

基于商用蓝光 LED 的深海高速无线光通信系统

王金龙¹, 高进¹, 吴振刚¹, 李上宾², 朱家远¹

(1. 中国电子科技集团公司 第八研究所, 合肥 230051; 2. 中国科学技术大学 信息学院, 合肥 230027)

摘要: 针对激光二极管(LD)光源光束窄、发散角小、出光功率受阻和对准困难等问题, 提出了一种基于商业蓝光发光二极管(LED)的深海高速无线光通信系统, 并对系统在 10 m、50 m 的一类海水信道中分别进行实验与仿真。结果表明: 为了保证系统误码率低于 10^{-3} , 当水下信道长 10 m 时, 数据传输速率可达 500 Mb/s; 当水下信道长 50 m 时, 数据传输速率可达 20 Mb/s。

关键词: 水下无线光通信; 蓝光发光二极管; 开关键控调制

中图分类号: TN929.12 文献标志码: A 文章编号: 1002-5561(2021)11-0041-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2021.11.008

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Deep sea high-speed wireless optical communication system based on commercial blue LED

WANG Jinlong¹, GAO Jin¹, WU Zhengang¹, LI Shangbin², ZHU Jiayuan¹

(1. The 8th Research Institute of CETC, Hefei 230051, China;

2. School of information, University of science and technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: Aiming at the problems of narrow beam, small divergence angle, blocked output power and difficult alignment of laser diode (LD) light source, a deep sea high-speed wireless optical communication system based on commercial blue light emitting diode(LED) is proposed, and the system is tested and simulated in a kind of seawater channel of 10 m and 50 m respectively. The experimental and simulation results show that, in order to ensure the bit error rate of the system is less than 10^{-3} , when the underwater channel is 10 m long, the data transmission rate can reach 500 Mb/s, and when the underwater channel is 50 m long, the data transmission rate can reach 20 Mb/s.

Key words: underwater optical wireless communication; blue light emitting diode; on-off key modulation

0 引言

水声通信因数据速率低、时延大而受到许多应用限制。由于趋肤效应, 射频电磁波在水中传播时衰减很大, 因此利用射频电磁波实现水下通信极其困难。与射频电磁波相比, 由于蓝光在水下吸收散射引起的衰减较小, 因而水下蓝光无线光通信引起了人们广泛的兴趣^[1]。近几年, 基于微米级发光二极管(μ LED)或激光二极管(LD)的高速水下无线光通信(UOWC)

系统已经被实验证明是可行的^[2-17], 传输距离能达到几十米, 甚至上百米。但由于 LD 光源光束窄、发散角小和出光功率受阻, 长距离传输后需要严格的跟踪对准系统, 并且在发射端和接收端需要超高增益光学天线, 而采用合适的商业蓝光发光二极管(LED)却不受窄角度波束限制, 能在 10~50 m 的水下通信信道中传输视频、数据或遥控信号^[15-17]。同时, 与蓝光 LD 光源相比, 商用蓝光 LED 的寿命更长。因此, 本文提出一种基于商用蓝光 LED 的深海高速无线光通信系统。

收稿日期: 2020-06-28。

作者简介: 王金龙(1989—), 男, 安徽定远人, 硕士, 主要研究方向为光电子系统和器件, 参与国家自然科学基金 1 项, 参与单位新品项目和联合基金各 1 项, 发明专利 1 项, 发表 SCI 论文 2 篇(第一作者 1 篇), 发表核心期刊论文 2 篇。



1 水下蓝光 LED 通信系统设计

本文设计的水下蓝光 LED 通信系统由发射端、接收端和 10 m 长的玻璃水箱组成, 发射端和接收端样机实物如图 1 所示。

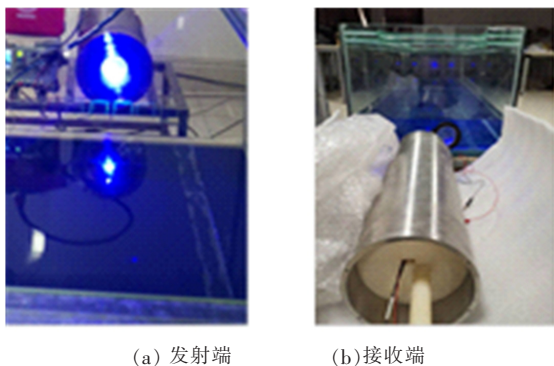


图 1 水下蓝光 UOWC 样机

1.1 发射端样机设计

在一类海水中, 水下蓝光 LED 通信收发样机的 UOWC 链路设计必须保证具有足够的鲁棒性。首先, 样机发射端配光需要被精心设计, 合适的光发射端角度和配光光型是保证中长距离 UOWC 链路鲁棒性的重要条件^[18]。其次, 链路需要能够承受水下信道的动态变化而不中断。在样机的发射端与接收端, 本文分别设计特别的蓝光 LED 模块和雪崩光电二极管(APD)。蓝光 LED 模块由 3 个发光 10° 全角的蓝光 LED 光源组成, 并且每个蓝光 LED 配光是正方形, 当蓝光 LED 模块与发射端集成在耐压外壳上的透镜保持合适的装配距离时会产生独特的方形配光光型。在方形光覆盖区域内, 即使发射机和接收机之间存在横向位移, 接收机的信噪比分布也是均匀的, 从而在设计上保证了收发端一定程度的灵活移动性。

对于中长距离 UOWC 链路, 10° 全角的发射端蓝光 LED 模块的配光还需要通过一个额外的光束整形透镜调整配光光型。本文采用一个孔径为 8 cm 的半凸透镜作为光束整形透镜, 使得出射光束的光强半峰值全角缩减为 6° 左右。

发射端在正常的驱动条件下, 总共提供约 100 mW 的输出光功率。在空气中, 即使传输距离增加, 出射的蓝光光束也能基本保持正方形截面的形状。本文根据发射端样机的 3D 配光数据, 可仿真得知在 50 m 水下链路接收端处有约 $4\text{ m} \times 4\text{ m}$ 的光信号可探测区域, 与水下激光通信相比, 这种 LED 光通信系统提高了 UOWC 链路在收发端发生相对位移时保持通信性能的可用性。另外, 由于独特的发射端配光设计, 可探测接收面处的光信号功率基本服从均匀分布, 与朗伯分布的 UOWC 光源设计相比, 均匀的信号强度分布更有助于收发端抵御震动的影响。

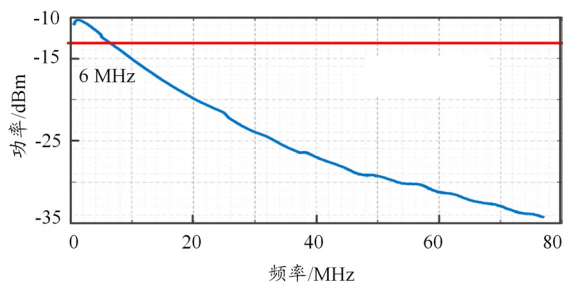
1.2 接收端样机设计

在接收端, 最外层的耐压透明窗口内安装了一个

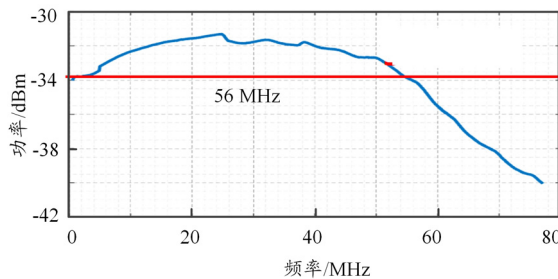
孔径为 9 cm 的薄凸透镜, 此透镜可以显著提升入射蓝光信号在光探测器上的增益。本文选择高带宽的 APD 作为光探测器, APD 被一个支撑构件固定在耐压外壳内。接收端样机耐压外壳上也集成一个聚光透镜, 用于提高接收端光信号增益。为了兼顾光信号大增益与链路的移动性, 聚光透镜与 APD 之间距离需要被细致地调整优化。

由于蓝光 LED 的带宽受限, 因此需要先进行模拟预均衡, 预均衡前、后的 LED-APD 链路频率响应如图 2 所示。模拟预均衡前, 3 dB 调制带宽为 6 MHz, 如图 2(a)所示; 预均衡后, 3 dB 调制带宽被提升到 56 MHz, 如图 2(b)所示。本文使用了一个无源模拟均衡电路对蓝光 LED 光源部分电光响应频响曲线的高频衰减进行补偿, 无源模拟均衡电路的自身频谱响应如图 3 所示, 其本质是一个高通滤波器。

APD 模块在高反向偏压情况下具有检测微弱光信号能力, 且 APD 模块的增益可以被调整到很高的水



(a) 模拟预均衡前



(b) 模拟预均衡后

图 2 LED-APD 链路的频率响应

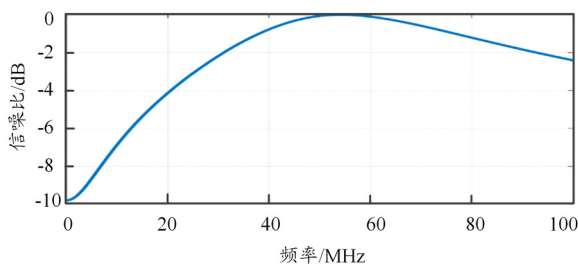


图 3 模拟预均衡电路自身的频率响应

平, 即使其灵敏度受到热噪声限制, 也可以在几十 Mb/s 的数据速率下实现较高的灵敏度。但对于几百 Mb/s 的数据传送速率要求, 一个可靠的 UOWC 方案需要让接收端有较大的信噪比冗余。为此, 本文在样机的接收端 APD 模块的后面增加了一个低噪放大器。

1.3 信号调制方式选择

对于水下光通信样机的研制, 信号调制方式的选择至关重要^[18]。 M 进制正交幅度调制 (M -QAM) 与正交频分复用 (OFDM) 等高阶多载波调制都具有较高频谱利用率, 往往应用在高速光通信中。由于水下长距离信道的高衰减, 且高阶调制对信噪比敏感, 在水下湍流和气泡信道中稳定性也较差, 因此水下光通信样机发射端的调制方式采用复杂度和成本更低的开关键控 (OOK) 调制方式。但在基于蓝光 LED 的 UOWC 系统中采用 OOK 调制方式时, 数据速率通常受到 LED 有限调制带宽的限制。因此, 需要采用数字域和模拟域预均衡以提高调制带宽^[19-21]。

2 10 m 水下蓝光 LED 通信实验

本文的水下蓝光通信实验是在一个 10 m 长的玻璃水箱进行的, 样机发射端和接收端分别被放置在水箱的两端。水质对水下蓝光通信误码率性能有显著影响, 本文在玻璃水箱中加入纯净水来模拟一类海水信道。经 450 nm 波长激光测试水体吸收和散射引起的路径损耗可知, 实验信道的水体衰减系数在 0.058/m 左右, 在一类海水的蓝光衰减系数范围之内。光信号的另一类路径损耗是几何衰减, 当发光面特征尺寸远小于收发端距离时, 几何衰减引起的路径损耗与收发端距离平方成正比。

水下蓝光 LED 无线光通信系统实验原理如下: 在发射端, 首先产生随机 OOK 信号 (数据帧的总长度为 262088), 并通过数字域预均衡来扩展链路带宽; 预均衡后的数字信号通过任意波形发生器 (AWG M9505a) 经 4 倍上采样 (采样率为 2 GS/s) 后产生模拟信号, 模拟信号经过模拟域均衡电路、功率放大器后通过偏置器与偏置电压一起加载到蓝光 LED 的蓝光上, 然后入射到透明水缸中, 经过 10 m 的水下光路传输到达接收端。在接收端, 发散的蓝光信号先通过样机耐压外壳上集成的光学透镜会聚到 APD 中, 光信号由 APD 转为电信号后经过低噪放大模块对信号进行放大, 再由示波器 (采样率为 2 GS/s) 采样到计算机端进行离线数字信号处理 (帧头同步、非线性数字均衡和误码率计算)。

模拟域预均衡后的带宽虽然可以达到 56 MHz, 但要满足 500 Mb/s 的通信性能要求, 还需要数字域补偿。在数字域补偿中, 先在发射端进行前向数字域预均衡, 然后在接收端进行数字域后向均衡。数字域预均衡的思路和模拟均衡电路的补偿原理一致, 通过降低信号中的低频分量, 尽量保证信号在信道带宽内的响应相对平整。

实验过程中, 在发射端加入了数字预均衡处理后显著改善了水下蓝光通信链路的脉冲响应 (抬高了链路在高频部分的响应, 降低了链路的低频信号功率)。在信号数/模转换后, 对信号进行适当的放大可以解决信号功率由于预均衡导致衰减的问题。虽然发射端采用模拟域和数字域的预均衡方式缓解了 LED 光源有限带宽对通信速率的限制, 但在链路进行高速率通信时接收信号仍存在码间串扰。因此, 在接收端需采用数字域后均衡处理 (本文采用基于 Volterra 级数的非线性均衡器^[14])。非线性均衡器的抽头结构参数如下: 记忆深度为 15, 非线性阶数为 2, 训练长度为 5000, 抽头系数为 120。同时, 本文测试了后向非线性均衡器的使用对水下蓝光通信系统性能的影响, 测试结果表明: 在 4 种均衡处理方式 (无数字域预均衡+无数字域后向均衡、仅数字域后向均衡、仅数字域预均衡和数字域预均衡+数字域后向均衡) 中, 只有数字域预均衡+数字域后向均衡的信号图可以区分 0 和 1, 误码率低于 10^{-3} 。因此, 在带宽受限的蓝光收发链路中进行高速率通信时, 只有发射端预均衡对性能改善的影响并不明显, 往往需要与后向均衡相结合才能获得较理想的通信性能。

本文在水下 10 m 500 Mb/s 蓝光通信链路上随机测试了 8 组误码率数据, 测得的误码率分别为: 2.65×10^{-4} 、 2.49×10^{-4} 、 4.20×10^{-4} 、 2.18×10^{-4} 、 4.35×10^{-4} 、 2.64×10^{-4} 、 4.05×10^{-4} 和 4.35×10^{-4} 。结果表明, 所得到的误码率均低于误码率阈值 (1×10^{-3})。

3 50 m 水下蓝光 LED 通信仿真分析

本文设计的样机发射端正常工作时可提供约 100 mW 的输出蓝光功率, 一类海水水体散射对于非相干光束传输截面形状的改变很小, 水中的蓝光光束可以保持正方形截面的形状, 经过 50 m 的水下传输, 散射吸收导致蓝光功率衰减 5.5%。在接收端, 用直径为 9 cm 的聚焦透镜对蓝光进行汇聚, 然后精确耦合到 APD 的有效光敏区域, 在 APD 模块中有跨阻放大 (TIA) 电路, 直接输出电压信号。APD 有效光敏区域直

径为 1 mm, 光电响应率约为 0.25 A/W, APD 的噪声等效功率典型值约为 $0.5 \text{ pW/Hz}^{1/2}$ 。另外, 由于水体折射率, 全角 6° 的蓝光光束在水中会形成全角 4.5° 的蓝光光束。本文根据表 1 中的关键仿真参数和发射端的 3D 配光数据进行仿真, 仿真结果表明: 在 50 m 水下链路接收端处约 $4 \text{ m} \times 4 \text{ m}$ 的光信号可探测区域内, APD 能接收到的信号光功率大约为 $13.5 \text{ } \mu\text{W}$, 其远大于探测器的灵敏度; 在误码率低于 10^{-3} 情况下, 最高通信速率可达 20 Mb/s。

表 1 50 m 水下蓝光 LED 通信关键仿真参数

参数名称	数值	参数名称	数值
玻璃-水界面光效率	0.92	水体衰减系数/ m^{-1}	0.058
收端光学系统效率	0.88	链路等效噪声功率/nW	10
水体折射率	1.33	采样率/ $(\text{MS} \cdot \text{s}^{-1})$	80
调制方式	OOK	上采样倍数/倍	4
调制深度	50%	通信距离/m	50

4 结束语

本文设计了一种基于商用蓝光 LED、采用 OOK 调制的水下无线蓝光通信系统(发射机光源由商用蓝光 LED 模块加上独特的级联透镜组成, 其独特的配光避免了小物体或气泡完全阻塞光路), 对系统在一类海水 10 m、50 m 信道中分别进行了实验与仿真, 通信速率分别达到了 500 Mb/s、20 Mb/s, 系统实验与仿真误码率均低于 10^{-3} 。后续研究表明, 当水下收发端相距 50 m 时, 即使收发端各垂直于收发轴线移动 2 m, 系统也能完成正常的通信。因此, 商用蓝光 LED 在低复杂度、低成本、低功耗和高速 UOWC 系统中具有较好的应用潜力。

参考文献:

- [1] ZENG Z, FU S, ZHANG H, et al. A survey of underwater optical wireless communications [J]. IEEE Commun. Surv. & Tutor., 2017, 19(1): 204–238.
- [2] TIVEY M, FUCILE P, SICHEL E. A low power, low cost, underwater optical communication system[J]. Ridge Events, 2000(1): 27–29.
- [3] DONIEC M, DETWEILER C, VASILESCU I, et al. AquaOptical: A lightweight device for high-rate long-range underwater point-to-point communication[J]. Marine Technology Society Journal, 2010, 44(4): 55–65.
- [4] SHEN C, GUO Y, OUBEI H M, et al. 20-meter underwater wireless optical communication link with 1.5 Gbps data rate [J]. Optics express, 2016, 24(22): 25502–25509.
- [5] LU H H, LI C Y, LIN H H, et al. An 8 m/9.6 Gbps underwater wireless optical communication system[J]. IEEE Photonics Journal, 2016, 8(5): 1–7.
- [6] SHEN C, GUO Y, SUN X, et al. Going beyond 10-meter, Gbit/s underwater optical wireless communication links based on visible lasers [C]

//IEEE. Proceedings of 2017 opto-electronics and communications conference (OECC) and photonics global conference (PGC). Singapore: IEEE, 2017: 1–3.

- [7] LI C Y, LU H H, TSAI W S, et al. 16 Gb/s PAM4 UWOC system based on 488-nm LD with light injection and optoelectronic feedback techniques [J]. Optics express, 2017, 25(10): 11598–11605.
- [8] WU T C, CHI Y C, WANG H Y, et al. Blue laser diode enables underwater communication at 12.4 Gbps[J]. Scientific reports, 2017, 7(1): 1–10.
- [9] CHEN Y, KONG M, ALI T, et al. 26 m/5.5 Gbps air-water optical wireless communication based on an OFDM-modulated 520-nm laser diode[J]. Optics express, 2017, 25(13): 14760–14765.
- [10] LIU X, YI S, ZHOU X, et al. 34.5 m underwater optical wireless communication with 2.70 Gbps data rate based on a green laser diode with NRZ-OOK modulation[J]. Optics express, 2017, 25(22): 27937–27947.
- [11] HU S, MI L, ZHOU T, et al. 35.88 attenuation lengths and 3.32 bits/photon underwater optical wireless communication based on photon-counting receiver with 256-PPM [J]. Optics express, 2018, 26(17): 21685–21699.
- [12] TIAN P, LIU X, YI S, et al. High-speed underwater optical wireless communication using a blue GaN-based micro-LED[J]. Opt. Express, 2017, 25(2): 1193–1201.
- [13] WANG F, LIU Y, JIANG F, et al. High speed underwater visible light communication system based on LED employing maximum ratio combination with multi-PIN reception[J]. Optics Communications, 2018, 425: 106–112.
- [14] LU C, WANG J, LI S, et al. 60m/2.5Gbps underwater optical wireless communication with NRZ-OOK modulation and digital equalization [EB/OL]. [2020–06–28]. https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=CLEO_SI-2019-SM2G.6.
- [15] WANG J, LU C, LI S, et al. 100 m/500 Mbps underwater optical wireless communication using an NRZ-OOK modulated 520 nm laser diode[J]. Optics express, 2019, 27(9): 12171–12181.
- [16] ZHUANG B, LI C, WU N, et al. First demonstration of 400Mb/s PAM4 signal transmission over 10-meter underwater channel using a blue LED and a digital linear pre-equalizer [EB/OL]. [2020–06–28]. https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?uri=CLEO_SI-2017-STh3O.3.
- [17] 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.
- [18] CHI N, SHI M. Advanced modulation formats for underwater visible light communications[J]. Chinese Optics Letters, 2018, 16(12): 120603–1–120603–11.
- [19] QIAN H, YAO S J, CAI S Z, et al. Adaptive postdistortion for nonlinear LEDs in visible light communications [J]. IEEE Photonics Journal, 2014, 6(4): 1–8.
- [20] LI X, CHEN H, LI S, et al. Volterra-based nonlinear equalization for nonlinearity mitigation in organic VLC [C]. IEEE. Proceedings of 13th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC). Valencia: IEEE, 2017: 616–621.
- [21] LI J, WANG F, ZHAO M, et al. Large-coverage underwater visible light communication system based on blue LED employing equal gain combining with integrated PIN array reception[J]. Applied Optics, 2019, 58(2): 383–388.