

# 海洋激光雷达水体光学特性参数反演模型对比及分析

李晓龙<sup>1</sup>, 陈永华<sup>1\*</sup>, 于 非<sup>1</sup>, 姜静波<sup>1</sup>, 贺 岩<sup>2</sup>, 陈卫标<sup>2</sup>, 李 杰<sup>3</sup>

<sup>1</sup>中国科学院海洋研究所, 山东 青岛 266071;

<sup>2</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所空间激光信息传输与探测技术重点实验室, 上海 201800;

<sup>3</sup>国家海洋局第一海洋研究所, 山东 青岛 266061

**摘要** 激光雷达回波中的多次散射量决定了衰减系数  $K_{\text{Lidar}}$ , 从而对水体光学特性参数的反演产生影响。目前的海洋激光雷达理论中, 均以 Walker-McLean 模型和多次前向-单次后向散射模型的公式形式表示多次散射分量。根据水下激光传输机制, 分析了这两种模型中多次散射因子的等效性, 并将其多次散射项进行对比, 讨论了利用这两个模型反演水体光学特性参数的异同。对比两种模型的散射相函数发现, Walker-McLean 模型更符合实测情况; 多次前向-单次后向散射模型适应于前向散射极强的介质。在激光刚进入水体时, 其水体光学特征参数反演值会偏低, 并随着多次散射次数的增加而变得偏高。

**关键词** 海洋光学; 海洋激光雷达; 水体光学特性参数; 多次散射; 散射相函数

中图分类号 P733.3 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201737.1001005

## Comparison and Analysis of Inversion Models for Water Optical Property Parameters by Ocean Lidar

Li Xiaolong<sup>1</sup>, Chen Yonghua<sup>1</sup>, Yu Fei<sup>1</sup>, Jiang Jingbo<sup>1</sup>, He Yan<sup>2</sup>, Chen Weibiao<sup>2</sup>, Li Jie<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao, Shandong 266071, China;

<sup>2</sup>Key Laboratory of Spatial Laser Information Transmission and Detection Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

<sup>3</sup>The First Institute of Oceanography, State Ocean Administration, Qingdao, Shandong 266061, China

**Abstract** The proportion of multiple scattering in the lidar echo determines the attenuation coefficient  $K_{\text{Lidar}}$ , which affects the inversion of the water optical property parameters. At present, the Walker-McLean model and the multiple forward scattering-single backscattering model are both expressed with the formula form to describe multiple scattering components in the theory of ocean lidar. Based on the underwater laser transmission mechanism, the equivalence of multiple scattering factors in these two models is analyzed, and the items involving multiple scattering are compared to discuss the similarities and differences of these inversion models for water optical property parameters. Based on the comparison of scattering phase functions of the two models, it is found that the results obtained based on the Walker-McLean model are more consistent with measured results. Multiple forward scattering-single backscattering model is suitable for medium with strong forward scattering. The inversion value of water optical properties is lower than the actual value when the laser just enters into water, and it gets higher value as the multiple scattering times increase.

**Key words** oceanic optics; ocean lidar; water optical property parameters; multiple scattering; scattering phase function

**OCIS codes** 010.4450; 010.4458; 110.4850

收稿日期: 2017-04-11; 收到修改稿日期: 2017-05-23

基金项目: 国家自然科学基金(61505221)、科技重点专项(2016YFC1402602)、中科院项目(YZ201522)

作者简介: 李晓龙(1985—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事海洋信息探测技术方面的研究。

E-mail: lixiaolong@qdio.ac.cn

\* 通信联系人。E-mail: chen Yonghua@qdio.ac.cn

## 1 引 言

激光雷达主要基于激光后向散射回波的衰减来探测水体光学特性。然而,不同水体对激光传输的散射影响差异较大,这使激光雷达探测水体受到限制。水体光学特性参数反演模型中的多次散射分析,一直是国际上热门的研究课题<sup>[1-4]</sup>。

McLean 等<sup>[5-6]</sup>将激光脉冲展宽引入海洋激光雷达方程中,进一步完善了基于弹性散射的激光与水体相互作用理论,以公式表述了不同视场情况下多次散射对不同深度处激光雷达衰减系数  $K_{\text{Lidar}}$  物理意义的影响。2003 年 Kopilevich 等<sup>[7]</sup>基于 Dolin 散射模型<sup>[8]</sup>提出多次前向-单次后向散射模型,该模型采用小角度近似(SSA)下的多次散射项,基于不同视场建立后向散射方程组,从而可反演得到水体散射系数  $b$ 。2011 年 Montes 等<sup>[9]</sup>基于文献<sup>[4-5]</sup>的分析结果,将激光雷达与光学卫星数据相结合,并对沿岸水域进行分析,从而获得表面水体的散射系数和散射效率。2014 年 Li 等<sup>[10]</sup>结合 Kopilevich 等<sup>[11]</sup>提出的多次散射模型,通过调节激光雷达视场反演了均匀水体中激光波长处均匀水体的吸收系数  $a$ 、衰减系数  $c$  和漫射衰减系数  $K_d$ 。

研究人员在海洋激光雷达模型应用研究过程中发现,利用 SSA 理论得到的多次散射项存在差异,并且采用的散射相函数也各不相同,这必然导致水体中多次散射分布不同。本文通过对比 Walker-McLean 模型和多次前向-单次后向散射模型的多次散射项,分析不同模型下  $K_{\text{Lidar}}$  与水体光学特征参数间的关系,并基于散射相函数分析  $K_{\text{Lidar}}$  变化的物理意义。由于涉及这两种海洋激光雷达模型对比的文献较少,通过比较二者的多次散射项和计算结果,选取有效的、基于多次散射的海洋激光雷达模型,这有利于水体光学特征参数的准确反演。

## 2 基于多次散射机制的海洋激光雷达理论

海洋激光雷达通过测量水体中激光后向散射回波强度的衰减变化,即  $K_{\text{Lidar}}$ ,来反演水体的光学特性。作为一种主动遥感形式,初始光场和接收结构均可以确定,因此, $K_{\text{Lidar}}$ 取决于水体的光学特性,与影响水下光子多次散射-传输过程的参数有关,包括水体吸收、散射及体积散射函数。接收回波  $P_{\text{water}}$  的形式可以描述为<sup>[1]</sup>

$$P_{\text{water}} = \frac{QA_{\text{revr}}T^2(v\tau_d/n)}{2(nH+z)^2}\beta(\pi)\exp(-2K_{\text{Lidar}}z), \quad (1)$$

式中  $Q$  为激光能量, $A_{\text{revr}}$ 为接收视场入瞳面积, $T^2$ 为激光波长在大气中和气海界面的双程衰减, $v$ 为光速, $\tau_d$ 为脉冲宽度, $n$ 为水体折射率, $z$ 为探测深度, $H$ 为激光雷达与水面间的距离, $\beta(\pi)$ 为水体后向散射系数。

### 2.1 Walker-McLean 模型

基于 Lutomirski 等<sup>[12]</sup>对介质中多次散射分布的研究,Walker 和 McLean 将多次散射项引入到海洋激光雷达模型中<sup>[6]</sup>,其多次散射项可描述为

$$\exp(-2K_{\text{Lidar}}z) = \exp(-2az) \times \left\{ \exp(-bz) + [1 - \exp(-bz)] \int_0^\infty \frac{\exp(-a\tau v/n)g(z,\tau)}{1 + \{4z\tau v/(3n)/[\tan^{-2}\theta_{\text{revr}}(H+z/n)^{-2}]\}} d\tau \right\}^2, \quad (2)$$

式中  $g(z,\tau)$ 为对多次散射时间  $\tau$  统计的 Gamma 分布概率密度函数, $2\theta_{\text{revr}}$ 为视场角(FOV)。 $g(z,\tau)$ 可表示为

$$g(z,\tau) = \frac{\mu}{\sigma^2\Gamma(\mu^2/\sigma^2)} \left(\frac{\mu\tau}{\sigma^2}\right)^{\mu^2/\sigma^2-1} \exp\left(-\frac{\mu\tau}{\sigma^2}\right), \quad (3)$$

式中  $\mu$  和  $\sigma$  分别为  $\tau$  的均值和标准偏差。

$$\frac{\mu}{z/(v/n)} = 1 - \frac{1 - \exp(-bz\vartheta)}{bz\vartheta} \approx \frac{1}{4}bz\langle\Theta^2\rangle - \frac{1}{24}(bz)^2\langle\Theta^2\rangle^2, \quad (4)$$

$$\frac{\sigma^2}{[z/(v/n)]^2} = \frac{2}{3} \frac{\{(\omega^2 - 3\omega\vartheta) [\exp(-bz\vartheta) - 1 + bz\vartheta] + 2\vartheta^2 [\exp(-bz\vartheta) - 1 + bz\omega]\}}{b^2z^2\omega\vartheta^2(\omega - \vartheta)}$$

$$\left[1 - \frac{1 - \exp(-bz\vartheta)}{bz\vartheta}\right]^2 \approx \frac{1}{12}bz\langle\Theta^4\rangle + \frac{1}{24}(bz)^2\langle\Theta^2\rangle^2, \quad (5)$$

式中  $\langle\cdot\rangle$ 代表均方值, $\vartheta=1-\cos\theta$ , $\omega=3/2(1-\cos^2\theta)$ , $\Theta=2\sin(\theta/2)$ ,其中  $\theta$  为散射方向与初始方向的夹

角,  $\overline{\cos \theta}$  为平均散射余弦值。

Walker-McLean 模型的多次散射项中引入了多次散射过程中吸收和时域展宽的影响, 在(2)式的积分项中,  $\exp(-a\tau v/n)$  为散射过程中的吸收,  $g(z, \tau)$  为  $\tau$  的分布,  $4z\tau v/(3n)/[\tan^2\theta_{\text{rcvr}}(H+z/n)^2]$  为视场接收范围内多次散射传输引起的展宽项。该模型通过  $\tau$  的统计积分来表述传输过程中的衰减。

### 2.2 多次前向-单次后向散射模型

基于 Dolin-Levin 模型<sup>[8]</sup>推导, Kopilevich 等<sup>[7]</sup>提出多次前向-单次后向散射模型, 其表达式为

$$\exp(-2K_{\text{Lidar}}z) = \exp[-2(a + b_b)z]F(z), \quad (6)$$

式中  $b_b$  为后向散射系数;  $F(z)$  为多次散射项, 可表示为

$$F(z) = m\psi \exp(-2b_f z) \int_0^\infty (x + \sqrt{1+x^2})^{\frac{2b_f z}{x}} \times \exp\left[-\frac{x^2 m^2}{4} \left(\frac{r_{\text{las}}^2 + R_{\text{rcvr}}^2}{z^2} + \Lambda^2\right)\right] J_1(mx\psi) dx, \quad (7)$$

式中  $b_f$  为前向散射系数;  $J_1(\cdot)$  为 1 阶贝塞尔函数;  $\psi = \theta_{\text{rcvr}} \frac{nH+z}{nz}$ ;  $\Lambda = \theta_{\text{las}} \frac{nH+z}{nz}$ ;  $r_{\text{las}}$  和  $R_{\text{rcvr}}$  分别为探测激光束和望远镜接收通光面的半径;  $x = \kappa z/m$ ,  $\kappa$  为极坐标中位置向量  $\boldsymbol{\rho}$  经傅里叶变换后的空间频率;  $m$  为小角度散射情况下的特性参数, 可表示为

$$m = (0.142 - 0.132 \overline{\cos \theta})^{-1/2}. \quad (8)$$

该模型突出了水体体积散射函数的前向性, 并考虑了高斯函数与辐射传递函数卷积计算中的多次散射积分形式。

### 2.3 模型化简

为了直观地比较海洋激光雷达模型的物理参量, 将其多次散射项表示为

$$F(z) = m\psi \exp(-2b_f z) \int_0^\infty (x + \sqrt{1+x^2})^{\frac{2b_f z}{x}} \times \exp\left[-\frac{x^2 m^2}{4} \left(\frac{r_{\text{las}}^2 + R_{\text{rcvr}}^2}{z^2} + \Lambda^2\right)\right] J_1(mx\psi) dx = \exp(-2b_f z) \left\{ 1 + [\exp(bz) - 1] \int_0^\infty \frac{\exp(-a\tau v/n) g(z, \tau)}{1 + \{4z\tau v/[3n \tan^2\theta_{\text{rcvr}}(H+z/n)^2]\}} d\tau \right\}^2, \quad (9)$$

这里可将参数  $m$ ,  $\overline{\cos \theta}$  和  $\overline{\cos^2 \theta}$  视为多次散射因子。将(3)~(5)、(8)式代入(9)式, 计算得到多次散射项取决于水体的固有散射特性, 即  $\overline{\cos \theta}$  和  $\overline{\cos^2 \theta}$ 。而多次前向-单次后向散射模型中, 多次散射项仅取决于  $\overline{\cos \theta}$ 。

## 3 模型对比

### 3.1 多次散射因子对比

由(9)式可知, 两种模型在采用的多次散射因子方面并不统一, 多次前向-单次后向散射模型中仅涉及  $\overline{\cos \theta}$ 。而多次散射过程中,  $\overline{\cos \theta}$  与  $\overline{\cos^2 \theta}$  没有直接的公式关系, 根据 Lutomirski 等<sup>[12]</sup>基于 SSA 对介质中光子多次散射传递的分析, 可得到近似关系为

$$\overline{\cos \theta} \approx 1 - \frac{1}{2} \langle \theta^2 \rangle, \quad (10)$$

$$\overline{\cos^2 \theta} \approx 1 - \langle \theta^2 \rangle. \quad (11)$$

该近似关系满足云气溶胶散射特性 ( $\overline{\cos \theta} = 0.85$ ,  $\overline{\cos^2 \theta} = 0.70$ ) 以及前向性强的散射颗粒特性 ( $\overline{\cos \theta} = 0.995$ ,  $\overline{\cos^2 \theta} = 0.990$ )<sup>[12]</sup>。

根据(8)式,  $m$  值越大,  $\overline{\cos \theta}$  值越大, 水体中前向散射越强。利用(8)、(10)和(11)式可得

$$\overline{\cos^2 \theta} = \frac{0.152 - 2m^{-2}}{0.132}. \quad (12)$$

根据 Kopilevich 等<sup>[7,13]</sup>的结论, 选取  $m$  的取值范围为 6~8, 则  $\overline{\cos \theta}$  在 0.865~0.957 范围内。Walker-McLean 模型中采用 Mobley 测量海水散射的经验值<sup>[14]</sup>, 即  $\overline{\cos \theta} = 0.9247$ ,  $\overline{\cos^2 \theta} = 0.9083$ , 对应  $m = 7.0818$ 。因此, 这两种模型对应的介质散射特性参数的取值范围一致。

### 3.2 多次散射项对比

为了实现对水体光学特征参数的准确反演,两种模型都需要在不同视场下构建方程组进行计算,因此海洋激光雷达模型中多次散射项的具体形式极其重要。根据(9)式,两种模型均可采用多次散射项  $F(z)$ 。以典型的沿岸海水为例,激光雷达探测结构的其他参数为:望远镜口径为 0.2 m,光束发散角近似为  $0^\circ$ ,出射光斑直径为 4 mm,距水面的高度分别为 10 m 和 300 m,且垂直入射。典型沿岸海水的光学特性参数为: $a = 0.179 \text{ m}^{-1}$ ,  $b = 0.219 \text{ m}^{-1}$ ,  $b_b = 0.00285 \text{ m}^{-1}$ ,  $K_d = 0.207 \text{ m}^{-1}$ ,  $\overline{\cos \theta} = 0.9247$ ,  $\overline{\cos^2 \theta} = 0.9083$ 。

两种模型中  $F(z)$  的变化如图 1 所示,其中图 1(a)、(b) 分别为多次前向-单次后向散射模型在探测高度为 10 m 和 300 m 的情况,图 1(c)、(d) 为 Walker-McLean 模型在探测高度为 10 m 和 300 m 的情况,且所选取的 FOV 均采用 Feygels 等<sup>[15]</sup> 讨论多次前向-单次后向散射模型时的取值。由图 1 可以看出,随着探测深度的增加,  $F(z)$  逐渐趋近于 0。光束在水体中的传输距离越长,多次散射几率越高,后向散射中多次散射的比重越大,则散射引起的衰减越弱,这确定了  $F(z)$  表征前向衰减变化的物理意义。另外,激光雷达距水面高度越低,  $F(z)$  衰减越快。同样, FOV 越小,  $F(z)$  衰减越快。由于  $H$  和  $2\theta_{\text{rcvr}}$  的大小均限制了水体中多次散射信号的接收。基于 SSA 的合理性,可得激光雷达有效接收场在不同水层的覆盖面越小,较深水层的多次散射增量越大,即  $F(z)$  衰减越快。

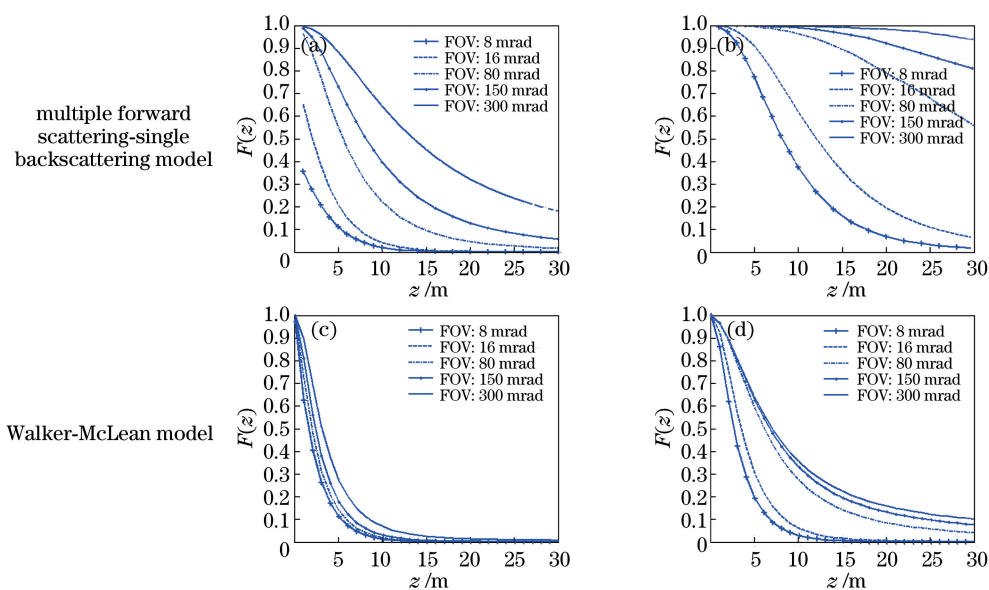


图 1 海洋激光雷达模型中  $F(z)$  的变化对比。(a)(c) 探测高度为 10 m; (b)(d) 探测高度为 300 m  
Fig. 1 Comparison of  $F(z)$  changing in two ocean lidar models. (a)(c) Detection height is 10 m;  
(b)(d) detection height is 300 m

相对于多次前向-单次后向散射模型, Walker-McLean 模型中的  $F(z)$  较快地趋近于 0, 这说明采用该模型中的  $F(z)$  形式所计算的多次散射增量较大。对比两种模型可得, Walker-McLean 模型中  $F(z)$  随视场的变化较小。相对而言, Walker-McLean 模型中视场增大而造成的多次散射增量较小。

### 3.3 $K_{\text{Lidar}}$ 反演值对比

图 2 为探测高度为 10 m 情况下, 两种海洋激光雷达模型  $K_{\text{Lidar}}$  反演随 FOV 的变化。图 2(a) 为利用多次前向-单次后向散射模型反演的结果, FOV 为 8 mrad 时  $K_{\text{Lidar}}$  值接近于  $c$  ( $0.398 \text{ m}^{-1}$ ); FOV 为 300 mrad 时  $K_{\text{Lidar}}$  值由  $a$  逐渐趋近于  $K_d$ 。对于 Walker-McLean 模型[图 2(b)], FOV 为 8 mrad 时  $K_{\text{Lidar}}$  值更接近于  $c$ ; FOV 为 300 mrad 时  $K_{\text{Lidar}}$  先增大后逐渐减小并趋近于  $K_d$ , 且在探测深度为 5 m 处出现极大值。

对比两种模型发现: FOV 小于 8 mrad 时, 在探测深度小于 15 m 的范围内, Walker-McLean 模型的  $K_{\text{Lidar}}$  值相对较大; FOV 大于 80 mrad 时, 当深度增大至 25 m, Walker-McLean 模型的  $K_{\text{Lidar}}$  值相对较小。该结果表明: 相对于多次前向-单次后向散射模型, Walker-McLean 模型在激光刚进入水体时的  $K_{\text{Lidar}}$  反演值更为准确, 随着传输距离的增加, 两种模型的  $K_{\text{Lidar}}$  反演值逐渐趋于一致, 但 Walker-McLean 模型反演  $K_{\text{Lidar}}$  值

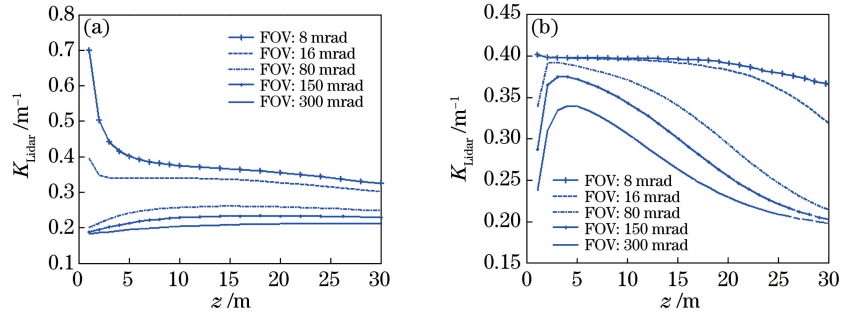


图 2 探测高度为 10 m 时  $K_{\text{Lidar}}$  随 FOV 的变化对比。(a)多次前向-单次后向散射模型;(b) Walker-McLean 模型

Fig. 2 Comparison of  $K_{\text{Lidar}}$  changing with FOV under the detection height of 10 m.

(a) Multiple forward scattering single-backscattering model; (b) Walker-McLean model

的趋势更符合多次散射增量的物理解释。

另外,在 FOV 为 8 mrad 的情况下,对不同探测高度下两种模型的  $K_{\text{Lidar}}$  反演值进行比较,如图 3 所示。视场固定不变而探测高度变化情况下的  $K_{\text{Lidar}}$  值变化趋势与探测高度不变而视场变化情况下的  $K_{\text{Lidar}}$  值变化趋势具有一致性。探测高度为 10 m 时,  $K_{\text{Lidar}}$  值趋于  $c$ , 随着探测高度的增加,  $K_{\text{Lidar}}$  值趋于  $K_d$ 。随着探测高度的增加,即多次散射次数增加,相对于多次前向-单次后向散射模型, Walker-McLean 模型的多次散射增量较小,在探测高度为 300 m 时可以看出明显的区别。

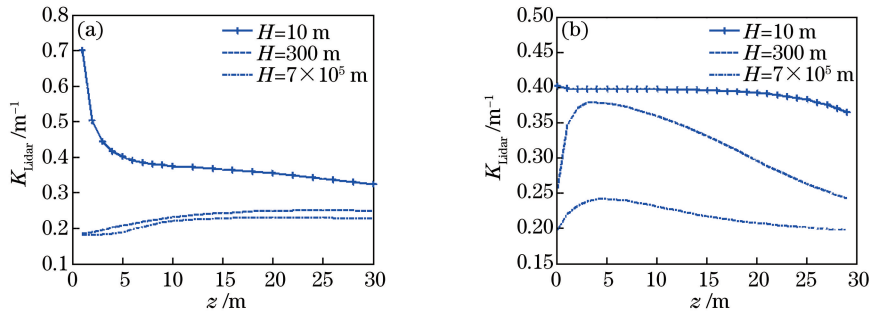


图 3 FOV 为 8 mrad 情况下  $K_{\text{Lidar}}$  随  $H$  的变化对比。(a)多次前向-单次后向散射模型;(b) Walker-McLean 模型

Fig. 3 Comparison of  $K_{\text{Lidar}}$  changing with  $H$  when FOV is 8 mrad.

(a) Multiple forward scattering-single backscattering model; (b) Walker-McLean model

## 4 模型应用分析及讨论

### 4.1 散射机制讨论

由图 2 和图 3 可知,基于多次前向-单次后向散射模型和 Walker-McLean 模型反演的  $K_{\text{Lidar}}$  值的变化趋势基本一致,但两种模型的准确计算值仍存在差异。海洋激光雷达方程中,多次散射项涉及水体体积散射相函数  $\tilde{\beta}(\theta)$  的具体形式,即决定了光子在水体中的散射分布。

由 Petzold 实测的不同自然水体在波长 514 nm 处的体积散射相函数  $\tilde{\beta}(\theta)$ <sup>[14,16]</sup> 呈勺形,如图 4 所示,即具有强前向性特点。角度很小时,  $\tilde{\beta}(\theta)$  变化较小;大角度情况下(约为 100°)  $\tilde{\beta}(\theta)$  出现最小值,而且不同海水的  $\tilde{\beta}(\theta)$  随角度的变化趋势基本一致。

Walker-McLean 模型的体积散射相函数形式为<sup>[5]</sup>

$$\tilde{\beta}(\theta) = \frac{1}{1 - \exp[-(2/\Theta_0)^{1/2}]} \times \frac{\exp[-(\Theta/\Theta_0)^{1/2}]}{4\pi(\Theta/\Theta_0)^{3/2}\Theta_0^2}, \quad (13)$$

式中  $\Theta_0 = 2\sin(\theta_0/2)$ ,  $\theta_0$  为典型散射角。根据 Mobley 的研究<sup>[14]</sup>,海水典型散射平均余弦取  $\overline{\cos \theta} = 0.9247$ ,  $\overline{\cos^2 \theta} = 0.9083$ ,得到  $\theta_0 \approx 0.13$  rad。  $\tilde{\beta}(\theta)$  的分布如图 5 所示,将其与 Petzold 实测沿岸海水和港口水的均值

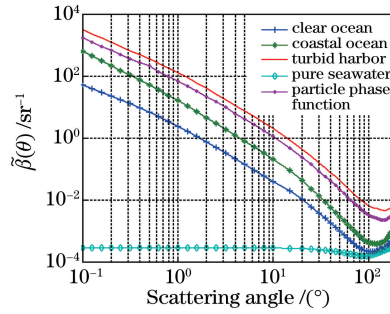


图 4 Petzold 实测不同自然水体的散射相函数

Fig. 4 Measured scattering phase functions of different natural waters by Petzold

进行比较,得到 \$\tilde{\beta}(\theta)\$ 与均值后的散射分布基本吻合。

多次前向-单次后向散射模型中,散射分布取决于参数 \$m\$,其体积散射相函数形式为<sup>[8,11]</sup>

$$\tilde{\beta}(\theta) = \frac{m}{2\pi\theta} \exp(-m\theta) \quad (14)$$

采用该形式计算时,小角度时散射极强,大角度时散射很弱,如图 6 所示。该体积散射相函数形式适应于前向性极强的介质。此外,由图 6 可以看到,小角度时,\$m\$ 的取值对散射分布的影响不大,而对于大角度的后向散射,散射相函数差别较大。

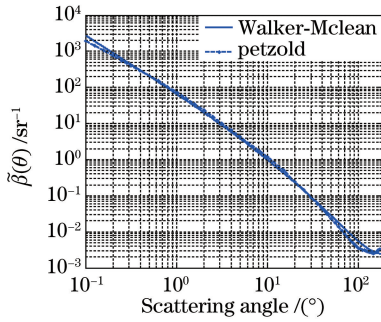


图 5 Walker-McLean 模型散射相函数

Fig. 5 Scattering phase function of Walker-McLean model

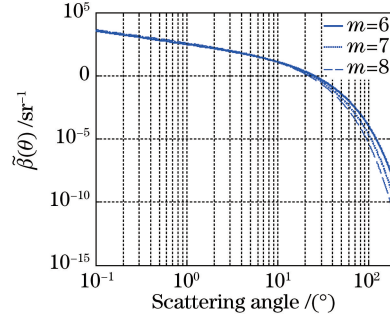


图 6 多次前向-单次后向散射模型散射相函数

Fig. 6 Scattering phase function of multiple forward scattering single-backscattering model

激光刚进入水体时回波中多次散射较少,光束衰减过程仅有散射和吸收,随着探测深度的增加,回波中多次散射的比例增大并产生增量[即 \$F(z)\$],其光场分布取决于 \$\tilde{\beta}(\theta)\$。通过所采用体积散射相函数形式的对比,Walker-McLean 模型对多次散射影响激光雷达衰减系数 \$K\_{\text{Lidar}}\$ 的物理描述更接近于 Petzold 实测情况。

#### 4.2 探测条件因子讨论

结合图 2 和图 3 可知,在激光雷达硬件参数固定的情况下,\$H\$ 和 \$\theta\_{\text{revr}}\$ 是影响 \$K\_{\text{Lidar}}\$ 值的关键条件,因此,将 \$H \times \theta\_{\text{revr}}\$ 视为探测条件因子,其单位为 \$\text{m} \times \text{rad}\$。图 7 为利用 Walker-McLean 模型模拟得到的不同探测深

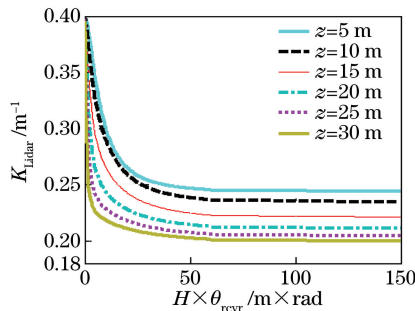


图 7 不同探测深度处 \$K\_{\text{Lidar}}\$ 随 \$H \times \theta\_{\text{revr}}\$ 变化

Fig. 7 \$K\_{\text{Lidar}}\$ versus \$H \times \theta\_{\text{revr}}\$ under different detection depths

度处  $K_{\text{Lidar}}$  值随  $H \times \theta_{\text{rcvr}}$  的变化,当  $H \times \theta_{\text{rcvr}}$  趋近于  $0 \text{ m} \times \text{rad}$  时,激光雷达可直接测得水体衰减系数  $c$ ,而当  $H \times \theta_{\text{rcvr}}$  满足有效接收且取得极大值时,  $K_{\text{Lidar}}$  值趋于水体漫射衰减系数  $K_{\text{d}}$ 。当  $H \times \theta_{\text{rcvr}} > 50 \text{ m} \times \text{rad}$  时,不同探测深度处  $K_{\text{Lidar}}$  值的变化均趋于平缓并逐渐减小,且不同水层处的  $K_{\text{Lidar}}$  值随探测深度的增加而减小,呈现出图 7 中近似平行的曲线变化。因此,利用海洋激光雷达探测水体光学特征参数时,将  $H \times \theta_{\text{rcvr}}$  选取在  $0 \sim 50 \text{ m} \times \text{rad}$  的范围内,可获得较为明显的多次散射增量变化,以构建方程组并反演水体光学特征参数。

## 5 结 论

在海洋激光雷达模型中, Walker-McLean 模型和多次前向-单次后向散射模型是应用广泛的两种形式。通过对比两种模型的多次散射项  $F(z)$ , 可以发现激光在水中传输时产生的多次散射增量计算存在差异,由此分析不同模型下  $K_{\text{Lidar}}$  与水体光学特征参数间的关系。两种模型反演得到的水体光学特征参数变化趋势一致,均满足:  $H \times \theta_{\text{rcvr}}$  极大时  $K_{\text{Lidar}}$  值趋近于  $K_{\text{d}}$ , 而  $H \times \theta_{\text{rcvr}}$  极小时  $K_{\text{Lidar}}$  值即为水体衰减系数  $c$ 。利用 Walker-McLean 模型和多次前向-单次后向散射模型分别进行计算,得到  $K_{\text{Lidar}}$  值随探测深度和 FOV 的变化存在较大差异,尤其在探测深度为 5 m 左右。

由于体积散射相函数  $\bar{\beta}(\theta)$  决定了水下光场,这必然导致多次散射分布的不同,进而存在  $K_{\text{Lidar}}$  值的差异。相对于多次前向-单次后向散射模型, Walker-McLean 模型采用的  $\bar{\beta}(\theta)$  形式更接近于 Petzold 实测的自然水体的体积散射分布,因此在实际水体应用中其光学特征参数的反演更为准确。另外,利用模型反演水体光学特征参数时,海洋激光雷达的探测条件因子  $H \times \theta_{\text{rcvr}}$  应选取在  $0 \sim 50 \text{ m} \times \text{rad}$  的范围内。下一步工作中,将通过海洋激光雷达的实际探测数据对模型的可靠性进行进一步的验证。

## 参 考 文 献

- [1] Liu Zhishen, Guan Dinghua. Ocean physics[M]. Jinan: Shandong Education Press, 2004: 315-345.  
刘智深, 关定华. 海洋物理学[M]. 济南: 山东教育出版社, 2004: 315-345.
- [2] Li Kai, Zhang Yongsheng, Liu Xiaodi, *et al.* Study on airborne laser bathymetric system receiver field of view[J]. Acta Optica Sinica, 35(7): 0701005.  
李凯, 张永生, 刘笑迪, 等. 机载激光海洋测深系统接收 FOV 的研究[J]. 光学学报, 2015, 35(7): 0701005.
- [3] Churnside J H. Review of profiling oceanographic lidar[J]. Optical Engineering, 2013, 53(5): 051405.
- [4] Gordon H R. Interpretation of airborne oceanic lidar: Effects of multiple scattering[J]. Applied Optics, 1982, 21(16): 2996-3001.
- [5] McLean J W, Freeman J D, Walker R E. Beam spread function with time dispersion[J]. Applied Optics, 1998, 37(21): 4701-4711.
- [6] Walker R E, McLean J W. Lidar equations for turbid media with pulse stretching[J]. Applied Optics, 1999, 38(12): 2384-2397.
- [7] Kopilevich Y I, Feygels V I, Surkov A I. Mathematical modeling of input signals for oceanographic lidar systems[C]. SPIE, 2003, 5155: 30-39.
- [8] Dolin L S, Levin I M. Theory of underwater vision[M]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1991.
- [9] Montes M A, Churnside J, Lee Z P, *et al.* Relationships between water attenuation coefficients derived from active and passive remote sensing: A case study from two coastal environments[J]. Applied Optics, 2011, 50(18): 2990-2999.
- [10] Li X L, Zhao C F, Liu Z S, *et al.* A study to measure optical properties of waters by oceanographic lidar with variable field-of-view[C]. SPIE, 2014, 9299: 92990V.
- [11] Kopilevich Y I, Kononenko M E, Zadorozhnaya E I. The effect of the forward-scattering index on the characteristics of a light beam in sea water[J]. Journal of Optical Technology, 2010, 77(10): 598-601.
- [12] Lutomirski R F, Ciervo A P, Hall G J. Moments of multiple scattering[J]. Applied Optics, 1995, 34(30): 7125-7136.
- [13] Kopilevich Y I, Surkov A G. Mathematical modeling of the input signals of oceanological lidars[J]. Journal of Optical Technology, 2008, 75(5): 321-326.
- [14] Mobley C D. Light and water: Radiative transfer in natural waters[M]. San Diego: Academic Press, 1994.
- [15] 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[C]. SPIE, 2003, 5155: 12-21.
- [16] Petzold T J. Volume scattering functions for selected ocean waters [M]. San Diego: Scripps Institution of Oceanography, 1972.