

# 近海岸水下激光信号传输实验研究

崔子浩 田兆硕 刘立宝 徐天赐 姚 灿 付石友\*

(哈尔滨工业大学(威海)信息光电子研究所, 山东 威海 264209)

**摘要** 建立了绿光水下激光传输的发射和接收实验系统,在威海近岸海域对调制激光信号在水下的传输特性进行了实验研究。系统以光电倍增管作为探测器,在不同接收负载情况下,观测了不同传输距离下绿光脉冲信号的接收波形。实验结果表明,大的接收负载有助于提高探测距离,采用 1 M $\Omega$  接收负载时的最大探测距离为 26 m。根据实验数据拟合不同距离处的接收光强,激光在海水中的传输信号强度呈 e 指数衰减趋势,其衰减系数为 0.5 m<sup>-1</sup>,可以推断在浑浊度较小的海域光传输距离会增加。

**关键词** 海洋光学; 光通信; 绿光; 水下

中图分类号 O439 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201340.s113004

## Experimental Study on Underwater Laser Signal Transmission Offshore

Cui Zihao Tian Zhaoshuo Liu Libao Xu Tianci Yao Can Fu Shiyou

(Information Optoelectronics Research Institute, Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai, Shandong 264209, China)

**Abstract** A system including underwater green light laser transmitter and receiver is designed. The optical transmission experiment is made in coastal waters of Weihai and a photomultiplier tube is used as a detector. Different waveforms and signal strengths under different distances are measured by using different receiving loads. The results show that a bigger load will get an increased distance. The effective transmission distance is 26 m when the load is 1 M $\Omega$ . Data is fitted under different distances, and it is found that the attenuation in coastal waters appears e exponential decay, the coefficient is 0.5 m<sup>-1</sup>. It can be deduced that the system will get a better performance in sea with smaller attenuation.

**Key words** oceanic optics; optical communication; green light; underwater

**OCIS codes** 010.4450; 060.4510

## 1 引 言

水下光通信是极具吸引力的水下高速通信手段,有着速度快、隐蔽性好的优点。蓝绿窗口在海洋中激光水下通信中的重要性,使蓝绿光成为海洋通信中的重要光源<sup>[1]</sup>。许多科学家加入到水下光通信的研究队伍中。然而由于水下光传输受到噪声、干扰、水质等问题的影响,信号在传输过程中产生严重的衰减和畸变<sup>[2]</sup>,使得目前的水下光通信,特别是海洋中的水下光通信仍然停留在短距离、低传输速率

的半实验阶段,近年来一些科学家如 Vasilescu 等<sup>[3-4]</sup>研制出用于水下短距离传输可见光的通信系统,通信距离在 10 m 以内。2008 年在实验室环境中,水下通信的数据传输速率达到了 1 Gb/s,但传输距离为 2 m<sup>[5]</sup>。2009 年 Fung 等<sup>[6]</sup>利用 50 mW 的半导体激光器作为光源,实现了水下机器人之间的短距离激光通信,速率达到 110 kb/s,但传输质量和清晰度对环境有很大的要求。2011 年 Yoshida 等<sup>[7]</sup>成功实现了速度为 10 MHz 的水下光通信,其

收稿日期: 2013-03-27; 收到修改稿日期: 2013-05-17

作者简介: 崔子浩(1982—),男,博士研究生,主要从事激光探测、激光通信等方面的研究。E-mail: cui\_zh@hit.edu.cn

导师简介: 田兆硕(1970—),男,博士,教授,主要从事气体、固体激光技术及信息光电子技术等方面的研究。

E-mail: tianzhaoshuo@126.com

\* 通信联系人。E-mail: fsytzs@126.com

通信距离达到 20 m。国内对于海水光通信的研究起于 20 世纪 90 年代初华中理工大学的激光水下通信预研项目,杜竹峰等<sup>[8]</sup>对机载激光对潜通信的通信和能量传递能力进行了计算,粗略给出接收信号衰减范围。刘西锋等<sup>[9]</sup>用软件 Pspice 对水下激光通信传输特性进行了评估,计算了水下光通信系统的误码率,提出随数据传输速率的提高误码率将变大。近年来在激光编码,扫描模式对水下激光通信的影响方面也有多名学者研究,特别是在计算机模拟研究方面<sup>[10-11]</sup>。综合以上激光水下通信国外和国内的发展状况,目前的水下激光通信存在传输距离与数据传输速率之间的矛盾,即如果用高功率的脉冲激光器,虽然传输距离远但数据传输速率低,而采用高重复频率的脉冲调制激光器,虽然提高了数据传输速率,但是传输距离会很近。

本文采用脉冲调制的 2 W 绿光激光器作为光源,研制了水下激光通信实验系统,在威海近海海域进行了水下激光通信实验研究。系统采用光电倍增

管作为探测器,分别在不同接收负载情况下,在不同距离用示波器记录接收的光信号波形,分析了水下调制激光信号的传输特性,为水下光通信的传输距离研究提供参考。

## 2 实验方法与装置

水下绿光通信实验系统如图 1 所示,整套系统主要包括发射系统及接收系统两大部分。发射系统由遥控系统、接收器、激光器、激光电源、激光调制器、电源、光学准直系统组成。通过遥控器控制发射系统中激光器和信号发生器的电源开关,可以改变脉冲调制信号的频率和占空比。信号发生器产生固定频率和占空比的方波,触发激光器,经过调制的绿光经过光学准直系统由水箱侧壁入射到海水中。接收系统由光学天线、探测器、放大器、供电电源、示波器组成。光学天线接收到水中的绿光调制信号,由探测器接收,探测信号经过放大后由示波器显示。

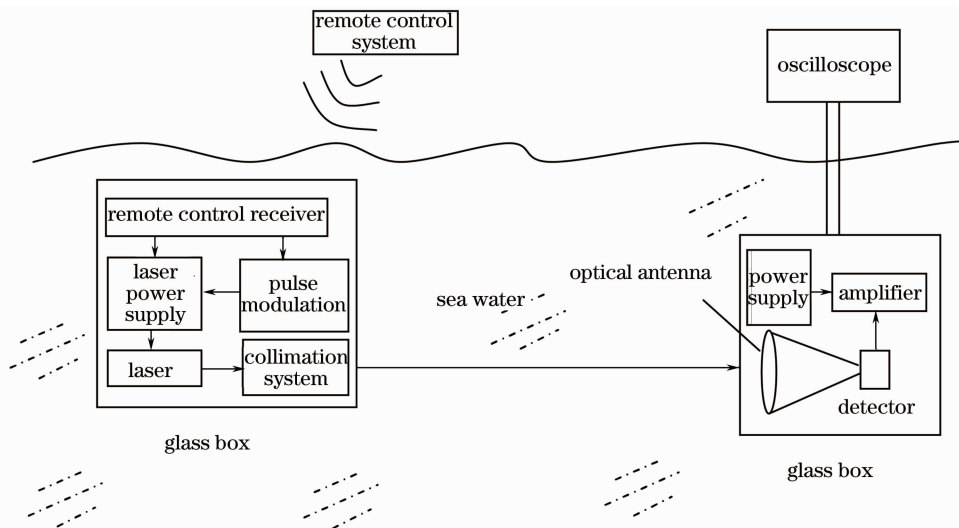


图 1 海水中激光传输示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the underwater communication system

实验中发射系统采用 2 W 的 532 nm 绿光激光器作为光源,通过 1 kHz、占空比为 10% 的脉冲信号进行调制,接收系统中采用光电倍增管作为探测器件。一般情况下,为较好地保持接收信号形状,接收系统需要提供足够的接收带宽,因此接收负载不宜过大。但由于光电倍增管输出为电流信号,而示波器显示的是电压信号,所以采用大的输出电阻可以提高探测信号的强度。虽然较大的输出负载会减小接收系统的有效带宽,在一定程度上影响接收信号的实际波形,但可以增加探测灵敏度,同时增加接收

有效信号的距离。

## 3 实验结果与分析

系统中采用的光电倍增管是一种具有高灵敏度和超快时间响应的光探测器件。其主要结构可分为光阴极、倍增结构、阳极等部分。入射光子激发光阴极所逸出的光电子被电场加速后打到第一倍增极上,在高速电子的激发下,第一倍增极产生二次电子发射,这些电子又被电场加速打到第二倍增极上,激发更多的二次电子,这个过程持续到倍增结构结

束,最后经过阳极收集输出电流。

根据光电倍增管的输出为电流信号这一特点,在相同触发信号、相同接收距离及相同增益下,分别

采用不同探测负载接收绿光信号,探测到的信号强度有明显不同,图2为四种负载下绿光调制信号的探测波形。

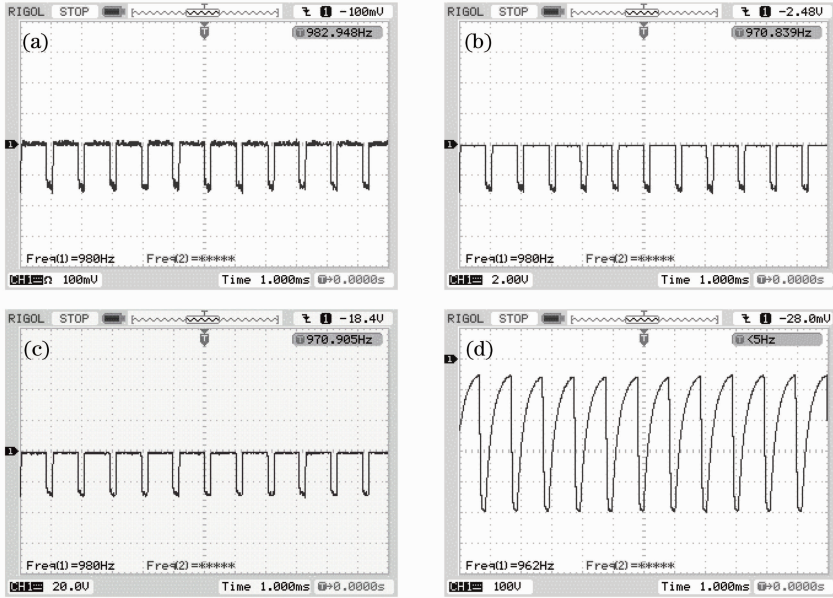


图2 触发信号及不同负载下的接收信号比较。(a)  $R=50\text{ k}\Omega, L=8\text{ m}$ ; (b)  $R=1\text{ k}\Omega, L=8\text{ m}$ ;  
(c)  $R=10\text{ k}\Omega, L=8\text{ m}$ ; (d)  $R=1\text{ M}\Omega, L=8\text{ m}$

Fig.2 Trigger signal and the received signal under different loads. (a)  $R=50\text{ k}\Omega, L=8\text{ m}$ ; (b)  $R=1\text{ k}\Omega, L=8\text{ m}$ ;  
(c)  $R=10\text{ k}\Omega, L=8\text{ m}$ ; (d)  $R=1\text{ M}\Omega, L=8\text{ m}$

图2(a)为采用  $R=50\text{ }\Omega$  负载作为接收负载情况下,接收距离  $L$  为  $8\text{ m}$ ,接收到清晰的方波信号,但信号微弱。在相同距离下,采用  $1\text{ k}\Omega$  接收负载时接收到的信号波形如图2(b)所示,信号幅值有明显增大。图2(c)中采用  $10\text{ k}\Omega$  负载,其接收信号幅值约增大10倍,其波形并无明显变化。图2(d)中使用  $1\text{ M}\Omega$  作为负载其信号幅值明显增强,但由于带宽影响,波形产生变化,由方波转化为三角波,但探测波形稳定,且拥有较好的信号强度。可见,适度的增加探测器负载可以提高系统的探测能力进而增加系统的传输距离。

情况做进一步实验。实验过程中,绿光调制信号保持不变,逐步改变发射系统与接收系统间的距离,通过示波器显示波形。图3为部分距离下的光信号强度图,当信号传输距离为  $12\text{ m}$  时,如图3(a)所示,接收到信号波形稳定、清晰,峰峰值为  $13.36\text{ V}$ 。当距离增加为  $18\text{ m}$  时,信号强度明显下降,信号强度峰峰值为  $1.82\text{ V}$ 。图3(b)为传输距离为  $22\text{ m}$  时的信号波形,信号强度约为  $0.3\text{ V}$ ,并且受到  $100\text{ Hz}$  的干扰,分析认为这是海边照明路灯所引起的背景光干扰。随着传输距离的增加信号强度衰减明显,当距离超过  $26\text{ m}$  时,无法清晰分辨激光信号。

为此对  $1\text{ M}\Omega$  接收负载情况下绿光信号的接收

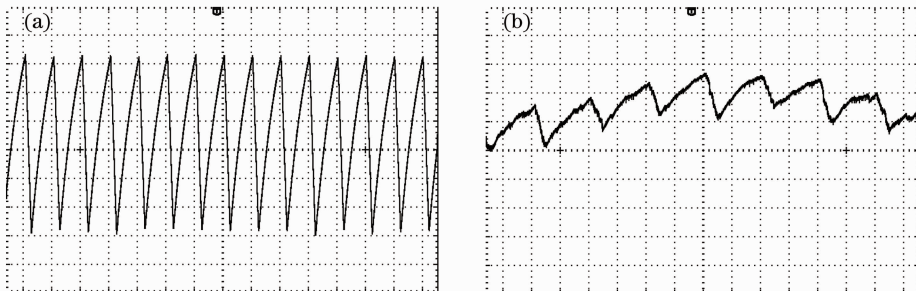


图3 不同距离下接收光信号。(a)  $R=1\text{ M}\Omega, L=12\text{ m}$ ; (b)  $R=1\text{ M}\Omega, L=22\text{ m}$

Fig.3 Optical signals under different distances. (a)  $R=1\text{ M}\Omega, L=12\text{ m}$ ; (b)  $R=1\text{ M}\Omega, L=22\text{ m}$

通过对比不同传输距离情况下所接收的信号强度可知,在探测距离增大时,绿光信号强度明显减弱,其中单色光的衰减可简述为<sup>[12]</sup>

$$I(r) = I_0 \exp(-Cr) = I_0 \exp(-r/l_a), \quad (1)$$

式中  $I(r)$  为距参考点距离为  $r$  处的光功率;  $l_a = 1/C$  为衰减长度,  $C$  为总衰减系数。将发射系统所在位置定义为参考点,结合所探测数据绘制的信号强度-距离图像如图 4 所示。

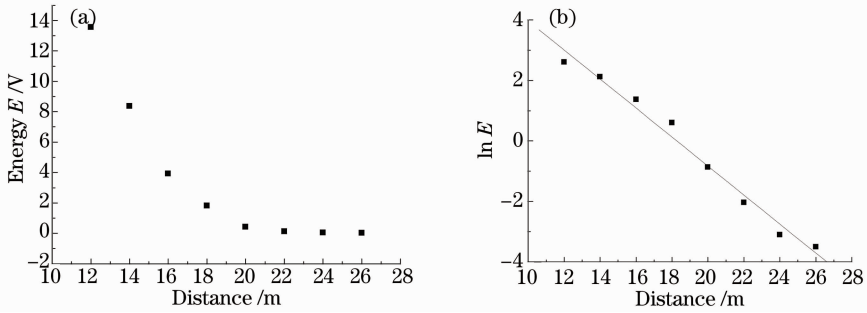


图 4 探测信号强度与距离关系图。(a) Energy versus distance; (b) fitting

Fig. 4 Diagrams of relationship between detection distance and signal strength. (a) Energy versus distance; (b) fitting

图 4(a)中为探测距离与该距离上信号强度  $E$  的关系图,随距离增加信号强度明显下降,其减弱过程近似呈  $e$  指数衰减趋势。根据(1)式对图 4(a)中各点数据进行拟合,得到拟合图 4(b),拟合结果表明实验区域海水衰减系数为  $0.5 \text{ m}^{-1}$ 。

## 4 结 论

采用 2 W 绿光激光器作为光源,在近海海岸进行了绿光水下载特性实验研究。结果表明,在采用光电倍增管的情况下,增大输出负载可以提高探测灵敏度进而增加探测距离。在使用  $1 \text{ M}\Omega$  接收负载情况下,探测信号强度增大、传输距离增加,传输距离为 26 m。绿光信号强度在海水中呈  $e$  指数衰减,威海沿海水的衰减系数为  $0.5 \text{ m}^{-1}$ 。可以推断在浑浊度较小的海域会得到更好的传输效果。

## 参 考 文 献

- 1 S Karp, T Wiener. The role of blue/green laser systems in strategic submarine communications[J]. Communications, IEEE Transactions, 1980, 28(9): 1602-1607.
- 2 M Wang, W H Liu. Study on optical characteristics of seawater in blue-green laser uplink propagation model[J]. Journal of East China Shipbuilding Institute, 2005, 19(1): 59-62.
- 3 I Vasilescu, K Kotay, D Rus, *et al.*. Data collection, storage, and retrieval with an underwater sensor network[C]. Proc IEEE SenSys, 2005. 154-165.
- 4 M Tivey, P Fucile, E Sichl. A low power, low cost, underwater optical communication system[J]. Ridge 2000 Events, 2004, 2(1): 27-29.

- 5 F Hanson, S Radic. High bandwidth underwater optical communication[J]. Appl Opt, 2008, 47(2): 277-283.
- 6 Y F Fung, M Dai, M F Ercan. Underwater short range free space optical communication for a robotic swarm [C]. Autonomous Robots and Agents 4th International Conference, 2009. 529-532.
- 7 H Yoshida, T Hyakudome, S Ishibashi, *et al.*. Study on land-to-underwater communication [C]. Wireless Personal Multimedia communication (WPMC), 2011 14th International symposium, 2011. 1-5.
- 8 Du Zhufeng, Huang Tiexia. The calculation of communication capability in submarine laser communication [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 1997, (8): 63-65.  
杜竹峰, 黄铁侠. 激光对潜通信的通信能力计算[J]. 华中理工大学学报, 1997, (8): 63-65.
- 9 Liu Xifeng, Yu Xinsheng. Design and simulation of optical link for underwater wireless communication [C]. The Twelfth National Youth Communications Conference, 2007. 1424-1430.  
刘西锋, 于新生. 水下光学无线通信系统的设计与仿真[C]. 第十二届全国青年通信学术会议, 2007. 1424-1430.
- 10 Sun Lihua, Chen Mingsong, Li Tiansong, *et al.*. Study about LDPC codes applied in underwater laser communication[J]. Laser Technology, 2009, 33(6): 604-606.  
孙丽华, 陈名松, 李天松, 等. LDPC 码在水下激光通信中的研究[J]. 激光技术, 2009, 33(6): 604-606.
- 11 Wang Kai, Ao Faliang, Shi Tao. Effect of scanning mode on underwater laser communication[J]. Journal of Guilin University of Electronic Technology, 2009, 29(4): 287-289.  
王 凯, 敖发良, 石 涛. 扫描模式对水下激光通信的影响[J]. 桂林电子科技大学学报, 2009, 29(4): 287-289.
- 12 Xu Qiyang, Yang Kuntao, Wang Xinbing, *et al.*. Blue-Green Lidar Ocean Survey [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007. 48-50.  
徐启阳, 杨坤涛, 王新兵, 等. 蓝绿激光雷达海洋探测[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007. 48-50.

栏目编辑: 王晓琰