

激光光束在海水中的空间传输特性分析

贺锋涛, 王敏, 杨祎

(西安邮电大学电子工程学院, 陕西 西安 710121)

摘要: 由于激光的初始发散角以及海水对光的散射作用, 激光在水下传输时光斑大小发生改变, 从而影响接收机的接收范围。采用波长为 514 nm 的蓝绿激光, 基于水下无线光通信信道模型, 模拟光子在海水中的传输过程, 通过统计不同传输距离时的光子数和光子位置, 建立了海水信道中的光斑扩展模型, 分析了海水水质对高斯光束的光斑空间特性的影响。结果表明: 高斯光束在海水信道中传输时, 根据光强比值定义光斑大小的位置, $1/e$ 光斑半径与传输距离呈线性关系, 线性增加系数为光源的发散半角; 当接收机灵敏度为确定值时, 传输较短距离后光斑逐渐减小; 光斑大小由接收机灵敏度决定, 随着接收机灵敏度的增加, 在相同距离下, 接收到的光斑大小基本呈线性增加。

关键词: 水下无线光通信; 光斑空间特性; 蒙特卡洛仿真; 高斯光源; 接收机灵敏度

中图分类号: TN929.12 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2018.11.005

Analysis of spatial transmission characteristics of laser beam in seawater

HE Feng-tao, WANG Min, YANG Yi

(School of Electronic Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, China)

Abstract: Due to the initial divergence angle of laser and the scattering of light in seawater, the size of laser spot in undersea transmission is changed, and the reception range is affected. The photons of laser with a wavelength of 514 nm transmission process is simulated in seawater base on the undersea wireless optical communication channel model. The spot expansion model in seawater is established by statistical photon number and photon position in different transmission distance, then the effect of seawater quality on the speckle space characteristics of Gaussian beam is analyzed. The results show that when the position of the light spot size is defined as intensity ratio, there is a linear relationship between the $1/e$ laser spot radius and transmission distance when the Gaussian beam transmission in the seawater, and the linear increase coefficient is the divergence half angle of laser source; when the receiver sensitivity is determined, the light spot decreases after a short distance; the light spot size is determined by the receiver sensitivity. With the increase of the receiver sensitivity, the size of the spot received is linearly increased at the same distance.

Key words: underwater wireless optical communication; spatial characteristics of light spot; Monte Carlo simulation; Gaussian beam; receiver sensitivity

1 引言

水下无线光通信^[1] (UOWC) 是利用光介质在海洋环境中对数据进行传输, 激光由于其频率高、方

向性好、传输信息量大, 且不受干扰等优点, 在水下通信中能解决通信距离、速率以及安全方面的问题, 受到越来越多研究者的重视^[2-3]。但激光在海水中

基金项目: 陕西省教育厅专项科研计划资助项目 (No. 15JK1681) 资助。

作者简介: 贺锋涛 (1974 -), 男, 博士, 副教授, 主要从事光波导及光学非线性器件等方面研究。E-mail: hefengtao@xupt.edu.cn

收稿日期: 2018-03-27

受多种溶解物质和悬浮体的散射,导致其传输特性较大气环境中有所不同,因而研究激光在水下的传输规律非常有意义^[4-5]。

D. Arnush 研究了米氏粒子散射环境中的光辐射传输,得到海水中传输光场的近似解析解^[6]。Giles J W 等用采用指数衰减模型来表示水下光波传输过程^[7]。Zahra Vali 等人利用高斯光束的散度去补偿水下无线光通信链路中的不对准^[8]。王广聪等人采用蒙特卡洛方法对光信号经过 I 类海水信道后的时间特性和光场空间分布进行了仿真,并分析了散射和吸收吸收对信号传输的影响^[9]。吴王杰等人基于蒙特卡洛方法定量分析了光子在目标平面上的时间分布和光子在及载雷达处的时间分布^[10]。目前大部分文献关于激光束水下传输特性的研究都将其视为平行光束,没有对激光传输过程中光斑空间扩展给出具体模型,也没有提到接收机灵敏度对可接收光斑范围的影响。

本文利用蒙特卡洛方法^[11],以高斯光作为光源,基于米氏散射模型的 H-G 相函数,仿真了水下激光通信信道中光子的传输过程,得到光子接收位置横坐标与接收光子权重比例的关系,并用高斯函数对其进行拟合,根据 1/e 光斑半径与传输距离的关系建立了海水信道中的光斑扩展模型。此外,选取不同灵敏度的接收机,分析了海水中传输距离和接收机灵敏度对接收到的光斑大小的影响。

2 高斯光束传输模型

2.1 高斯光源模型

高斯光束^[12-14]传输的初始情况是在传输面上对激光高斯光斑进行抽样,生成光子的初始分布位置,再选择合适的初始角度去建立一个发散的光束,也就是说,用一个被透镜发散了平行光束来近似高斯光束。图 1 为高斯光束理论模型,说明了光束发散过程以及初始角的选择。

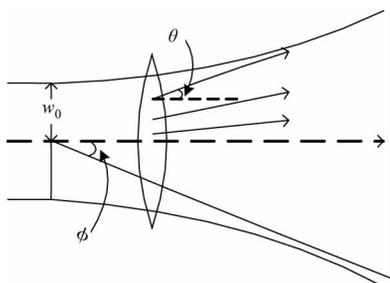


图 1 高斯光束理论模型

Fig. 1 Gauss beam theory model

基于已知的光源来选择发散角 $\theta_0 = -r_0/f_l$ ^[12]。其中, $f_l = -w_0/\phi_{div}$, $\phi_{div} = 2\lambda/\pi w_0$ 。

发射光强呈高斯分布,通过抽样得到初始光子位置分布为:

$$r_0 = w_0 \sqrt{-\ln(1-R)} \quad (1)$$

其中, R 为 $(0,1)$ 之间的随机数。

故:

$$\theta_0 = \frac{2\lambda \sqrt{-\ln(1-R)}}{\pi w_0} = \frac{2\lambda}{\pi w_0^2} r_0 \quad (2)$$

由公式(2)可以看出,在束腰半径不变的情况下,随着光子初始位置远离 z 轴,也就是 r_0 不断增大,发散角 θ_0 逐渐变大,在 $r_0 = 0$ 的位置,光子初始角度为 0。

于是光子的初始位置和初始方向分别为为:

$$\begin{aligned} x_0 &= r_0 \cos\phi_0 & \mu_x &= \sin\theta_0 \cos\phi_0 \\ y_0 &= r_0 \sin\phi_0 & \mu_y &= \sin\theta_0 \sin\phi_0 \\ & & \mu_z &= \cos\theta_0 \end{aligned} \quad (3)$$

式中, ϕ_0 为 $(0,2\pi)$ 之间的随机数。

1.2 海水中光子散射理论

海水环境的复杂性使得海水的散射比大气的散射复杂得多,水下的光学散射大致可分为水本身的瑞利散射和海水中悬浮粒子引起的米氏散射及透明物质折射所引起的散射^[15]。纯水的散射被当作是一种分子散射,水分子的直径比可见光波长小几百倍,可以用瑞利散射定律来描述。而海水中含有各种杂质以及浮游动植物,相较于入射波长尺寸较大,所以一般用米氏散射来描述。

在米氏散射模型中,最常见的散射相函数是 Henyey - Greenstein 散射相函数,其表达式为:

$$P(\cos\theta) = \frac{1-g^2}{(1+g^2-2g\cos\theta)^{3/2}} \quad (4)$$

其中, θ 表示散射角; g 表示非对称因子,可用散射相位函数的散射相位余弦 $\cos\theta$ 的平均值来表示。海水中不同粒子的尺寸并不一致,即散射核的直径存在差异,平均散射相位函数也不同。Petzold 测量的近海海水平均散射相位函数的散射相位余弦 $\cos\theta$ 的平均值为 0.924。由公式可知, $g = \langle \cos\theta \rangle = 0.924$ ^[16]。经抽样得:

$$\cos\theta = \begin{cases} \frac{1}{2g} \left[1 + g^2 - \left[\frac{1-g^2}{1+g-2g\xi} \right] \right] & g \neq 0 \\ 2\text{rand}(1) - 1 & g = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中, ξ 和 $\text{rand}(1)$ 是在 $[0, 1]$ 区间服从均匀分布的随机数。

散射的方位角 ϕ 服从 $[0, 2\pi]$ 范围的均匀分布, 故抽样的 $\phi = 2\pi\xi$, ξ 是在 $[0, 1]$ 区间服从均匀分布的随机数。散射角 θ 和方位角 ϕ 确定后, 可以由原来的方向坐标 (u_x, u_y, u_z) 确定散射后的方向坐标 (u_x', u_y', u_z') :

$$\begin{cases} u_x' = \sin\theta(u_x \cos\phi - u_y \sin\phi) / \sqrt{1 - u_z^2} + u_x \cos\theta & |u_z| < 0.9999 \\ u_y' = \sin\theta(u_y \cos\phi + u_x \sin\phi) / \sqrt{1 - u_z^2} + u_y \cos\theta \\ u_z' = -\sin\theta \cos\phi / \sqrt{1 - u_z^2} + u_z \cos\theta \end{cases} \quad (6)$$

或:

$$\begin{cases} u_x' = \sin\theta \cos\phi \\ u_y' = \sin\theta \sin\phi & |u_z| \geq 0.9999 \\ u_z' = \text{SIGN}(u_z) \cos\theta \end{cases} \quad (7)$$

式中, $\text{SIGN} = \begin{cases} +1 & u_z \geq 0 \\ -1 & u_z < 0 \end{cases}$

3 光斑空间传输特性仿真分析

3.1 光子传输模型及仿真参数

根据前面的米氏散射中 H - G 函数得到光子在海水中的传输模型如图 2 所示, 坐标原点 (x_0, y_0, z_0) 为光子的初始位置, L_1 为光子的初始随机步长, (u_{x1}, u_{y1}, u_{z1}) 为初始方向余弦, 得到第一次碰撞位置为 (x_1, y_1, z_1) , 后一次碰撞位置相对于前一次碰撞的光子运动方向偏移用 θ 和 Φ 表示, 其中 θ 为散射角, Φ 为方位角。

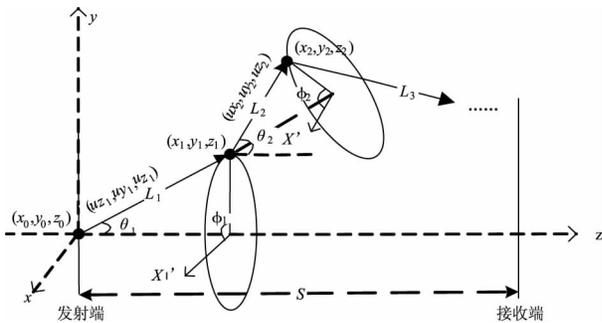


图 2 光子传输模型

Fig. 2 Photon transmission model

利用蒙特卡洛方法, 对近海水域中海水信道激光束光斑空间特性进行仿真, 仿真参数如表 1 所示。

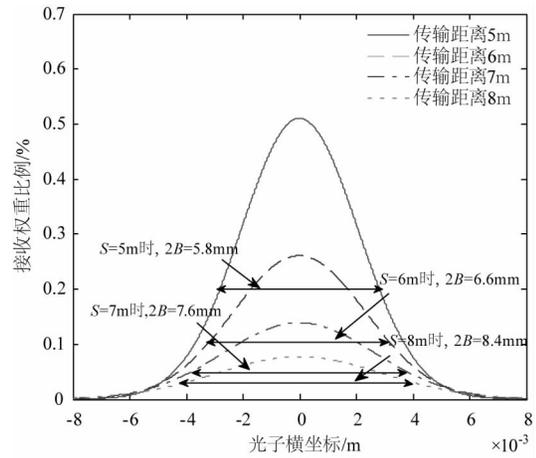
表 1 仿真采用的模拟计算参数

Tab. 1 Simulation parameters used in simulation

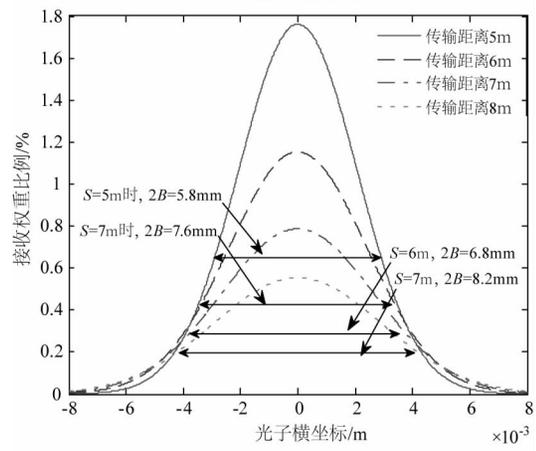
参数	值
光子数	10^6
不对称因子 g	0.924
波长 λ/nm	514
光束宽度/束腰半径 w_0/mm	0.789
发散半角 $\Phi_{\text{div}}/\text{mrad}$	0.419
海水折射率 η	1.33
近海水域衰减系数 c/m^{-1}	0.399
远洋水域衰减系数 c/m^{-1}	0.151

2.2 光斑空间扩展特性

图 3 中图 (a) 和图 (b) 分别表示在近海水域中和远洋水域中传输距离 S 为 $5 \sim 8 \text{ m}$ 时接收光子权重比例和接收端光子位置横坐标的关系, 并采用 $y = a \times \exp(-(x - b)^2/c^2)$ 形式的高斯函数对蒙特卡洛仿真数据进行拟合。



(a) 近海水域



(b) 远洋水域

图 3 不同水质中不同传输距离 S 下接收光子权重比例和横坐标的关系

Fig. 3 The relationship between the weight ratio of receiving photons and the horizontal coordinates under different transmission distance S in different water quality

可以看出,当发射端的光强呈高斯分布时,接收端接收到的光强仍呈高斯分布,但光强减弱。将传输距离 S 与 $1/e$ 光斑半径关系进行拟合如图 4 所示。

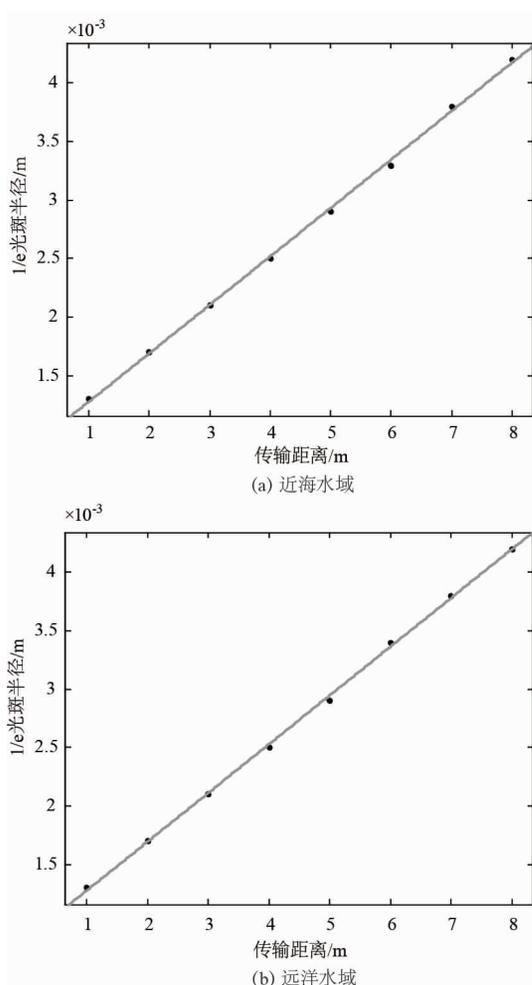


图 4 不同水质中传输距离 S 和光斑大小 B 的关系
Fig. 4 The relationship between transmission distance S and spot size B in different water quality

得到近海水域中传输距离 S 和光斑半径 B 的关系如图 4(a), 拟合曲线为关系式(8):

$$y = 0.0004143x + 0.0008607 \quad (8)$$

同理可得, 远洋水域中传输距离 S 和光斑半径 B 的关系如图 4(b), 拟合曲线为关系式(9):

$$y = 0.0004179x + 0.0008571 \quad (9)$$

由式(8)、式(9)可发现, 它们的系数近似为起始光源的束腰半径 w_0 和发散半角 Φ_{div} , 可得到近海水域和远洋海水信道的光斑扩展模型均为公式(10)所示:

$$B = \Phi_{div} \times S + w_0 \quad (10)$$

从公式(10)中看出, 该模型与水质衰减系数无关, 光斑大小主要由光源的发散角决定。从图 3 中

知道, 相同距离下, 水质衰减系数的增加引起接收端光强的不同, 导致光斑整体光强减弱。 $1/e$ 处光斑指相对于最大接收光强的 $1/e$ 处的光斑, 随着整体光强的减弱, $1/e$ 处光强也随之减弱, 如表 2 所示, 所以根据光强比值来定义光斑大小的位置时, $1/e$ 光斑大小随光源发散角成线性扩展。

表 2 不同传输距离下接收端光斑大小和接收效率
Tab. 2 The size and receiving efficiency of the receiving end at different transmission distances

距离/m	$1/e$ 光斑大小/mm	接收端接收效率/%
1	2.6	4.83
2	3.4	1.87
3	4.2	0.82
4	5.0	0.38
5	5.8	0.19
6	6.6	0.10
7	7.6	0.05
8	8.4	0.03

为了验证这一结论, 我们搭建实验系统, 在 1.5 m 长的水管中添加含有不同比例叶绿素的自来水, 来模拟水质杂质浓度。实验时用同一激光光源测试, 在接收端用 CCD 拍摄得到的光斑如图 5 所示。

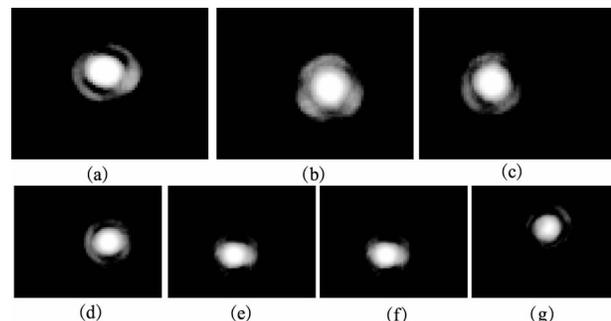


图 5 通过含叶绿素量不同的自来水的激光光斑
Fig. 5 laser spots of tap water with different chlorophyll content

从图 5(a) 至图 5(g) 自来水中叶绿素含量依次成倍增加, 从图中看到接收端的光斑尺寸基本不变。但是, 在图 5(a) 至图 5(g) 用功率计在接收端测的功率显示^[17], 自来水中的叶绿素含量每增加 1 倍, 接收端光功率的衰减增加 7 dB。

2.3 接收机灵敏度对可接收光斑范围的影响分析

当接收端用边长 1 mm 的正方形检测器接收光信号时, 固定接收机灵敏度为 -30 dBm、-24 dBm 和 -20 dBm 时, 不同传输距离下所对应的接收光斑

大小如图 6 所示,由此得到固定灵敏度下光斑半径和传输距离的关系如图 7 所示。由于光斑大小决定可接收的光斑范围,从图 7 可看出,当传输距离为 5 m 时, -30 dBm 的接收机接收到的光斑半径为 5.75 mm, -24 dBm 的接收机接收到的光斑半径为 4.65 mm, -20 dBm 的接收机接收到的光斑半径为 3.7 mm;当传输距离为 6 m 时, -30 dBm 的接收机接收到的光斑半径为 6 mm, -24 dBm 的接收机接收到的光斑半径为 4.55 mm, -20 dBm 的接收机接收到的光斑半径为 3.25 mm;当传输距离为 7 m 时, -30 dBm 的接收机接收到的光斑半径为 6.15 mm, -24 dBm 的接收机接收到的光斑半径为 4.2 mm, -20 dBm 的接收机接收到的光斑半径为 2.15 mm。所以相同传输距离下,接收机的灵敏度越高,接收到的光斑越大,并且基本呈线性关系增加。

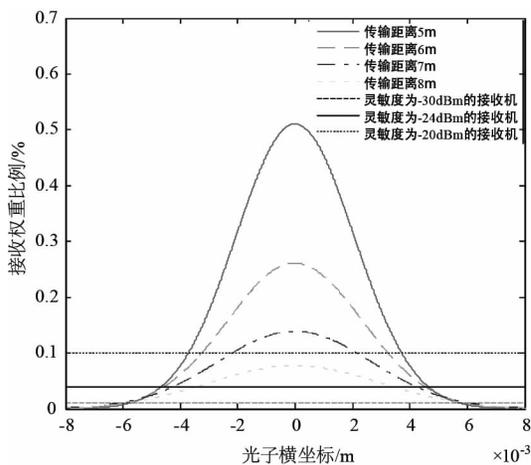


图 6 固定灵敏度下光斑大小和传输距离的关系

Fig. 6 The relationship between the spot size and the transmission distance under the fixed sensitivity

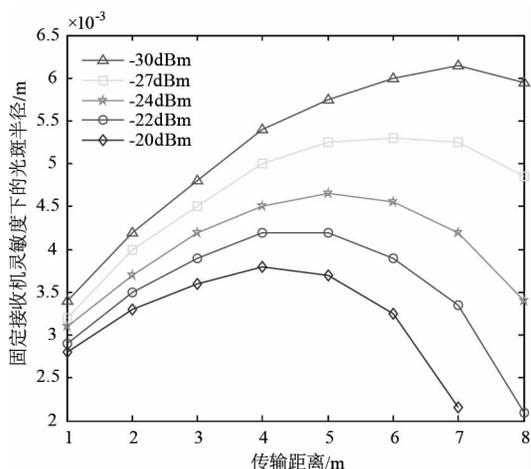


图 7 参考不同灵敏度接收机时传输距离和光斑半径的关系

Fig. 7 The relation between the transmission distance and the radius of the spot when referring to the different sensitivity receivers

同时从图 7 中看到,在固定灵敏度下,当接收端的光强在接收机灵敏度范围内时,光斑大小随传输距离增加,但是随着距离的增加,接收端光强持续减弱;低于接收机灵敏度时,距离越远,光强衰减越大,接收到的光斑变小,如表 3 所示。

表 3 固定灵敏度为 -24 dBm 时的光斑大小变化情况

Tab.3 Changes in spot size when the fixed sensitivity is -24 dbm

距离/m	接收机灵敏度为 -24 dBm 时光斑大小/mm
1	6.2
2	7.4
3	8.4
4	9
5	9.3
6	9.1
7	8.4
8	6.8

3 结论

采用蒙特卡洛方法对海水中的光斑空间传输特性进行分析,基于米氏散射的 H-G 相函数在水下无线光通信信道中模拟光子传输过程,仿真得到接收面上光子横坐标与接收光子权重比例的关系,并利用高斯函数对这些离散的点进行拟合。

仿真比较了近海和远洋水域中不同传输距离对 $1/e$ 光斑半径的影响,并在 1.5 m 的水管中模拟不同衰减的水质通过实验验证。结果表明:在近海水域和远洋水域中,当发射端光强呈高斯分布时,其接收端光强仍然为高斯分布,并且随着传输距离的增加, $1/e$ 光斑均呈线性扩展,其线性扩展系数均为初始光源的发散半角。同时,实验结果表明,不同衰减的水质对光斑大小的影响不大。

随着距离的增加,光斑扩展,同时光功率衰减,所以需要灵敏度更高的接收机。光斑大小决定接收机的接收范围。当选取固定灵敏度的接收机检测光斑大小时,发现相同传输距离下,随着灵敏度的增加,可接收的光斑范围基本呈线性增加;而在固定灵敏度下,光斑半径均先增加后减小。这是由于光斑扩展时,其高斯分布的光强被海水中的物质吸收和散射,其边缘相比于中心散射更大,当光斑光强在接收机灵敏度范围内时,接收到的光斑大小是增加的,

一旦光斑光强小于接收机灵敏度,则光斑不能完全被探测器检测到,从而会出现接收机接收到的光斑随着传输距离的增加而减小的现象。这为准确建立水下通信接收系统提供了理论依据。

参考文献:

- [1] Kaushal H, Kaddoum G. Underwater optical wireless communication. *IEEE Access*, 2016, 4(1): 1518 – 1547.
- [2] Uysal M, Capsoni C, Ghassemlooy Z, et al. Optical wireless communications-an emerging technology[M]. Springer Publishing company, Incorporated, 2016: 1 – 7.
- [3] SUN Zhibin, HUANG Zhen, YE Wiran, et al. Overview of the photonic communication in deep space, free space and underwater communication[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(9): 2425 – 2430. (in Chinese)
孙志斌, 黄振, 叶蔚然, 等. 深空、自由空间、非可视散射和 underwater 激光光子通信[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(9): 2424 – 2431.
- [4] SHEN Na, GUO Jing, ZHANG Xiangjin. Influence of bit-error rate in laser underwater communications[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(11): 2935 – 2939. (in Chinese)
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.
- [5] TANG S J, DONG Y H, ZHANG X D. Impulse response modeling for underwater wireless optical communication links [J]. *IEEE Trans Communi*, 2014, 62(1): 226 – 234.
- [6] Arnush D. Underwater light-beam propagation in the small-angle scattering[J]. *J. Opt. Soc. Am.* 1972, 62(9): 1109 – 1117.
- [7] Giles J W, Bankman I. Underwater optical communications systems. Part 2: Basic design considerations[C]// *IEEE Military Communications Conference (MILCOM)*, 2005, 3: 1700 – 1705.
- [8] Zahra Vail, Asghar Gholami, David G. Michelson, et al. Use of Gaussian beam divergence to compensate for misalignment of underwater wireless optical communication links[J]. *IET Journals*, 2017, 11(5): 171 – 175.
- [9] WANG Guangcong, DONG Shifu, WEN Dong, et al. Research on blue-green laser transmission in seawater[J]. *Electronic Technology*, 2010, (3): 68 – 70. (in Chinese)
王广聪, 董淑福, 温东, 等. 海水中蓝绿激光传输特性研究[J]. *电子技术*, 2010, (3): 68 – 70.
- [10] WU Wangjie, ZHANG Xi, WU Fangping, et al. Analysis of the time distribution of underwater laser pulse using Monte Carlo simulation [J]. *Laser & Infrared*, 2013, 43(4): 366 – 370. (in Chinese)
吴王杰, 章曦, 吴方平, 等. 激光脉冲水下时域特性的蒙特卡罗模拟 [J]. *激光与红外*, 2013, 43(4): 366 – 370.
- [11] LU Wenlong, ZHENG Yu, ZHAO Wenlong, et al. Analysis coupling between a laser and a single-mode fiber with a ball lens based on Monte Carlo method [J]. *Laser Technology*, 2012, 36(3): 338 – 341. (in Chinese)
陆文龙, 郑煜, 赵文龙, 等. 激光器与单模光纤球透镜耦合的蒙特卡洛分析 [J]. *激光技术*, 2012, 36(3): 338 – 341.
- [12] WU Guangcheng, ZHANG Xiaohui, RAO Jonghui, et al. A algorithm of intensity distribution of underwater Gauss laser beam in far-field [J]. *Laser & Infrared*, 2009, 39(6): 581 – 583. (in Chinese)
吴广成, 张晓晖, 饶炯辉, 等. 一种计算水下高斯光束远场光强分布的方法 [J]. *激光与红外*, 2009, 39(6): 581 – 583.
- [13] William Charles Cox, Jr. Simulation, modeling, and design of underwater optical communication systems [D]. Raleigh: North Carolina State University, 2012.
- [14] WU Beiyong, LI Wei, CHEN Hongbin, et al. Practical arithmetic of atmospheric radiation and propagation [M]. Beijing: Meteorological Press, 1998. (in Chinese)
吴北婴, 李卫, 陈洪宾, 等. 大气辐射传输实用算法 [M]. 北京: 气象出版社, 1998.
- [15] HE Xisun, ZHU Xiao, TAN Xuesong, et al. Research on the transmission delay of laser pulse caused by the sea water scattering effects [J]. *Laser & Infrared*, 2001, 31(1): 19 – 21. (in Chinese)
贺细顺, 朱晓, 谭雪松, 等. 海水散射引起激光脉冲传输延迟的研究 [J]. *激光与红外*, 2001, 31(1): 19 – 21.
- [16] LI Jing. Study on carrier modulated underwater laser communication based on analytic Monte Carlo method [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013. (in Chinese)
黎静. 基于解析蒙特卡洛方法的载波调制水下激光通信研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
- [17] WEI Wei, ZHANG Xiaohui, RAO Jonghui, et al. Study on computing the receiving optical power in underwater optical wireless communication [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(9): 103 – 108. (in Chinese)
魏巍, 张晓晖, 饶炯辉, 等. 水下无线光通信接收光功率的计算研究 [J]. *中国激光*, 2011, 38(9): 103 – 108.