

蒙特卡洛仿真的水下激光通信信道特性

黄爱萍, 张莹珞, 陶林伟

(西北工业大学 航海学院, 陕西 西安 710129)

摘要: 针对海洋激光通信信道复杂多变的问题, 利用理论分析和蒙特卡洛模拟方法详细研究了水下光通信链路的信道特性。采用波长为 532 nm 的蓝绿激光, 分析了典型海水中的信道脉冲响应, 研究了接收光强与海水类型、衰减长度、发散角、光束宽度、接收视角及孔径等重要参数的关系, 并通过蒙特卡洛仿真实验进行验证。理论分析与仿真结果表明: 清澈海域中, 传输距离 < 40 m 时, 可认为无码间干扰信道, 接收端不需要复杂的信号处理算法; 但在海港浑浊海域, 时延扩展随着接收视角和发散角的增大而增大, 从而降低信道的传输效率。当衰减长度小于等于漫射长度时, 接收光强随接收孔径的增大而减小; 但当衰减长度大于漫射长度时, 接收光强随着接收视角的增大呈现先增后恒的趋势。因此, 研究结果将对建立准确的水下无线光通信信道模型具有重要的参考价值。

关键词: 水下激光通信; 信道特性; 蒙特卡洛仿真方法

中图分类号: TN929.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0422004

Monte Carlo simulation on channel characteristics of underwater laser communications

Huang Aiping, Zhang Yingluo, Tao Linwei

(School of Marine Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

Abstract: The channel characteristics were investigated for underwater laser communications based on Monte Carlo simulation method. Using the blue-green laser with wavelength 532 nm, the impulse response of link was discussed both in theorem and simulation. Also the channel parameters such as the water type, attenuation length, divergence angle, beam width, received field-of-view (FOV), received aperture were taken into account. Monte Carlo simulation experiment was verified. Simulation results suggest that in clear water, the channel can effectively be considered as non ISI when working distance less than 40 m. Therefore, it practically did not need to perform computationally complex signal processing at the received end. However, in harbor water, the channel delay spread enlarged with larger received FOV or divergence angle, and the data transmission efficiency was reduced. When the attenuation length was smaller than the diffused length, the received intensity decreased with received aperture enlarged. In contrast, the received intensity enhances with larger received aperture at the small FOV, however, they trend to similar regardless of the apertures at large FOV. Therefore, the results give us some insight in terms of what constitutes an accurate underwater laser communication channel.

Key words: underwater laser communications; channel characteristics; Monte Carlo simulation method

收稿日期: 2016-08-10; 修订日期: 2016-09-12

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(N2014KA0064); 西北工业大学校基础研究基金(G2016KY0101)

作者简介: 黄爱萍(1984-), 女, 讲师, 博士, 主要从事无线光通信系统的关键技术、激光探测技术的研究。Email: appleagz1@163.com

0 引言

近年来,人类海洋活动日益扩大,水下无线传感器网络、光/声学成像探测技术和水下航行器等技术快速发展,迫切需要高数据传输速率的水下无线通信技术的支持,以实现观测数据的传输及控制指令的交换。

相对于传统的水声通信而言,水下激光通信的频带宽、通信容量大,适于水下大容量数据的传输,以及不易受海水温度和盐度变化的影响,具有良好的抗干扰能力。此外,激光具有较强的方向性,提高了信息传输过程中的安全保密性。因此,水下激光通信日益受到人们的重视^[1-2]。

其中,水下激光通信信道模型和特征的研究非常重要,因为信道特性直接关系到水下无线光通信系统的应用^[3-4]。目前很多文章都采用指数衰减模型来表示水下光波传输过程,而且通常忽略漫射和光波极性影响^[5]。在该模型中,光在水下传输主要受水分子和溶解粒子的吸收和散射,其光强可通过 Beer 定理来计算。但采用 Beer 定理和衰减系数公式的缺点在于未考虑接收机端的散射和系统的几何散射,以及发射器和接收器的参数等因素。C. Gabriel 和 M. A. Khalighi 等人在参考文献[6-7]中分别研究了水下光通信链路中,发射器和接收器完全对准和存在倾角情况下的信道模型,但主要衡量了清澈海水环境下影响信道特性的因素。B.Cochenour 和 L. Mullen 等人针对水下激光通信系统中的前向散射干扰,提出了一种测量信道频率响应的灵敏度高,动态范围大的试验测量方法^[8]。Arnon 等人针对不同的通信环境,分别提出了视距通信,调制反射链路和漫射链路,但该文献中仅从理论上分析了该漫射链路的误码性能,未通过仿真实验验证^[9]。F.Jasman 和 R.J. Green 在参考文献在[9]的基础上中简单分析了视距和漫射链路的信道特征^[10],但发射器和接收器的参数选择对接收信号的影响仍未考虑。S.Tang 和 Y. Dong 等人针对海水激光通信系统提出了一种双 Gamma 信道模型,但文中仅分析了海水类型、传输距离和 FOV 等因素对信道特性的影响^[11]。

文中基于蒙特卡洛模拟方法,对水下激光通信的信道特性做了较全面的分析。仿真比较了典型的

海水类型及浑浊度、系统参数,如发射器波束宽度和发散角、传输距离、接收孔径以及 FOV 等因素对接收光强的影响。

1 水下信道的光学特性

水下激光通信链路中,接收器接收到的光信号平均功率 P_R 可简单近似为:

$$P_R = \begin{cases} P_T \cdot \exp(-c(\lambda) \cdot z), & 0 \leq \theta \leq \Psi \\ 0, & \theta > \Psi \end{cases} \quad (1)$$

式中: z 为发射端和接收端的垂直距离; P_T 为平均发射光功率; θ 为散射角; Ψ 为接收 FOV 半角; $c(\lambda)$ 为光在海水中的衰减系数,其受到海水吸收和散射两个因素的影响,即:

$$c(\lambda) = a(\lambda) + b(\lambda) \quad (2)$$

式中: λ 为光波长; a 为吸收系数; b 为散射系数。吸收作用包括纯水、溶解有机物质、浮游生物和有机碎屑等物质对光的吸收。散射作用由纯水和颗粒物等主要因素造成,其中颗粒物又分为小颗粒和大颗粒,存在不同的统计分布和散射强度^[9]。文中主要考虑蓝绿激光在清澈海域和海港浑浊海域环境中的信道传输特性,衰减参数如表 1 所示^[10]。

漫射长度 L_{diff} 通常用来判断通信系统衰减长度的大小,其表达式为 $L_{diff} = b/[c \cdot (1 - \langle \cos \theta \rangle)]$ ^[12],其中 $\langle \cos \theta \rangle$ 为散射相位余弦的平均值,其值如表 1 所示。

表 1 蓝绿激光在清澈和海港海域中的衰减参数和漫射长度

Tab.1 Attenuation parameters and diffusion length of the blue-green laser in clear and harbor ocean water

Water type	a/m^{-1}	b/m^{-1}	c/m^{-1}	$\langle \cos \theta \rangle$	L_{diff}
Clear	0.037 5	0.112 5	0.15	0.87	15.1
Harbor	0.913	0.187	2.19	0.92	30.7

光子在传输过程中产生米氏散射,采用散射相函数 $\beta(\lambda, \theta)$ 来描述光线发生散射时的能量分布^[6,11],其满足归一化条件:

$$1 = 2\pi \int_0^\pi \beta(\lambda, \theta) \sin \theta d\theta \quad (3)$$

文中主要研究蓝绿激光的传播信道特性,取波长 $\lambda = 532 \text{ nm}$ 。由参考文献[13]可得 Henyey-Greenstein(HG)

函数为海水散射相位概率函数的最佳近似公式,当选取合适的水特征参量 g 时,拟合 HG 函数的匹配度达到 90% 以上,其表达式如下:

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

式中: g 为非对称参量; θ 为散射角。根据 Petzold 测量的海水平均粒子散射相位函数值^[14],可获得 Petzold 测量值的 HG 拟合函数 $\beta(\theta)|_{g=0.921}$ 。

2 蒙特卡罗方法仿真

2.1 仿真流程图

蒙特卡罗方法被很多文献用来研究和分析海水信道散射效应^[10,12]。在该模拟实验中,光线被假设为是光子和光子包的集合。仿真过程中通过跟踪大量光子的传播途径获得最后的统计结果,其主要步骤如图 1 所示。

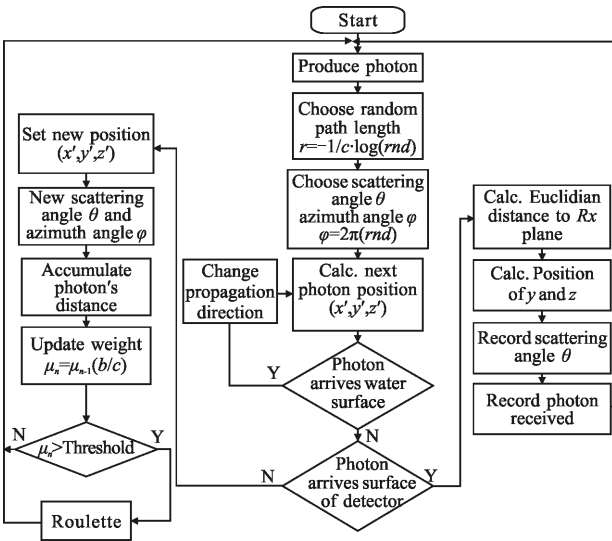


图 1 蒙特卡罗仿真流程图

Fig.1 Flowchart of the Monte Carlo simulation

首先对激光高斯光斑采样生成光子;随机产生一个自由步长,选择初始方位角并根据 HG 函数生成初始散射角,确定光子的初始坐标及传播方向矢量;其次根据原坐标 (x, y, z) 计算下一次散射坐标 (x', y', z') ;然后,判断光子是否到达水面,如果到达,则根据反射定理改变光传播方向,损失光子能量;如果没有到达水面,则判断光子是否到达探测面,如果到达,则计算光子位置,记录其到达时的散

射和方位角;如果未到达,光子则进行下一次散射过程。 n 次散射后,光子包权值 μ_n 小于某一门限阈值,传输结束。

2.2 算法的详细过程

2.2.1 光子包的初始量确定

假设光子处在直角坐标系中 $z=0$ 的位置, z 轴以右方向为正方向。发射光强呈高斯分布。根据选定的光源来确定散射角 $\theta_0 = -r_0 f_i^{1/2}$,其中 $f_i = -\omega_0 / \phi_{div/2}$, ω_0 为波束宽度, $\phi_{div/2}$ 为发散半角, r_0 为半径采样值 $r_0 = \omega_0 \sqrt{-\ln(1-rnd1)}$,方位角 $\varphi_0 = 2\pi \cdot rnd2$,其中 $rnd1, rnd2$ 为 0~1 之间均匀分布的随机数。因此,可以得到光子的初始横坐标和纵坐标分别为:

$$\begin{cases} x_0 = r_0 \cos \varphi_0 \\ y_0 = r_0 \sin \varphi_0 \end{cases} \quad (5)$$

初始的传播方向矢量表达式为:

$$\begin{cases} \mu_x = \sin \theta_0 \cos \varphi_0 \\ \mu_y = \sin \theta_0 \sin \varphi_0 \\ \mu_z = \cos \theta_0 \end{cases} \quad (6)$$

2.2.2 光子的移动和散射

光子的移动包括步长和散射角,前者由光子不被散射或吸收的生存概率决定,后者由散射公式确定。光子在各向异性的介质中移动的步长由光子自由程的概率分布决定,即:

$$P_l(l) = 1 - e^{-l} \quad (7)$$

式中: $P_l(l)$ 表示光子移动步长为 l 的概率。根据光子步长的定义可得 $l = cr$, c 为介质中的衰减系数, r 为散射前后光子位置的几何距离,则:

$$r = -1/c \cdot \log P_l(l) \quad (8)$$

其中, $P_l(l)$ 取 0~1 之间均匀分布的随机数。

假设所有光子的初始权值为 $\mu_0 = 1$,光子包发生相互作用的权损失系数为 (b/c) ,则 $\mu_n = \mu_{n-1} (b/c)$,其中 μ_{n-1} 为光子发生相互作用前的权重, μ_n 为相互作用后的权重。

记散射角度为 θ_s ,则: $\varepsilon_\theta = 2\pi \int_0^\theta \beta(\theta) \sin \theta d\theta$,其中 $\beta(\theta)$ 为散射相位概率函数,表达式如公式(3), ε_θ 为 0~1 之间均匀分布的随机数,可通过数值方法得到 θ_s ,作为下一次散射的散射角。此外,方位角 φ_s 亦为 1~ 2π 的随机数。

当散射角 θ_s 和方位角 φ_s 确定后,可以用原来的方

向坐标 (μ_x, μ_y, μ_z) 确定散射后的方向坐标 (μ_x', μ_y', μ_z')

$$\begin{cases} \mu_x' = \frac{\sin \theta_s}{\sqrt{1-\mu_z^2}} (\mu_x \mu_z \cos \varphi_s - \mu_y \sin \varphi_s) + \mu_x \cos \theta_s \\ \mu_y' = \frac{\sin \theta_s}{\sqrt{1-\mu_z^2}} (\mu_y \mu_z \cos \varphi_s + \mu_x \sin \varphi_s) + \mu_y \cos \theta_s \\ \mu_z' = -\sin \theta_s \cos \varphi_s \sqrt{1-\mu_z^2} + \mu_z \cos \theta_s \end{cases} \quad (9)$$

当 $\mu_z^2 \approx 1$ 时,表示散射方向朝向 Z 轴方向,上式可简化为:

$$\begin{cases} \mu_x' = \sin \theta_s \cos \varphi_s \\ \mu_y' = \sin \theta_s \sin \varphi_s \\ \mu_z' = (\mu_z / |\mu_z|) \cos \theta_s \end{cases} \quad (10)$$

2.2.3 光子的终止和接收

光子被散射介质中的粒子吸收(即光子权重小于设定阈值)或光子到达接收器距离时终止传输。

对光子跟踪的过程中,记录光子的位置、接收角度、权值以及传播距离等信息。若光子所在位置在接收器接收面范围内,且接收角度小于 FOV,则判定光子被接收;反之判定为未接收并停止对该光子的跟踪。

3 蒙特卡洛方法海洋信道模拟结果与分析

利用上面介绍的蒙特卡洛模拟方法,对激光束受到海水作用引起的扩展情况进行了数值模拟。假设光场分布为高斯分布,仿真采用的模拟计算参数:蓝绿激光波长为 532 nm,传输速度为 $0.75 \times 2.9979 \times 10^8$ m/s,仿真光子数为 10^7 ,非对称因子 $g=0.924$ 。发散角 $\phi_{div}=1.25$ mrad,波束宽度 $\omega_0=1$ mm,空气海水界面的折射指数 $n=1.33$ 。

图 2 表示激光在清澈海域和海港海域传输过程中的信道响应特征,其中 FOV 取 $\pi/12, \pi/4$ 和 $\pi/2$,接收孔径为 50 cm,传输距离分别为 50 m 和 10 m。图中可以看出,在清澈海域环境下,FOV 变化时,接收光强和信道时延基本保持不变,其原因在于清澈海域环境中,衰减系数低,散射作用弱。在海港海域中,接收光强随着 FOV 增大明显增大,如 $FOV=\pi/2$ 时的归一化的接收光强峰值为 2.2×10^{-6} W/m²,约为 $FOV=\pi/4$ 的 1.5 倍, $FOV=\pi/12$ 的 7 倍。然而其信道时延亦随 FOV 增大而增大,如 $FOV=\pi/2$ 时的信道时延为约为 1.6 ns,比 $FOV=\pi/4$ 时多 0.3 ns,比 $FOV=\pi/12$ 时多 1.3 ns,由于在海港浑浊海域中,多次散射导致光子传输路径增加且偏离主光轴,因此接收端

过窄的 FOV 无法截获偏离主光轴的光子导致接收光强降低。此外还可以看出,在清澈海域环境中,传输距离较海港环境明显增大。

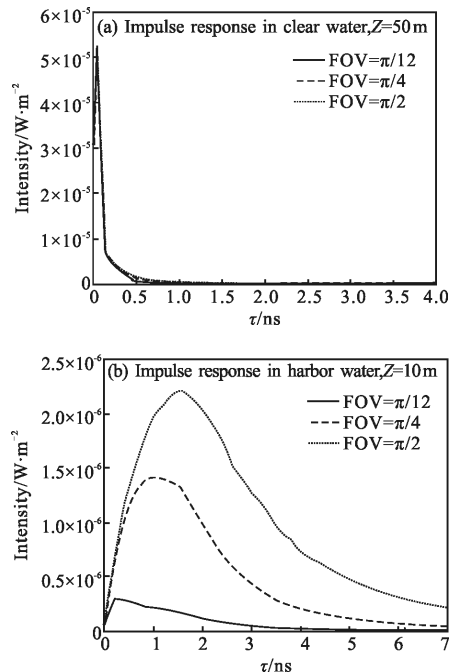


图 2 信道脉冲响应

Fig.2 Channel impulse response

表 2 给出了清澈和海湾海域环境中,传输距离不同发散角和波束宽度下的信道时延和接收光强

Tab.2 Channel time delay and received intensity for different divergence angles and beam widths

c/m^{-1}	Z/m	$\phi_{div}/(^{\circ})$	ω_0/cm	τ/ns	I/dB
0.15	40	0.7	0.3	0.03	-36.75
0.15	40	0.7	3	0.03	-36.77
0.15	40	0.7	30	0.03	-36.78
0.15	40	20	0.3	0.23	-53.27
0.15	40	20	3	0.23	-53.27
0.15	40	20	30	0.23	-54.07
0.15	40	45	0.3	0.13	-61.95
0.15	40	45	3	0.13	-60.22
0.15	40	45	30	0.13	-61.71
2.19	10	0.7	0.3	1.81	-56.45
2.19	10	0.7	3	2.31	-56.48
2.19	10	0.7	30	2.51	-56.44
2.19	10	20	0.3	2.51	-57.99
2.19	10	20	3	2.91	-57.86
2.19	10	20	30	3.01	-57.98
2.19	10	45	0.3	3.51	-61.27
2.19	10	45	3	3.91	-60.98
2.19	10	45	30	4.51	-60.99

分别取 40 m 和 10 m 时,时延 τ 和接收光强 I 与发射器发散角 θ_{div} 和光束宽度 ω_0 之间的关系,其中接收孔径为 50 cm, $FOV=\pi/2$ 。可以看出在清澈海域 ω_0 和 θ_{div} 对 τ 影响可以忽略不计,但在海港海域中,由于 θ_{div} 越大散射作用增强,光子偏离主光轴越远,时延 τ 越大,接收光强 I 越低。如 $\omega_0=0.3$ cm, θ_{div} 取 $0^\circ, 20^\circ$ 和 45° 时, τ 分别为 1.81、2.51、3.51 ns, I 为 -56.45、-57.99、-61.27 dB。

图 3 仿真了两类海域环境中,不同接收孔径条件下接收功率和衰减长度之间的关系,其中 $FOV=\pi/2$,衰减长度定义为传输距离与衰减系数 $c(\lambda)$ 的乘积,接收孔径分别取 0.5、5、20、40 cm。可以看出,接收器与发射器的距离越远,接收到的光功率越低。

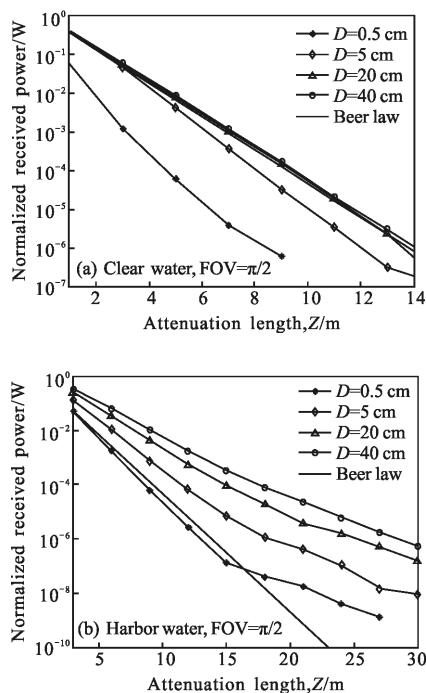


图 3 归一化接收功率与接收孔径的关系

Fig.3 Normalized received power vs received apertures

在清澈海域中,接收孔径小于 5 cm 时,接收光功率低于 Beer 定理,主要因素为仿真过程采用 0.7° 发散角,光束随着衰减长度增大而发散,因此接收孔径较小时,无法捕获所有到达接收端的光子;当接收孔径大于 20 cm 时,接收光功率曲线与 Beer 定理曲线很好吻合。在海港海域中,当衰减长度小于漫射长度 (15.1 m, 如表 1 所示) 时,接收光功率值近似于 Beer 定理,因为在短距离传输时,几何衰减很小,可用

Beer 定理近似;衰减长度大于 15.1 m 以后开始发散,接收功率高于 Beer 定理,如衰减长度为 20 m 时,40 cm 接收孔径的接收光功率为 Beer 定理的 1000 倍以上。此外还可以看出衰减长度一定条件下,随着接收孔径变大,接收功率衰减程度变缓慢,因为接收孔径越大,将接收到更多散射角较小的光子。

为了进一步分析信道特性与接收器参量之间的关系,图 4 给出了在清澈海域和海港海域中,接收光强与 FOV 和孔径之间的关系,其中清澈海域中,衰减长度取 20、60、100 m,海港海域中取 10、15、20 m,此处相同衰减长度用同一种颜色表示,相同接收孔径大小用同一种符号表示。可以看出,在清澈海域中,由于散射作用弱,能量集中,接收光强随接收

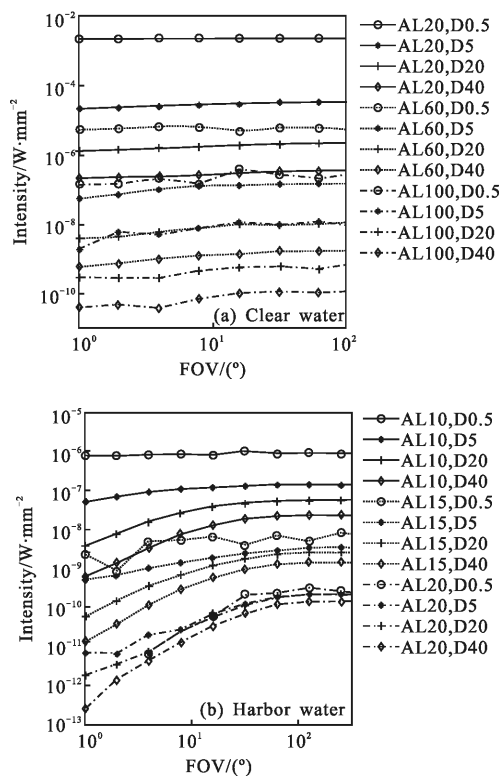


图 4 接收光强与 FOV 和孔径大小之间的关系

Fig.4 Received intensity for different FOVs and apertures

孔径的增大而减小(相同颜色曲线比较结果),且基本与 FOV 无关(同一条曲线各点比较结果)。海港海域中,在衰减长度小于等于漫射长度时(如 10 m 和 15 m 曲线所示),接收光强随接收孔径的增大而减小,如衰减长度为 10 m,接收孔径为 0.5 cm 时,接收光强约为 2.12×10^{-15} W/mm²,高于相同条件下,接收孔径为 40 cm 时的接收光强约 2 个数量级,原因在

于当衰减长度较小时,光束到达接收端时距离较短,光子偏离主轴角度较小。当衰减长度大于漫射长度时(如20 m曲线所示),FOV较小情况下($FOV \leq 30^\circ$),接收光强随着FOV的增大而增大,但随着FOV继续增大($FOV > 30^\circ$),光强大小基本保持不变。

3 结束语

文中基于蒙特卡洛仿真实验方法,对水下激光通信的信道特性做了较全面的分析。仿真比较了典型的海水类型及浑浊度、系统参数包括波束宽度和发散角、传输距离、接收孔径以及FOV等因素对接收光强的影响。仿真结果表明:清澈海域中,传输距离 < 40 m,发射角 $< 0.8^\circ$ 时,时延扩展小于0.03 ns,对信道特性的影响可以忽略,因此可以认为无码间干扰,接收端不需要复杂的信号处理算法。

但在海港海域,时延扩展随着发散角增大而增大,从而降低信道的传输效率。当衰减长度小于等于漫射长度($c(\lambda) = 2.19$, $L_{diff} = 15.1$ m)时,取FOV相同条件下,接收光功率值近似于Beer定理,因为在短距离传输时,几何衰减很小,可用Beer定理近似。此外,接收光强与FOV和孔径大小关系图中可以看出,光强随接收孔径的增大而减小,因为在衰减长度较小时,光束到达接收端距离短,光子偏离主轴角度较小。

当衰减长度大于漫射长度时,接收功率高于Beer定理,且 $FOV \leq 30^\circ$ 条件下,接收光强随着FOV的增大而增大,但 $FOV > 30^\circ$ 时,接收光强大小基本保持不变,且与孔径大小无关。

因此,文中研究结果为下一步建立准确的水下无线光通信信道模型奠定了重要的理论基础。

参考文献:

- [1] Sun Zhibin, Huang Zheng, Ye Weilan, 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, 叶蔚蓝, 等. 深空、自由空间、非可视散射和 水下激光光子通信 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(9): 2425–2430.
- [2] Khalighi M A, Gabriel C, Hamza T, et al. Underwater wireless optical communication: recent advances and remaining challenges[C]//ICTON, 2014: 1–4.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Giles J W, Bankman I. Underwater optical communications systems. Part 2: Basic design considerations [C]//IEEE Military Communications Conference(MILCOM), 2005, 3: 1700–1705.
- [6] Gabriel C, Khalighi M A, Bourennane S, et al. Monte-Carlo-based channel characterization for underwater optical communication systems[J]. *J OPT Commun NETW*, 2013, 5(1): 1–12.
- [7] Gabriel C, Khalighi M, Bourennane S, et al. Misalignment considerations on point-to-point underwater wireless optical links[C]//IEEE OCEANS Conference, 2013: 1–5.
- [8] Cochenour B, Mullen L, Muth J. Temporal response of the underwater optical channel for high-bandwidth wireless laser communication [J]. *IEEE Journal of Ocean Engineering*, 2013, 38(4): 730–742.
- [9] Arnon S, Kedar D. Non-line-of-sight underwater optical wireless communication network [J]. *JOSA A*, 2009, 26: 530–539.
- [10] Jasman F, Green R J. Monte Carlo simulation for underwater optical wireless communications [C]//IWOW Workshop, 2013: 113–117.
- [11] Tang S, Dong Y, Zhang X. Impulse response modeling for underwater wireless optical communication links [J]. *IEEE Trans Commun*, 2014, 62(1): 226–234.
- [12] Cox W. Simulation, modeling, and design of underwater optical communication systems [D]. Raleigh: North Carolina State University, 2012.
- [13] Mobley C D. Light and Water: Radiative Transfer in Natural Waters[M]. New York: Academic Press, 1994.
- [14] Petzold T J. Volume scattering functions for selected ocean waters [R]. San Diego, CA: Scripps Institution of Oceanography Visibility Laboratory, 1972: 72–78.