

# 基于平顶光束的水下无线光通信系统的仿真分析

周龙杰, 周东, 曾文兵

电子科技大学电子科学技术研究院, 四川 成都 611731

**摘要** 针对长距离水下无线光通信系统,采用蒙特卡罗方法研究了水下光束的传输特性。提出采用平顶光束替代传统高斯光束,以延长通信系统的传输距离。通过对比平顶光束和高斯光束在三类清澈海水中的传输特性,基于脉冲位置调制技术,对两种水下无线光通信系统进行实验仿真。结果表明:在相同条件下,高斯光束和平顶光束的水下无线光通信系统的可靠视频传输距离上限分别为 268 m 和 340 m。在清澈海水中,采用平顶光束可以有效延长水下无线光通信系统的通信距离。该结果为长距离水下无线光通信系统设计提供了参考。

**关键词** 光通信; 水下无线光通信; 蒙特卡罗法; 平顶光束

中图分类号 TN929.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.070603

## Simulation Analysis of Undersea Wireless Optical Communication System Based on Flat-Topped Beam

Zhou Longjie, Zhou Dong, Zeng Wenbing

Research Institute of Electronic Science and Technology, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 611731, China

**Abstract** Using the Monte Carlo method, we investigate the transmission characteristics of light beam through seawater for long-reach undersea wireless optical communication system. The traditional Gaussian beam is replaced with flat-topped beam, which can extend the distance of communication system. Then we compare the transmission characteristics of flat-topped beam and Gaussian beam in three kinds of clear seawater, and simulate the two kinds of underwater wireless optical communication systems based on pulse position modulation. The results show that the upper limit of reliable video transmission distance of undersea wireless optical communication system is 268 m for using Gaussian beam and 340 m for using flat-topped beam under the same condition, respectively. The application of flat-topped beam is viable to extend the communication distance of underwater wireless optical communication system in clear seawater. The results provide a reference for the design of long-reach underwater wireless optical communication systems.

**Key words** optical communications; underwater wireless optical communication; Monte Carlo method; flat-topped beams

**OCIS codes** 060.4510; 010.4450; 010.4455

## 1 引言

水下通信技术在军事、工业以及科学研究等方面有着举足轻重的作用。随着人类对海洋探测、海底监控和海洋开发需求的日益增加,海洋活动范围不断扩大,水下有线通信技术已经难以满足人们的需求。现有的水下无线通信技术主要有电磁波、声

波以及光波三种形式。由于电磁波在水中衰减严重,基于电磁波的水下通信系统只能满足短距离或低容量的传输需求。与电磁波相比,声波在水中的衰减程度极大降低,但水声信道的带宽有限,水声通信能用的信号频率通常在 20 kHz 以下<sup>[1]</sup>。而且水声通信的方向性较差,难以满足水下通信对通信速率和安全性的需求。而基于光波的水下通信系统具

收稿日期: 2017-12-05; 收到修改稿日期: 2017-12-29

作者简介: 周龙杰(1992—),男,硕士研究生,主要从事水下无线光通信方面的研究。E-mail: zlj1018555@sina.com

导师简介: 周东(1969—),男,硕士,副教授,硕士生导师,主要从事光纤通信系统、光电信息应用系统方面的研究。

E-mail: zhoudong@uestc.edu.cn

有带宽大、延迟低和方向性好等特点。因此,水下无线光通信技术也成为水下无线通信技术研究的热点。

与光纤通信领域一样,较大的距离带宽积也是水下无线通信系统所追求的目标。为了获得较高的传输速率,众多调制技术已经被广泛研究和应用。Oubei 等<sup>[2]</sup> 基于 16-QAM-OFDM 技术实现了 4.8 Gbit/s 的高速水下无线光通信系统,其通信距离仅为 5.4 m。Kong 等<sup>[3]</sup> 利用 RGB 激光二极管,采用波分复用技术实现了 9.51 Gbit/s 的水下无线光通信系统,其通信距离仅扩展到 10 m。

为了延长水下无线光通信系统的传输距离,可以从两个方面入手:一方面可以提高激光的峰值功率;另一方面可以提高接收端的灵敏度<sup>[4]</sup>。韩彪等<sup>[5]</sup> 提出了一种改进型光子通信方法,实验表明该方法能够有效提高接收端的灵敏度。本文提出利用平顶光束作为发射光源,替代传统的高斯光束,以延长水下无线光通信系统的通信距离。通常激光器发射出的光束为高斯光束,利用光束整形技术可以将高斯光束转化为能量均匀分布的平顶光束,其光能透过率高达 99%<sup>[6]</sup>。本文基于蒙特卡罗法对不同水质下的高斯光束和平顶光束的传播过程进行仿真,比较了两种光束在不同水质下的传输特性。并基于脉冲位置调制(PPM)技术对两种光束的水下无线光通信系统性能进行仿真。根据视频信息传输评估指标,对水下无线光通信系统的传输距离进行估算,为基于平顶光束的水下无线光通信系统研究提供理论依据。

## 2 仿真模型

### 2.1 水下光衰减模型

吸收和散射是海水中光波衰减的两个主要过程,其衰减系数与光波波长、海水的深度和浊度以及生物含量等因素有关。衰减系数可以表示为吸收系数和散射系数之和,即<sup>[7]</sup>

$$c(\lambda) = a(\lambda) + b(\lambda), \quad (1)$$

式中: $\lambda$  为光波长; $a(\lambda)$  为吸收系数; $b(\lambda)$  为散射系数。海水对光波的衰减作用主要与海水纯度,海水中溶解的有机物、浮游植物和颗粒物等因素有关。本文利用海水的生物-光学模型<sup>[8-9]</sup> 对海水的衰减系数、吸收系数和散射系数进行估算。通常长距离水下无线光通信系统应用于远洋海水中。因此,根据 Jerlov 水体<sup>[8]</sup> 的分类,本文选择清澈海水中三类典型的衰减系数作为仿真数据,如表 1 所示。

表 1 清澈海水三种典型的光衰减系数

Table 1 Three typical attenuation coefficients in clear sea water

Type	Wavelength /nm	$c / m^{-1}$	$a / m^{-1}$	$b / m^{-1}$
I	425	0.0566	0.0543	0.0023
II	430	0.1002	0.0555	0.0447
III	430	0.1693	0.0563	0.1130

从表 1 可见,第 I 类清澈海水中,吸收作用在衰减中起主要作用,散射作用不明显。第 II 类清澈海水中,吸收作用和散射作用在衰减中作用几乎相同。而第 III 类海水中,散射作用在衰减中起主导作用。

### 2.2 水下光信道蒙特卡罗模型

蒙特卡罗法将光在物质中的传输问题转为光子的传输问题。该方法已经被很多文献用于研究和分析海水的信道特性<sup>[10-12]</sup>。该方法通过发射大量光子并记录其运动轨迹及相关参数的变化来模拟水下光束的传输过程,其主要步骤如图 1 所示。

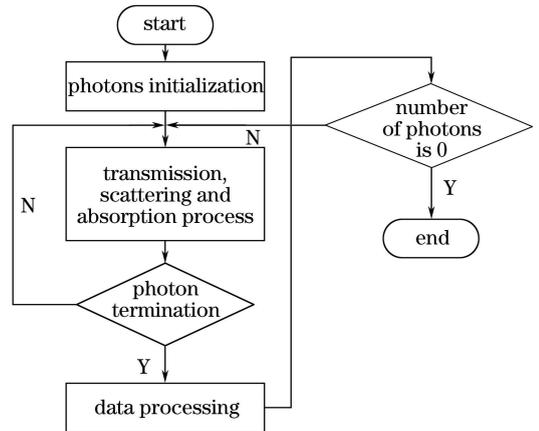


图 1 蒙特卡罗法仿真流程图

Fig. 1 Flow chart of the Monte Carlo simulation

在模型中,光子在海水中的传输过程可以分为三个步骤:光子初始化、吸收和散射过程的计算、光子终止判决和统计处理。在初始时刻,光子从特定的位置沿特定方向射入水中,在水中传播一定距离后,遇到散射体发生散射过程和吸收过程;如果光子的能量大于阈值,则对光子是否抵达接收面进行判断,若抵达接收面则停止记录,若没有抵达则计算新的坐标和方向余弦,如此反复,直到光子抵达接收面或“湮灭”为止。

假设每个发射光子的权重为 1,根据发射光子数和接收孔径内光子的权重,可以计算出单次蒙特卡罗仿真的归一化接收光功率,即

$$P_{r, \text{norm}} = \sum_{i=1}^{N_r} p_i / N, \quad (2)$$

式中: $P_{r\_norm}$ 为归一化接收光功率; $p_i$ 为单个接收光子的权重; $N_r$ 为接收平面的光子数; $N$ 为发射光子数。

高斯光束和平顶光束的区别主要在于发射平面的能量分布和能量大小不同。首先,发射平面的能量分布对应于仿真模型中光子的初始位置。高斯光束的所有光子在发射平面的分布服从高斯分布,即<sup>[10]</sup>

$$r_{0\_G} = \omega_{0\_G} \sqrt{-\ln(1 - \chi_1)}, \quad (3)$$

式中: $r_{0\_G}$ 为高斯光束的采样半径值; $\omega_{0\_G}$ 为高斯光束的波束宽度; $\chi_1$ 为满足 $0 \sim 1$ 之间均匀分布的随机数。

平顶光束的物理模型为圆域函数<sup>[6]</sup>。因此,平顶光束的所有光子在发射平面的分布服从均匀分布,即

$$r_{0\_T} = \omega_{0\_T} \chi_2, \quad (4)$$

式中: $r_{0\_T}$ 为平顶光束的采样半径值; $\omega_{0\_T}$ 为平顶光束的波束宽度; $\chi_2$ 为满足 $0 \sim 1$ 之间均匀分布的随机数。

其次,考虑到光束整形技术的效率问题,实际上平顶光束的归一化接收光功率满足如下关系

$$P_{r\_T} = \eta_{G-T} P_{r\_norm}, \quad (5)$$

式中: $P_{r\_T}$ 为平顶光束的归一化接收光功率; $\eta_{G-T}$ 为光束整形效率。基于微透镜阵列的激光光束整形技术可以实现一种近似能量无损的高效光束整形器件<sup>[13]</sup>。

### 3 结果分析与讨论

为了获得真实、准确的仿真结果,水下光信道蒙特卡罗模型的模拟计算参数设置如下:光子数为 $10^6$ ,非对称因子 $g = 0.924$ <sup>[11]</sup>,发散角 $\theta_0 =$

$1.5 \text{ mrad}$ ,波束宽度 $\omega_0 = 0.15 \text{ cm}$ ,接收孔径 $D_r = 10 \text{ cm}$ ,接收视场角 $A_{r\_FOV} = 180^\circ$ ,光束整形效率 $\eta_{G-T} = 0.99$ 。

根据蒙特卡罗水下光信道模型,以高斯光束作为参考,对平顶光束的特性进行研究。图2仿真了两种光束在三种清澈海水中归一化接收光功率和传输距离之间的关系。从图中可以看出,随着传输距离的增加,归一化接收光功率呈指数衰减。在第II类和第III类清澈海水中,归一化接收光功率在一段距离之后产生了动态变化,而这个变化的范围是一定的,其原因为光信号受到随机散射的影响<sup>[14]</sup>。在同一类清澈海水中,平顶光束的归一化接收光功率均大于高斯光束。

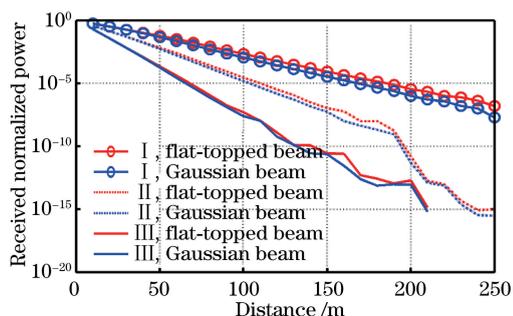


图2 归一化接收光功率和传输距离之间的关系

Fig. 2 Normalized received power versus distance

为了进一步分析平顶光束的特性,图3给出了在不同水质中两种光束在 $100 \text{ m}$ 处的强度分布情况。图3(a)、(b)和(c)分别为平顶光束在第I类、第II类和第III类清澈海水的强度分布情况,(d)、(e)

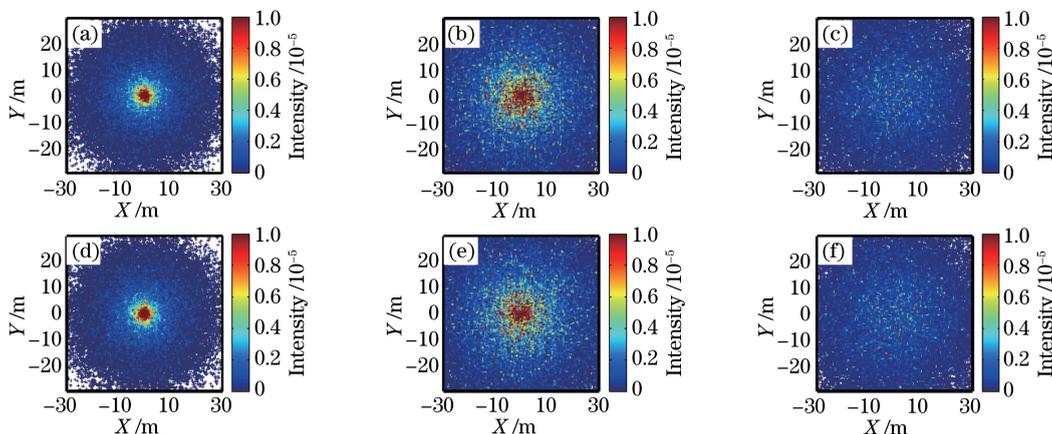


图3 平顶光束和高斯光束在 $100 \text{ m}$ 处的强度分布。(a)平顶光束在I类清澈海水中;(b)平顶光束在II类清澈海水中;(c)平顶光束在III类清澈海水中;(d)高斯光束在I类清澈海水中;(e)高斯光束在II类清澈海水中;(f)高斯光束在III类清澈海水中

Fig. 3 Intensity distributions of flat-topped beam and Gaussian beam at  $100 \text{ m}$ .

(a) Flat-topped beam in clear seawater I; (b) flat-topped beam in clear seawater II; (c) flat-topped beam in clear seawater III; (d) Gaussian beam in clear seawater I; (e) Gaussian beam in clear seawater II; (f) Gaussian beam in clear seawater III

和(f)分别为高斯光束在第 I 类、第 II 类和第 III 类清澈海水的强度分布情况。第 I 类清澈海水中,两种光束的强度分布较为集中;第 II 类和第 III 类清澈海水中,两种光束的强度在接收平面的各个方向都有不同程度的扩展。与高斯光束相比,平顶光束在三类清澈海水中的强度分布更加集中。因此,在接收孔径有限的情况下,利用整形后的平顶光束接收机可以接收到更多的光功率。

基于脉冲位置调制技术对水下无线光通信系统的性能进行分析。对于 PPM 调制方式,随着调制阶数的增加,达到相同误码率所需的信噪比将会增大<sup>[15]</sup>。时隙数的增加会导致 PPM 帧错误解调的可能性变大。为了保证水下无线光通信的可靠性,选择低阶 PPM 进行研究。图 4 给出了三类清澈海水中两种光束通信系统的误码性能与传输距离之间关系。采用文献[16]中 PPM 的仿真数据:发射光功率  $P_t = 1 \text{ W}$ , 比特分辨率为 3, PPM 符号数为 1000, 比特速率为 10 Mbit/s。

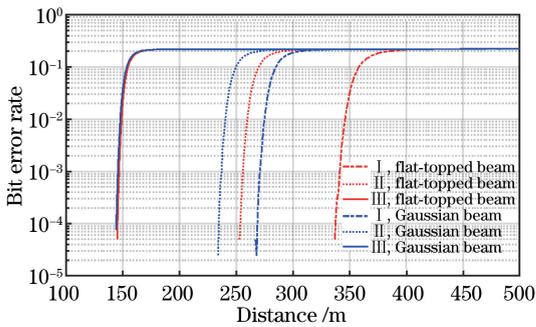


图 4 误码率与传输距离之间的关系

Fig. 4 Bit error rate versus distance

由图 4 可见,在水下无线光通信系统中,通信误码率随着传输距离的增加而增大。H.246 视频标准采用了变换编码。这种编码不会产生误码扩散,其影响只限制在一个块内,而且反变换后误码会均匀分散到块内各个像素上,对视觉影响不大<sup>[17-18]</sup>。在 H.264 视频的可靠传输系统中,一般要求信道误码率不大于  $10^{-4}$ 。因此,基于高斯光束的通信系统在三类不同的清澈海水中可靠的视频传输距离分别为 144, 236, 268 m。而基于平顶光束的通信系统在三类不同的清澈海水中可靠的视频传输距离分别为 147, 253, 340 m。

## 4 结 论

本文采用蒙特卡罗仿真模型对平顶光束和高斯光束水下无线光通信系统的性能进行仿真分析。仿

真比较了不同类型的清澈海水对两类光束接收光功率、光强分布和通信系统误码率的影响。结果表明:在清澈海水中,采用平顶光束对水下无线光通信系统的性能有一定的改善,尤其是在以吸收作用为主的海水中。其原因为平顶光束可以缓解水下光传输的空间扩展特性,接收机可以收集到更多的光子能量。在第 I 类清澈海水中,基于平顶光束的水下无线光通信系统的可靠视频传输距离为 340 m。

## 参 考 文 献

- [1] Zhou F. The study of the key technologies for underwater acoustic spread-spectrum communication [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2012. 周锋. 水声扩频通信关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.
- [2] Oubei H M, Duran J R, Janjua B, *et al.* 4.8 Gbit/s 16-QAM-OFDM transmission based on compact 450-nm laser for underwater wireless optical communication[J]. *Optics Express*, 2015, 23(18): 23302-23309.
- [3] Kong M, Lü W, Ali T, *et al.* 10-m 9.51-Gb/s RGB laser diodes-based WDM underwater wireless optical communication[J]. *Optics Express*, 2017, 25(17): 20829-20834.
- [4] Hu S Q, Zhou T H, Chen W B. Performance analysis and simulation of maximum ratio combining in underwater laser communication [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(12): 1206003. 胡思奇, 周田华, 陈卫标. 水下激光通信最大比合并分集接收性能分析及仿真[J]. *中国激光*, 2016, 43(12): 1206003.
- [5] Han B, Zhao W, Wang W, *et al.* Modified photon counting communication method for underwater application[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(8): 0806004. 韩彪, 赵卫, 汪伟, 等. 面向水下应用的改进型光子计数通信方法[J]. *光学学报*, 2016, 36(8): 0806004.
- [6] Gao Y H. Research of Gaussian beam shaping [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2012. 高琨含. 高斯光束整形技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2012.
- [7] Mobley C D. Light and water: radiative transfer in natural waters [M]. New York: Academic Press, 1994.
- [8] Wang F, Yang Y, Duan Z L, *et al.* Characteristic

- analysis of underwater laser signal transmission channel based on visible light [J]. *Optical Communication Technology*, 2016, 40(3): 26-28.
- 王菲, 杨祎, 段作梁, 等. 基于可见光的水下激光传输信道的特性分析[J]. *光通信技术*, 2016, 40(3): 26-28.
- [9] Ding Y. Low-cost underwater wireless optical communication system for small facilities [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- 丁阳. 用于小型设备的低成本水下无线光通信装置[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [10] Cox W C. Simulation, modeling, and design of underwater optical communication systems [D]. Raleigh: North Carolina State University, 2012.
- [11] Gabriel C, Khalighi M A, Léon P, *et al.* Monte-Carlo-Based channel characterization for underwater optical communication systems [J]. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 2013, 5(1): 1-12.
- [12] Hu X H, Hu S Q, Zhou T H, *et al.* Rapid estimation of the maximum communication distance for an underwater laser communication system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(8): 0805007.
- 胡秀寒, 胡思奇, 周田华, 等. 水下激光通信系统最大通信距离的快速估计[J]. *中国激光*, 2015, 42(8): 0805007.
- [13] Chen K. Research of laser beam shaping based on microlens array[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2015.
- 陈宽. 基于微透镜阵列的激光光束整形技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2015.
- [14] Li J. Research on modulated-carrier underwater wireless laser communications based on analytic Monte Carlo methods [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013.
- 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.
- [15] Du J S, Zhou T H, Chen W B, *et al.* Performance Analysis of Underwater Optical Communication Based on LDPC and PPM [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(12): 120605.
- 杜劲松, 周田华, 陈卫标, 等. 基于 LDPC 和 PPM 的水下光通信性能分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(12): 120605.
- [16] Ghassemlooy Z, Popoola W, Rajbhandari S. Optical wireless communications: system and channel modelling with MATLAB[M]. [S. l.]: Taylor & Francis Inc, 2012.
- [17] Ma L H. Study on the source and channel coding theory and techniques of video communication in error-prone environments [D]. Xi'an: Xidian University, 2006.
- 马林华. 误码环境下的视频信源信道编码理论与技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2006.
- [18] Bi H J, Wang J. The next generation video compression coding standard: H.264/AVC[M]. 2nd edition, Beijing: Beijing People's Post and Telecommunications Press, 2009.
- 毕厚杰, 王健. 新一代视频压缩编码标准: H.264/AVC[M]. 第2版, 北京: 人民邮电出版社, 2009.