

基于 Sahu-Shanmugam 和 Fournier-Forand 体积散射函数的水下激光传输特性分析

李天松^{1,2**}, 高翔^{1,2*}, 周晓燕¹, 阳荣凯²

¹桂林电子科技大学信息与通信学院, 广西 桂林 541004;

²广西精密导航技术与应用重点实验室, 广西 桂林 541004

摘要 结合 Sahu-Shanmugam 和 Fournier-Forand 体积散射函数, 使用蒙特卡罗方法建立水下激光传输信道模型, 利用该模型分析了接收端的光束扩展特性。研究了三种典型水域下, 接收视场角和接收面直径对光束功率密度的影响, 以及不同接收距离下光束功率密度的分布特性。结果表明: 随着水域散射系数的增大和传输距离的增加, 会加剧光束分布扩展; 随着接收面直径的增大, 光束功率密度的变化趋势逐渐减小, 光束功率密度幅值随着接收视场角的增大而增加; 随着传输距离的增加, 光束功率密度分布逐渐离散。这些结果为水下定位或水下接收机等设计提供参考。

关键词 海洋光学; 体积散射函数; 蒙特卡罗法; 海洋信道; 光子统计

中图分类号 TN929.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.030103

Characteristic Analysis of Underwater Laser Propagation Based on Sahu-Shanmugam and Fournier-Forand Volume Scattering Functions

Li Tiansong^{1,2**}, Gao Xiang^{1,2*}, Zhou Xiaoyan¹, Yang Rongkai²

¹*Institute of Information and Communication, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi, 541004, China;*

²*Guangxi Key Laboratory of Precision Navigation Technology and Application, Guilin, Guangxi, 541004, China*

Abstract Combined with Sahu-Shanmugam and Fournier-Forand volume scattering functions, a simulated model of underwater laser transmission channel is built with Monte Carlo method, and the model is used to analyze the beam extension characteristics at the receiving end. The effects of received field of view and the diameter of receiver on the power density of the beam, and the distribution characteristics of beam power density under different receiving distances are studied under three typical waters. The results show: with the increase of scattering coefficient in the water area and the increase of transmission distance, the beam distribution expansion is intensified; with the increase of diameter of receiving surface, the variation trend of the beam power density decreases gradually, and the amplitude of the beam power density increases as the increasing receiving field angle; with the increase of transmission distance, the distribution of beam power density becomes more discrete. The results provide a reference for underwater positioning or underwater receiver design.

Key words ocean optics; volume scattering function; Monte Carlo method; ocean channel; photon statistics

OCIS codes 010.4455; 010.3310; 290.3825; 290.4210

1 引言

目前水下定位方式多数采用声学定位方式, 但声

学通信传输时延大、速率低、定位精度不高, 光通信拥有高传输速率和宽带宽的优势, 为水下定位方式提供了新的方向。其中蓝绿激光通信具有穿透能力强、数

收稿日期: 2019-08-07; 修回日期: 2019-08-15; 录用日期: 2019-08-27

基金项目: 国家自然科学基金(61561014)、广西精密导航技术与应用重点实验室基金(DH201709)、桂林电子科技大学研究生科技创新项目(2018YJCX36)

* E-mail: 2669162635@qq.com; ** E-mail: lts@guet.edu.cn

据率高等优点^[1],适合于水下传输或水下定位。水中的光学性质取决于水中的被溶解物质、悬浮物、矿物质和有机物等水质成分^[2-3],这些成分会对激光水下传输产生一定的影响。水下激光通信中,光在水中的传输过程主要表现为衰减效应,衰减效应包括了吸收效应和散射效应,吸收是能量转换过程,散射是光变更传输方向的过程,散射效应伴有传输光束偏移和光斑扩展等现象^[4],吸收效应会对光子能量产生衰减,对于比较浑浊的水域,传输中的衰减效应也会增加。如今水下激光传输特性的研究大都采用蒙特卡罗方法建立水下激光传输模型。其中体积散射函数反映了水下光子散射后的方向分布情况,直接影响水下激光传输模型的准确性。文献[5]通过米氏散射理论结合蒙特卡罗模型,分析了水体中不同悬浮颗粒的特征对水下激光通信信道的的影响。文献[6]中使用 Henyey-Greenstein 体积散射函数(HG 散射函数),用蒙特卡罗方法建立传输信道模型,得到不同接收距离与接收光功率的规律。文献[7]使用 Fournier-Forand 体积散射函数(FF 散射函数)与 HG 散射函数相结合的方式,分析了在接收空间上不同折射系数和水中粒子浓度对接收光功率的影响。文献[8]主要分析了不同接收孔径的时域脉冲响应。文献[7-8]研究了接收孔径和接收视场角(FOV)下的时域脉冲响应,而未对接收端光束光功率密度分布特性进行详细分析。文献[9]分析了在相同接收范围内光束截面中心位置光功率分布特性。文献[10]分析和计算了散射光强和角度的变化规律。以上文献虽然研究了接收光功率,但使用的 FF 散射函数和 HG 散射函数随散射角的变化趋势与实验测量得到的水域体积散射函数^[11]相比有一定的差距。

本文使用 Sahu-Shanmugam 体积散射函数(SS 散射函数)与 FF 散射函数相结合的方式(FS 散射函数),用蒙特卡罗方法建立水下激光传输模型,通过对比不同体积散射函数对应的时域脉冲效应,验证了 FS 散射函数建立的水下激光传输模型更适用于分析水下激光传输特性。使用该模型,分析三种典型水域的光束扩展特性和传输距离对光束扩展特性的影响。通过统计接收面的光束功率,计算不同传输距离和接收视场角下的光束功率密度,得到不同接收视场角和传输距离下接收面直径对光束功率密度的影响。

2 水下激光传输信道仿真模型

2.1 水体体积散射函数

体积散射函数反映了水下光子散射后的方向分布情况,体积散射函数的选择对于仿真结果的准确性有很大的影响。Petzold^[11]通过抽取部分海水获得有限的真实水域体积散射函数(Petzold 散射函数),文献[12-13]提出使用 HG 散射函数和 FF 散射函数模拟真实水域的 Petzold 散射函数,三种散射函数在港口水域的对数分布如图 1(a)所示,从图中得到 HG 散射函数与 Petzold 散射函数相比差距很大,FF 散射函数^[14-15]在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 范围与 Petzold 散射函数相比有一定差距,但在 $90^\circ \sim 180^\circ$ 角度范围与 Petzold 散射函数比较接近。Sahu 等^[16-17]根据米氏理论,提出一种新的 SS 散射函数,新的 SS 散射函数在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 范围比 HG 散射函数和 FF 散射函数更接近于 Petzold 散射函数,但在 $90^\circ \sim 180^\circ$ 范围没有解析式。因此提出将 FF 散射函数与 SS 散射函数相结合的方式,在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 范围使用 SS 散射函数代替 $0^\circ \sim 90^\circ$ 范围的 FF 散射函数,结合后 FS 散射函数的对数分布如图 1(a)所示。Petzold 等对不同水体的散射分布函数也进行了研究,其中散射分布函数 $\tilde{\beta}(\theta)$ 公式为

$$\tilde{\beta}(\theta) = \int_0^\theta \beta(\theta) \sin(\theta) d\theta, \quad (1)$$

式中, $\beta(\theta)$ 为体积散射函数, θ 为散射角。港口水域四种散射分布函数如图 2 所示。由图 2 可以看出 FS 的散射分布函数与 Petzold 散射分布函数最接近。计算 HG 散射函数、FF 散射函数和 FS 散射函数与 Petzold 散射函数的相关系数,计算公式为^[16]

$$\Delta\tilde{\beta} = 1000 \left[\frac{1}{\theta_2 - \theta_1} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \left(\frac{\tilde{\beta}_{\text{ref}}(\theta) - \tilde{\beta}(\theta)}{\tilde{\beta}_{\text{ref}}(\theta) + \tilde{\beta}(\theta)} \sin \theta \right)^2 d\theta \right]^{0.5}, \quad (2)$$

式中, $[\theta_1, \theta_2]$ 代表计算的散射角范围, $\tilde{\beta}_{\text{ref}}(\theta)$ 代表需要对比的散射函数, $\tilde{\beta}(\theta)$ 为 Petzold 散射函数。由图 2 得到 FS 散射函数与 Petzold 散射函数求出的相关系数最小,对比图 2 和图 1(b)可以发现 FS 散射函数更接近 Petzold 散射函数。

SS 散射函数表示为^[16]

$$\log[\beta_{\text{SS}}(\theta)] = \begin{cases} P_1(\ln \theta)^2 + P_2(\ln \theta) + P_3, & 0.5^\circ \leq \theta < 5^\circ \\ P_1(\ln \theta)^3 + P_2(\ln \theta)^2 + P_3(\ln \theta) + P, & 5^\circ \leq \theta \leq 90^\circ \end{cases}, \quad (3)$$

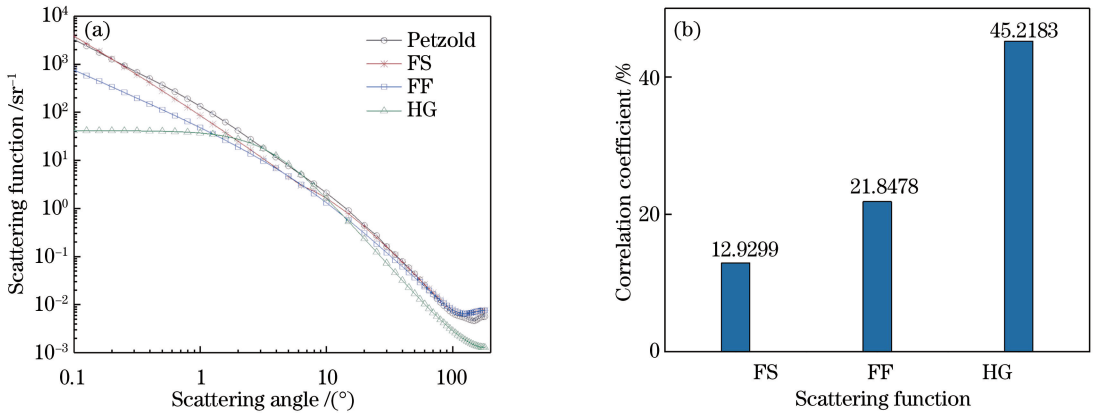


图 1 不同散射函数。(a) 散射函数；(b) 散射函数相关系数

Fig. 1 Different scattering functions. (a) Scattering functions; (b) correlation coefficients of scattering functions

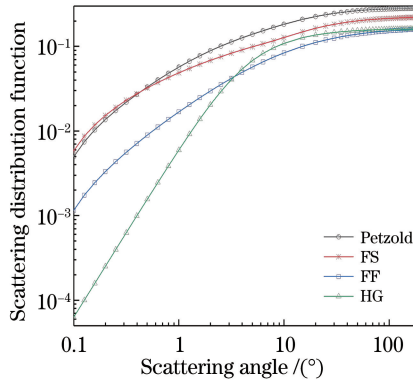


图 2 散射分布函数

Fig. 2 Scattering distribution function

$$P_{\kappa} = a_{\kappa} \exp(-x) + b_{\kappa} + c_{\kappa}, \quad (4)$$

其中,

$$\kappa = \begin{cases} 1, 2, 3 & 0.5^{\circ} \leq \theta < 5^{\circ} \\ 1, 2, 3, 4 & 5^{\circ} \leq \theta \leq 90^{\circ} \end{cases}$$

$$\begin{cases} a_{\kappa} = \frac{d_{\kappa}}{y^2} + e_{\kappa} \sin(4 \times \pi \times y) + f_{\kappa} \cdot y + g_{\kappa} \\ b_{\kappa} = \frac{h_{\kappa}}{y^2} + i_{\kappa} \sin(4 \times \pi \times y) + j_{\kappa} \cdot y + k_{\kappa} \\ c_{\kappa} = \frac{l_{\kappa}}{y^2} + o_{\kappa} \sin(4 \times \pi \times y) + p_{\kappa} \cdot y + q_{\kappa} \end{cases}, \quad (5)$$

$$\begin{cases} x = \xi - 3 \\ y = n - 1 \end{cases}, \quad (6)$$

式中, θ 为散射角, n 为粒子的实折射率, ξ 为粒子尺度分布率, 即双曲线分布斜率参数。具体计算所需参数如表 1 和表 2 所示。

FF 散射函数的计算公式为^[15]

$$\begin{aligned} \beta_{FF}(\theta) = & \frac{1}{4\pi(1-\delta)^2\delta^{\nu}} \{ [\nu(1-\delta) - (1-\delta^{\nu})] + \\ & \frac{4}{\nu^2} [\delta(1-\delta^{\nu}) - \nu(1-\delta)] \} + \\ & \frac{1-\delta_{\pi}^{\nu}}{16\pi(1-\delta_{\pi})\delta_{\pi}^{\nu}} [3\cos^2(\theta) - 1], \end{aligned} \quad (7)$$

式中: $\nu = \frac{3-m}{2}$; $\delta = \frac{\nu^2}{3(n-1)^2}$; $\delta_{\pi} = \frac{4}{3(n-1)^2}$; $\nu =$

表 1 计算 $0.1^{\circ} \leq \theta < 5^{\circ}$ 范围内的散射函数

Table 1 Computing the scattering function in range of $0.1^{\circ} \leq \theta < 5^{\circ}$

κ	d_{κ}	e_{κ}	f_{κ}	g_{κ}	h_{κ}	i_{κ}	j_{κ}	k_{κ}	l_{κ}	o_{κ}	p_{κ}	q_{κ}
1	7×10^{-5}	-0.042	-0.681	0.0800	4×10^{-5}	-0.06	-0.78	-0.03	-1.2×10^{-4}	0.01	0.28	0.04
2	1.9×10^{-5}	-0.144	-0.971	0.0007	1×10^{-5}	0.01	0.29	0.22	-2.1×10^{-4}	0.01	-0.05	-0.62
3	-6×10^{-5}	0.115	3.200	-0.9450	-2×10^{-5}	-0.03	-0.47	-0.66	2.6×10^{-4}	-0.17	-4.06	3.19

表 2 计算 $5^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ 内的散射函数

Table 2 Computing the scattering function in range of $5^\circ < \theta \leq 90^\circ$

κ	d_κ	e_κ	f_κ	g_κ	h_κ	i_κ	j_κ	k_κ	l_κ	o_κ	p_κ	q_κ
1	-0.00223	-0.593	-7.82	1.883	-0.00028	-0.098	-1.076	0.237	0.00084	0.2973	3.147	-0.749
2	0.02009	5.155	70.69	-16.657	0.00272	0.901	10.017	-2.203	-0.00759	-2.7348	-29.650	6.724
3	-0.06150	-14.590	-202.43	47.885	-0.00762	-2.739	-31.139	6.551	0.02182	8.1828	93.450	-21.460
4	0.05488	12.940	185.04	-44.513	0.00778	2.658	30.378	-7.101	-0.02058	-7.7529	-96.290	23.710

$2\sin(\theta/2)$, 其中 m 为散射体尺度特征参量, 取值范围为 $3 \sim 5$, n 为粒子的实折射率, 取值范围为 $1 \sim 1.35$ 。

结合后的 FS 散射函数公式为

$$\beta_{FS}(\theta) = \begin{cases} \beta_{SS}(\theta), & 0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ \\ \beta_{FF}(\theta), & 90^\circ < \theta \leq 180^\circ \end{cases} \quad (8)$$

2.2 蒙特卡罗法模拟光子传输过程

光子在水下受到水中粒子的碰撞或吸收等, 方向会出现随机性的改变, 能量也会出现不定量的损

失。通过实验测量得到的数据虽然可靠, 但是海水环境复杂, 实现困难, 而蒙特卡罗水下激光传输仿真模型已经被证明适合分析和研究水下激光特性^[18-19]。蒙特卡罗水下传输模型仿真流程图如图 3 所示。

仿真模型设定光子发射初始位置为 $(0, 0, 0)$, 规定 z 轴向下为传输的正方向, 使用的激光为高斯光束, 光束初始散射角 $\theta_0 = -r_0/f_1$ 。其中 $f_1 = -W_{wide}/\psi_{div/2}$, W_{wide} 为高斯光束的宽度, $\psi_{div/2}$ 为光束

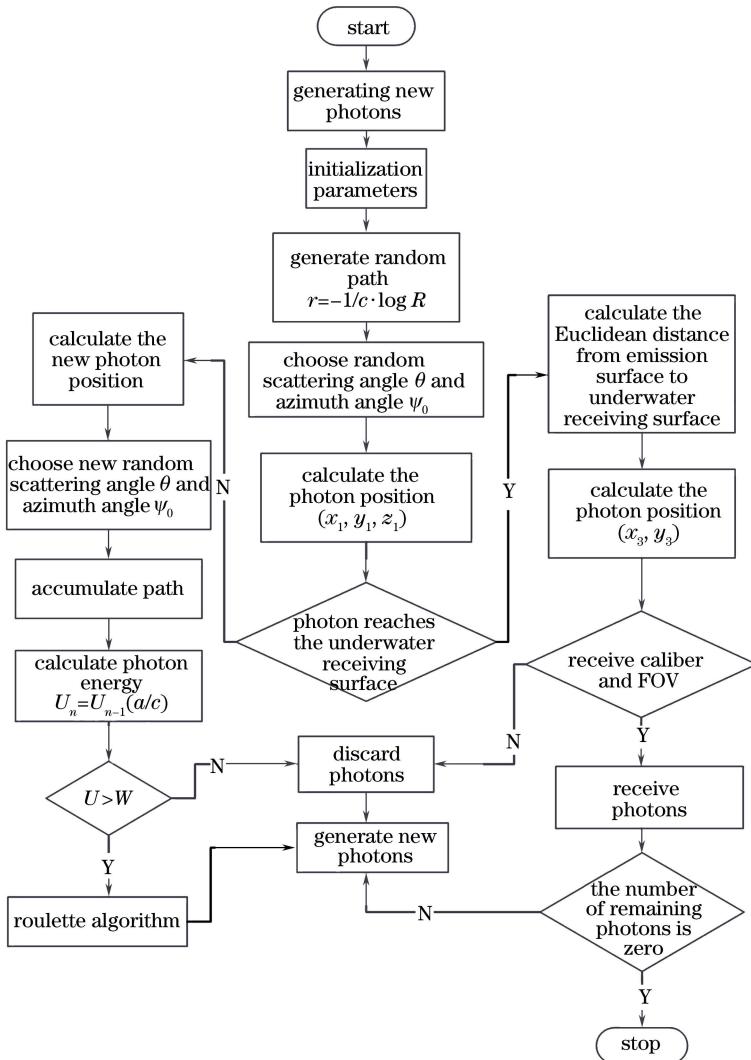


图 3 水下光子传输模拟程序流程图

Fig. 3 Simulation program diagram of underwater photon transmission

发散半角, 激光光束半径采样值 $r_0 = W_{\text{wide}} \times \sqrt{-\ln(1 - X_{\text{rand1}})}$, 光束方位角 $\psi_0 = 2\pi \times X_{\text{rand2}}$, 其中的 X_{rand1} 和 X_{rand2} 为 $0 \sim 1$ 均匀分布的随机数, 通过以上参数可以确定初始横坐标和纵坐标分别为

$$\begin{cases} x_0 = r_0 \times \cos(\psi_0) \\ y_0 = r_0 \times \sin(\psi_0) \end{cases} \quad (9)$$

则初始传输方向矢量表达式为

$$\begin{cases} \mu_x = \sin(\theta_0) \cos(\psi_0) \\ \mu_y = \sin(\theta_0) \sin(\psi_0) \\ \mu_z = \cos(\theta_0) \end{cases} \quad (10)$$

光子在水下的移动包括步长和散射角, 散射角由散射函数决定。光子的散射或吸收影响光子的步长, 水下光子的步长由自由方程的概率分布决定, 表示为

$$P_r(l) = 1 - e^{-l}, \quad (11)$$

式中, $P_r(l)$ 为光子移动的步长分布概率, 是 $0 \sim 1$ 之间均匀分布的随机数。光子的步长公式为 $l = cr$, 其中, c 为水体的衰减系数, r 为散射后的光子位置几何距离, r 的计算公式为

$$r = -1/c \times \ln[P_r(l)]. \quad (12)$$

散射角使用 FS 散射函数计算得到, 散射系数计算公式为

$$b_0 = \int_0^\pi \beta(\theta) \sin(\theta) d\theta. \quad (13)$$

归一化散射分布函数为 $\widetilde{\beta}(\theta) = \beta(\theta)/b_0$, 其中 $\widetilde{\beta}(\theta)$ 为 $0 \sim 1$ 均匀分布的概率函数, 通过数值插值计算方法和指纹法^[20]得到光子传输信道的随机散射角。方位角 $\psi_s = 2\pi \times X_{\text{rand3}}$, 其中 X_{rand3} 为 $0 \sim 1$ 均匀分布的概率函数。

散射角和方位角确定后, 根据原始方向坐标计算散射后的方向坐标 $(\mu_{sx}, \mu_{sy}, \mu_{sz})$, 具体计算公式为

$$\begin{cases} \mu_{sx} = \frac{\sin(\theta)}{\sqrt{1 - \mu_z^2}} [\mu_z \mu_x \cos(\psi_s) - \mu_y \sin(\psi_s)] + \mu_x \cos(\theta) \\ \mu_{sy} = \frac{\sin(\theta)}{\sqrt{1 - \mu_z^2}} [\mu_z \mu_y \cos(\psi_s) - \mu_x \sin(\psi_s)] + \mu_y \cos(\theta) \\ \mu_{sz} = -\sin(\theta) \cos(\psi_s) \sqrt{1 - \mu_z^2} + \mu_z \cos(\theta) \end{cases} \quad (14)$$

当 $\mu_z^2 \approx 1$ 时, 表示散射方向朝向 z 方向, (14) 式可以转换为

$$\begin{cases} \mu_{sx} = \sin(\theta) \cos(\psi_s) \\ \mu_{sy} = \sin(\theta) \sin(\psi_s) \\ \mu_{sz} = (\mu_z / |\mu_z|) \cos(\theta) \end{cases} \quad (15)$$

光子的初始生存权值可以认为是 $U_0 = 1$, 当光子相互作用时, 权值损失系数由衰减系数 c 和吸收系数 A 影响的反照率 a/c 决定, 多次散射后当前光子生存权值为前一个散射状态的光子生存权值乘以反照率, 既 $U_n = U_{n-1} (a/c)$ 。

光子在水中传输时, 因为粒子的散射和吸收, 会有一部分粒子因为方向的偏离和能量的损耗最终不能传输到接收端。通过多次散射模拟仿真, 当生存权值小于设定的光子权重设定阈值 W 时, 判定为光子被完全吸收, 终止光子的接收。通过统计大量光子在接收平面的光子位置 (x_3, y_3) 和接收端接收光功率, 得到接收端光束扩展特性和光束功率密度分布特性。

3 仿真结果分析

整个仿真过程采用波长为 532 nm、光束宽度为 2 mm、初始光束发散角为 1.5 mrad 的高斯光束轮廓的激光发射器模型, 仿真使用的光子数目为 10^7 , 整个过程支持 10 以上散射次数, 光子传输方向沿 z 轴正方向, 接收机位于 $z = 12$ m 平面内, 接收机口径为 56 cm。水下传输环境分别选取清澈海水、沿海水域和港口水域三种典型水域, 三种典型水域参数如表 3 所示^[21]。

表 3 信道仿真参数

Table 3 Channel simulation parameters

Water type	Scattering parameter	Attenuation parameter
Clear seawater	0.037	0.151
Coastal water	0.219	0.398
Harbor water	1.824	2.190

仿真过程中三种水域的接收视场角为 90° , 统计接收面直径在 10 m 范围内的光子, 水下传输模型使用四种散射函数生成的归一化散射分布数据计算散射角, 得到不同散射函数生成的时域脉冲响应分布。图 4 所示为不同散射函数生成的时域脉冲响应, 可以看到在港口水域和沿海水域 FS 散射函数与 Petzold 散射函数生成的时域脉冲响应高度吻合, FF 散射函数和 HG 散射函数与 Petzold 散射函数相比有一定的差距, 港口水域差距最明显。因清澈海水散射系数小, 传输过程中水体粒子与光子相互作用的概率小, 造成三种散射函数生成的时域脉

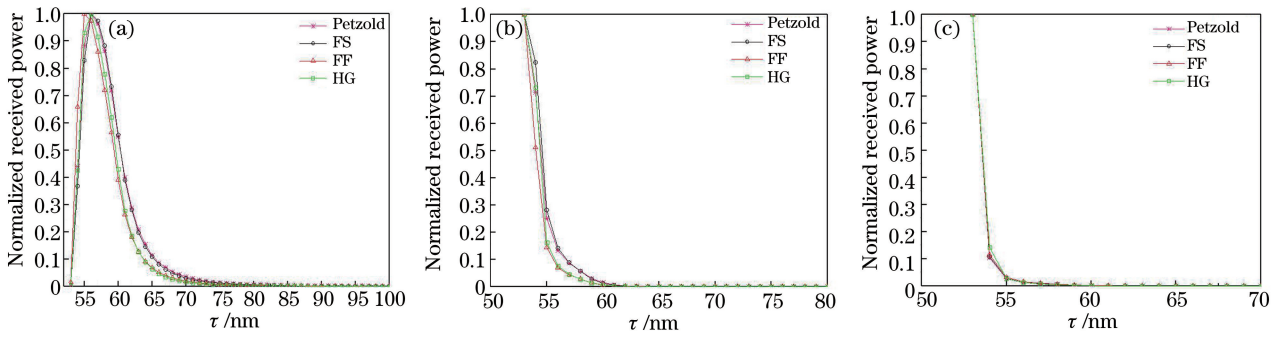


图 4 三种典型水域时域脉冲响应。(a)港口水域时域脉冲响应;(b)浅水水域时域脉冲响应;(c)清澈海水水域时域脉冲响应

Fig. 4 Time domain impulse responses in three typical waters. (a) Time domain impulse response in harbor water;

(b) time domain impulse response in coastal water; (c) time domain impulse response in clear seawater

冲响应与 Petzold 散射函数生成的时域脉冲响应基本相同。实验仿真得到 FS 散射函数建立的水下激光传输模型适用于分析水下激光传输特性。

图 5~7 是以三种典型水域为背景,接收机分别位于 $z=9\text{ m}$ 、 $z=12\text{ m}$ 、 $z=15\text{ m}$ 的接收位置,使用 FS 散射函数建立的水下传输模型,其中散射角范围为 $0^\circ\sim 180^\circ$,散射角取值间隔为 0.001° ,获取在相同接收视场角为 16° 内,接收面直径在 20 m 范围内的光子,并通过计算光子与光束截面法线的距离得到的光束分布亮度图,图中(a)、(b)、(c)三种类型分别

代表接收的位置为 $z=9\text{ m}$ 、 $z=12\text{ m}$ 、 $z=15\text{ m}$ 。表 4 为接收面直径在 6 m 内的光子分布概率。通过图 5 和表 4 的分析得到,光束分布特性与传输距离和传输水域的散射效应有关,其中在相同水域的背景下,随着传输距离的增加,光束分布逐渐分散。相同传输距离下,不同水域的光束分布特性不同,清澈水域的光子分布比较集中,沿海时域的光束分布比清澈海水分散,港口水域的光束分布最分散,传输水域的散射系数反映水域的散射效应,散射系数越大,光束扩展越严重。

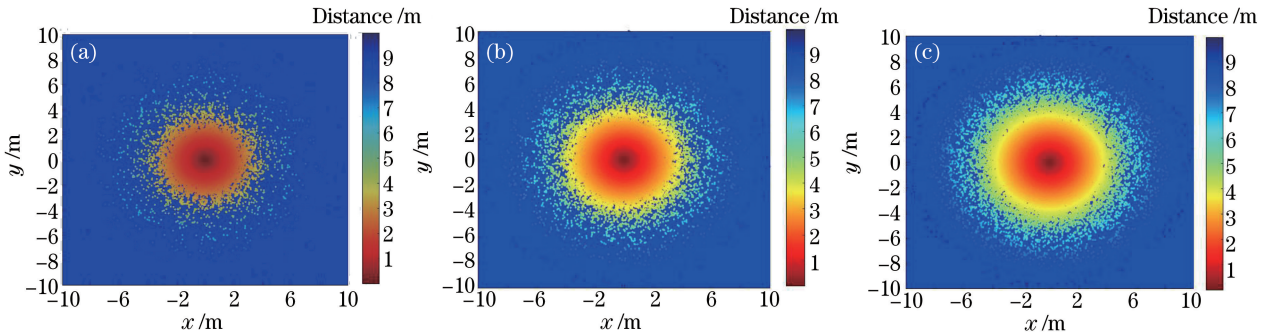


图 5 清澈海水水域接收面光束分布图。(a) $z=9\text{ m}$; (b) $z=12\text{ m}$; (c) $z=15\text{ m}$

Fig. 5 Beam distribution on the receiving surface of clear seawater. (a) $z=9\text{ m}$; (b) $z=12\text{ m}$; (c) $z=15\text{ m}$

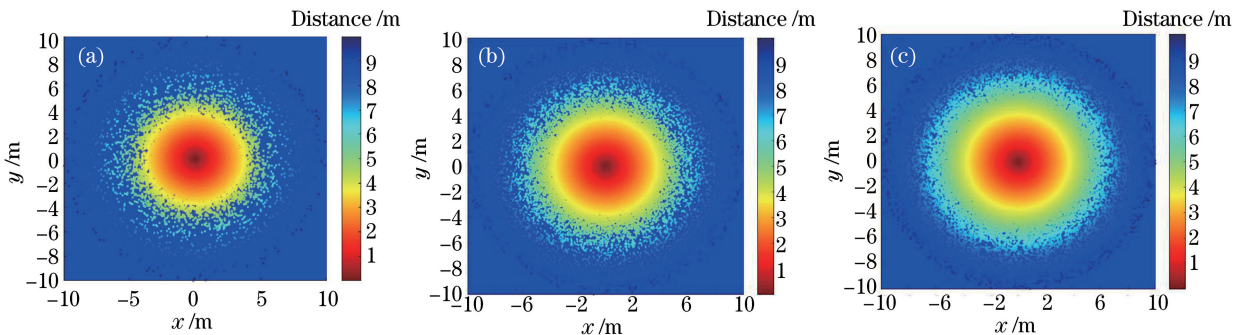


图 6 浅水水域接收面光束分布图。(a) $z=9\text{ m}$; (b) $z=12\text{ m}$; (c) $z=15\text{ m}$

Fig. 6 Beam distribution of receiving surface in coastal water. (a) $z=9\text{ m}$; (b) $z=12\text{ m}$; (c) $z=15\text{ m}$

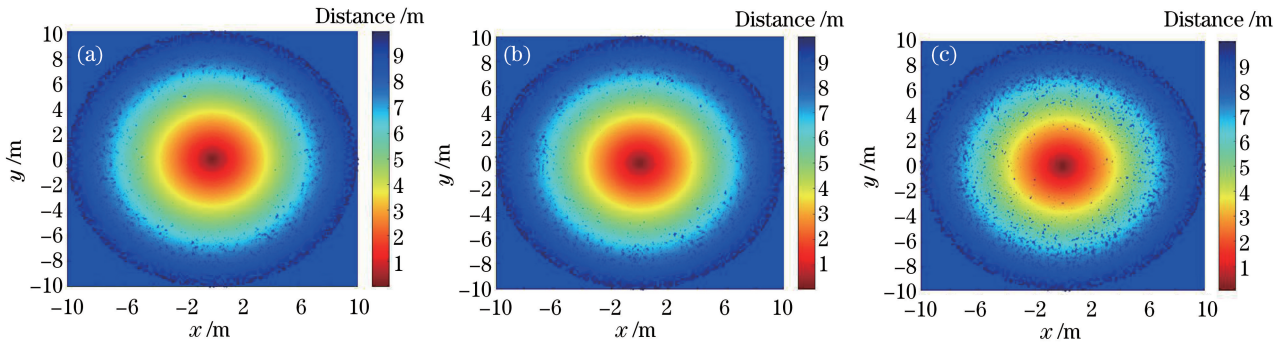


图7 港口水域接收面光束分布图。(a) $z=9\text{ m}$; (b) $z=12\text{ m}$; (c) $z=15\text{ m}$

Fig. 7 Receiving surface beam distribution in harbor water. (a) $z=9\text{ m}$; (b) $z=12\text{ m}$; (c) $z=15\text{ m}$

表4 接收面直径为6 m内的光束分布概率

Table 4 Beam distribution probability with a receiving surface diameter of 6 m %

Water type	Probability		
	9 m	12 m	15 m
Clear seawater	99.94	99.77	99.35
Coastal water	99.56	97.91	93.55
Harbor water	44.90	24.95	16.65

图8为三种典型水域光束功率密度分布图。从三种水域的光束密度分布图可以得到,三种水域的光束功率密度随接收面直径的增加而减小,光束功率密

度在一定接收面直径范围内衰减得很快,当接收面直径达到一定值后变化开始平缓。对比不同接收视场角的光束功率密度可以得到,不同接收视场角下的光功率密度随接收面直径的变化基本不变,但随着接收视场角的增大,光束功率密度幅值逐渐增加。

三种典型水域在不同传输距离的光束功率密度分布如图9所示,从图9中可以得到,三种典型水域下,不同传输距离的光束功率密度分布随接收面的变化趋势相同,但随着传输距离的增加,光束功率密度分布逐渐离散。

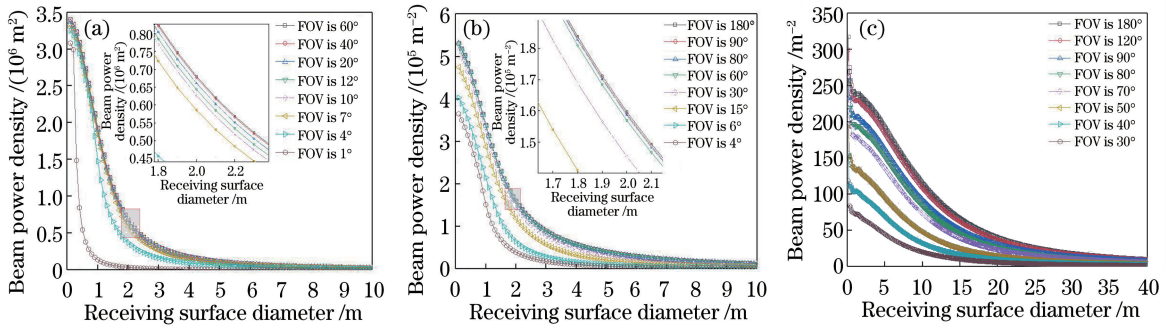


图8 光束功率密度分布图。(a) 清澈海水; (b) 浅水水域; (c) 港口水域

Fig. 8 Beam power density distribution. (a) Clear seawater; (b) Coastal water; (c) Harbor water

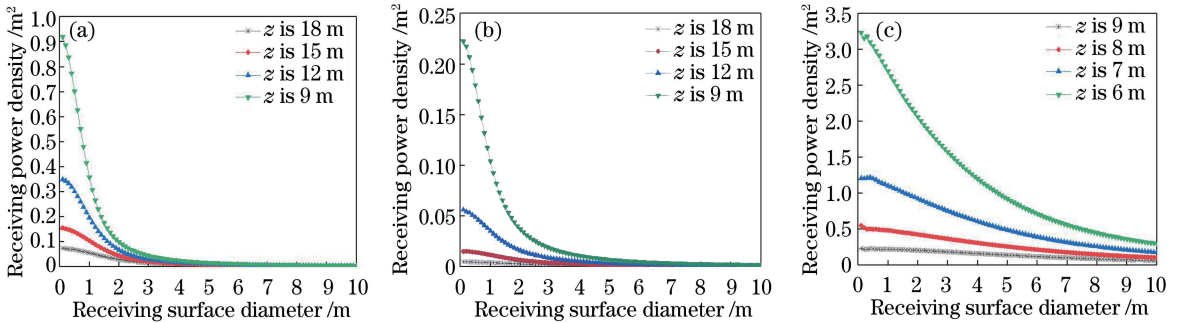


图9 三种典型水域不同传输距离的光束光功率密度。(a)清澈海水; (b)浅水水域; (c)港口水域

Fig. 9 Optical power density of beams with different transmission distances in three typical waters. (a) Clear seawater; (b) coastal water; (c) harbor water

4 结 论

证明了 FS 散射函数更接近于实际测量得到的 Petzold 散射函数, FS 散射函数相比较其他散射函数能更好地分析水下激光传输特性。通过使用该模型跟踪大量光子的传输过程, 分析不同传输环境产生的光束扩展特性, 研究了在不同接收视场角和传输距离下接收面直径与光束功率密度的关系。理论分析和仿真结果显示: 随着不同水域散射系数的增大和传输距离的增加, 接收端的光束扩展逐渐明显; 光束功率密度随着接收面直径的增大而减小, 对比不同接收视场角的光束功率密度发现, 不同接收视场角的光束功率密度变化趋势相同, 但光束功率密度的幅值随着接收视场角的增大而增加; 随着传输距离的增加, 光束功率密度分布逐渐离散。该研究成果为水下作业或水下定位提供参考。

参 考 文 献

- [1] Li X Z, Miao X C, Qi X, et al. Laser atmosphere-seawater channel transmission characteristics under complicated sea conditions [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(3): 0301002.
李祥震, 苗希彩, 元晓, 等. 复杂海况下激光气-海信道传输特性[J]. *光学学报*, 2018, 38(3): 0301002.
- [2] Chen F, Chen L Y, Xue M Q. Analysis of absorption and scatter characteristics of the sea on airborne laser sounding [J]. *Acta Photonica Sinica*, 1997, 26(6): 561-565.
陈烽, 陈良益, 薛鸣球. 机载激光测深海洋传输通道的吸收和散射特性分析[J]. *光子学报*, 1997, 26(6): 561-565.
- [3] Shen N, Guo J, Zhang X J. Influence of bit-error rate in laser underwater communications [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(11): 2935-2939.
沈娜, 郭婧, 张祥金. 激光水下通讯误码率的影响[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(11): 2935-2939.
- [4] Yu X P, Hu Y A, Liu L, et al. Propagation characteristics of underwater laser based on multiple scattering and small scattering angles approximation [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(11): 1101002.
俞雪平, 胡云安, 刘亮, 等. 基于多次散射和小散射角近似的水下激光传播特性[J]. *光子学报*, 2015, 44(11): 1101002.
- [5] Zhang Y L, Wang Y M, Huang A P. Influence of suspended particles based on Mie theory on underwater laser transmission [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(5): 0505002.
张莹璐, 王英民, 黄爱萍. 米氏理论下悬浮粒子对水下激光传输的影响[J]. *中国激光*, 2018, 45(5): 0505002.
- [6] Wang F, Yin Y F, Yang Y. Analysis of the influence of seawater channel laser transmission distance on the receiver sensitivity [J]. *Study on Optical Communications*, 2017(2): 23-26.
王菲, 阴亚芳, 杨祎. 海水信道激光传输距离对接收光功率的影响分析[J]. *光通信研究*, 2017(2): 23-26.
- [7] Wei A H, Zhao W, Han B, et al. Simulative study of optical pulse propagation in water based on Fournier-Forand and Henyey-Greenstein volume scattering functions [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(6): 0601003.
魏安海, 赵卫, 韩彪, 等. 基于 Fournier-Forand 和 Henyey-Greenstein 体积散射函数的水中光脉冲传输仿真分析[J]. *光学学报*, 2013, 33(6): 0601003.
- [8] Guan Y J, He F T, Yang Y, et al. Channel characteristics analysis of ocean underwater laser communication based on Monte Carlo [J]. *Optical Communication Technology*, 2016, 40(12): 52-54.
关云静, 贺锋涛, 杨祎, 等. 基于蒙特卡洛海洋水下激光通信信道特性分析[J]. *光通信技术*, 2016, 40(12): 52-54.
- [9] Huang A P, Zhang Y L, Tao L W. Monte Carlo simulation on channel characteristics of underwater laser communications [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(4): 0422004.
黄爱萍, 张莹璐, 陶林伟. 蒙特卡洛仿真的水下激光通信信道特性[J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(4): 0422004.
- [10] Vo Q S, Feng P, Tang B, et al. Study on properties of light scattering based on Mie scattering theory for suspended particles in water [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(1): 013001.
Vo Q S, 冯鹏, 汤斌, 等. 基于米氏散射理论的水中悬浮颗粒物散射特性计算[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(1): 013001.
- [11] Petzold T J. Volume scattering functions for selected ocean waters [R]. California: University of California, 1972.
- [12] Rapsomanikis A N, Eleftheriou A, Mikeli M, et al. A Monte Carlo simulator dedicated to a time-resolved optical tomographic modality based on the Henyey-Greenstein phase function [C] // 2015 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference

- (NSS/MIC), October 31-November 7, 2015, San Diego, CA, USA. New York: IEEE, 2015: 16356874.
- [13] Haltrin V I. An analytic Fournier-Forand scattering phase function as an alternative to the Henyey-Greenstein phase function in hydrologic optics [C] // IGARSS '98. Sensing and Managing the Environment. 1998 IEEE International Geoscience and Remote Sensing. Symposium Proceedings. (Cat. No. 98CH36174), July 6-10, 1998, Seattle, WA, USA. New York: IEEE, 1998: 910-912.
- [14] Han B, Liu J F, Zhou S J, et al. A simulated model for analyzing backscattering of laser pulse propagating in water based on Fournier Forand volume scattering function [J]. Acta Photonica Sinica, 2011, 40(10): 1590-1594.
韩彪, 刘继芳, 周少杰, 等. 基于 Fournier Forand 体积散射函数的水中激光脉冲后向散射特性分析模型 [J]. 光子学报, 2011, 40(10): 1590-1594.
- [15] Fournier G R, Jonasz M. Computer-based underwater imaging analysis [J]. Proceedings of SPIE, 1999, 3761: 62-70.
- [16] Sahu S K, Shanmugam P. Scattering phase function for particulates-in-water: modeling and validation [J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9882: 98821H.
- [17] Sahu S K, Shanmugam P. Semi-analytical modeling and parameterization of particulates-in-water phase function for forward angles [J]. Optics Express, 2015, 23(17): 22291-22307.
- [18] Cox Jr. W C. Simulation, modeling, and design of underwater optical communication systems [M]. Raleigh: North Carolina State University, 2012.
- [19] Kirk J T O. Monte Carlo procedure for simulating the penetration of light into natural waters [Z]. Technical Paper-Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, 1981.
- [20] Zhao C H, Zhang H M, Song J. Finger print based visible light indoor localization method [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(8): 0806002.
赵楚韩, 张洪明, 宋健. 基于指纹的室内可见光定位方法 [J]. 中国激光, 2018, 45(8): 0806002.
- [21] Li T S, Yang R K, Huang Y H, et al. Simulation and analysis of time delay characteristics of underwater laser pulse [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(11): 110102.
李天松, 阳荣凯, 黄艳虎, 等. 水下激光脉冲时延特性的仿真分析 [J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(11): 110102.