1}$ 、图 6(a))、分层水体(上层 $c=0.4\text{m}^{-1}$ 、下层 $c=0.2\text{m}^{-1}$ 、图 6(b))。

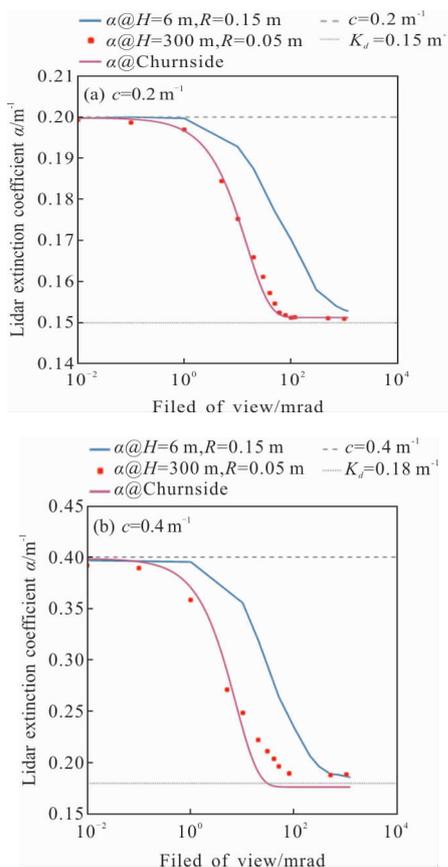


图 7 均匀水体中激光雷达消光系数 α 与海洋光学参数的关系
Fig.7 Relationship between lidar extinction coefficient α and ocean optical properties in uniform water

激光雷达消光系数 α 随着接收视场角的增大而减小。在均匀水体条件下,机载平台的蒙特卡罗模拟结果与 Gordon 和 Churnside 的模拟趋势一致^[1,11]。船载激光雷达系统离海面的高度较小,增大接收视场角后相当于机载平台的海面接收足印,因此船载激光雷达的 α 趋近 K_d 的速度较缓。对于窄接收视场角情况 ($\text{FOV}=1\text{ mrad}$),望远镜接收到的几乎是散射角为 180° 的纯后向散射方向的光子,即单次散射在接收信号中占主导地位(当 $c=0.2\text{m}^{-1}$ 时,单次散射率为 99.87% ;当 $c=0.4\text{m}^{-1}$ 时,单次散射率为 98.91%),所以激光回波的消光系数 α 趋近于水体光束衰减系数 c ;对于宽接收视场角情况 ($\text{FOV}=1\text{ 000 mrad}$),随着探测深度的增加,接收信号中的多次散射信号比例迅速增加,激光信号的衰减主要受到吸收和少部分的散射作用的影响,逐渐趋近于漫射衰减情况,所以激光雷达回波信号的 α 更接近 K_d 。当接收视场角达到一定角度时,此时已经接收到了几乎全部的多次散射信号,回波信号已经达到饱和,故 α 值也会趋于平稳。该模拟结果与 Gordon、Walker 和 McLean 的模拟趋势一致^[1-3]。

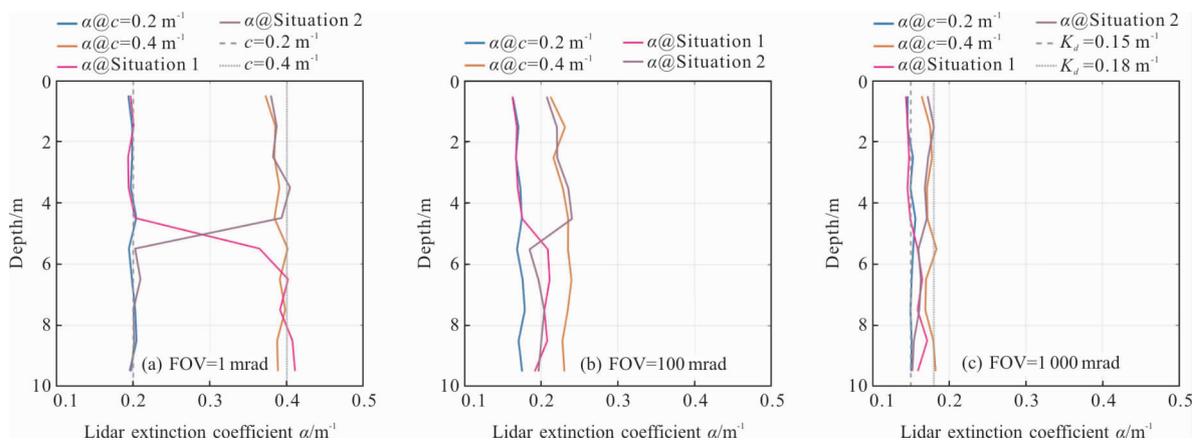


图 8 分层水体中激光雷达消光系数 α 剖面
Fig.8 Lidar extinction coefficient α profile in stratified water

激光雷达消光系数 α 的垂直分布特征受到分层水体光学性质的影响。以双层光学性质不同的水体为例, 根据图 6 中 0.1~1 m 之间的回波信号斜率得出 0.5 m 处的 α , 以此类推, 得到分层水体的 α 剖面, 如图 8 所示。在上层水体中, 激光雷达消光系数 α 与海水光学参数的关系和均匀水体中关系基本相一致。在下层水体中, 当接收视场角很小时(图 8(a)), 接收到的信号几乎全部为单次散射信号, 此时下层水体特性受到上层水体的影响较小, α 值趋近于 c 。随着接收视场的增大(图 8(b)), 接收的多次散射信号增多, 使得下层水体特性受到上层水体特性的影响, 当下层水体较上层水体浑浊时(图 6(a))下层水体的 α 值会比均匀浑浊水体时减小; 反之, 当上层水体较下层水体浑浊时(图 6(b)), 下层水体的 α 值会比均匀清洁水体时增大。当视场角足够大时(图 8(c)), 均匀水体和分层水体中 α 值的差异缩小, 同时趋近与水体漫射衰减系数 K_d 。

3 结 论

文中利用半分析蒙特卡罗仿真方法研究了水中激光传输过程和水中光场分布, 基于 Gordon 的机载激光雷达测量水体光学参数的模型, 考虑了接收视场角和望远镜半径等参数的影响, 建立了适用于船载海洋激光雷达正向辐射传输的模拟系统。将水中激光辐射传输等效为太阳光传输后, 把模拟的向下辐照度漫射衰减系数 K_d 与 HydroLight 的 K_d 结果进行了比对, 两者的相对偏差大约在 0.5%~2.2% 之间, 具有很高的一致性, 从而验证了海洋激光雷达正向传输模拟系统的准确性。在此基础上, 模拟了海洋激光雷达回波信号, 通过分析船载激光雷达视场角与水中光能量分布的几何关系, 解释了激光雷达接收视场角对回波信号的影响。进而, 在均匀水体和垂直分层水体两种情况下, 模拟了各种接收视场角对应的船载海洋激光雷达回波曲线, 并得到了激光雷达消光系数 α 和海水光学参数之间的关系。结果表明, 在窄接收视场角情况下, 激光雷达消光系数 α 趋向于水体光束衰减系数 c 。随着接收视场角的增加, 受到多次散射的影响, 激光雷达消光系数 α 逐渐减小, 最终趋近于向下辐照度漫射衰减系数 K_d 。对于机载

激光雷达, 文中模拟系统结果与 Gordon 和 Churnside 的模拟结果接近; 与机载激光雷达相比, 船载激光雷达距离海面的高度较低, 在较大视场角时其海面接收足印才能与机载系统相当, 因此船载观测的 α 趋近 K_d 的速度较缓。在垂直分层水体中, 激光雷达在下层水体中测量的 α 值会向上层水体的 α 值偏移。该结果为研究海洋激光雷达测量参数与海洋光学参数之间的关系提供了进一步的认知。

参 考 文 献 :

- [1] Gordon H R. Interpretation of airborne oceanic lidar: effects of multiple scattering[J]. *Applied Optics*, 1982, 21(16): 2996-3001.
- [2] Walker R E, McLean J W. Lidar equations for turbid media with pulse stretching [J]. *Applied Optics*, 1999, 38 (12): 2384-2397.
- [3] McLean J W, Freeman J D, Walker R E. Beam spread function with time dispersion [J]. *Applied Optics*, 1998, 37 (21): 4701-4711.
- [4] Feygels V I, Kopilevich Y I, Surkov A I, et al. Airborne lidar system with variable-field-of-view receiver for water optical properties measurement [J]. *Ocean Remote Sensing and Imaging II*, 2003, 5155(1): 12-22.
- [5] 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.
- [6] Mobley C D, Sundman L K, Boss E. Phase function effects on oceanic light fields [J]. *Applied Optics*, 2002, 41 (6): 1035-1050.
- [7] Toublanc D. Henyey-Greenstein and Mie phase functions in Monte Carlo radiative transfer computations [J]. *Applied Optics*, 1996, 35(18): 3270-3274.
- [8] Haltrin V I. Two-term Henyey-Greenstein light scattering phase function for seawater [C]//IEEE 1999 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IGARSS'99, 1999, 99CH36293: 1423-1425.
- [9] Leathers R A, Downes T V, Davis C O, et al. Monte Carlo radiative transfer simulations for ocean optics: a practical guide [R]. Washington: Naval Research Laborator, 2004: 1-50.
- [10] Lee Z P, Du Ke-Ping, Robert Arnone. A model for the diffuse attenuation coefficient of downwelling irradiance [J]. *Geophysical Research*, 2005, 110: C02016.
- [11] James H Churnside. Review of profiling oceanographic lidar [J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(5): 051405.