

面向水下应用的改进型光子计数通信方法

韩彪^{1,2} 赵卫¹ 汪伟¹ 苏玉龙¹ 刘继芳³

¹中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 陕西 西安 710119

²中国科学院大学, 北京 100049

³西安电子科技大学物理与光电工程学院, 陕西 西安 710071

摘要 水下激光通信由于受水体吸收和散射的影响, 信号传输过程中能量衰减严重。基于光子计数的激光通信具有极高的探测灵敏度, 是抑制信号衰减、提高通信距离的有效方法。传统的光子计数通信是通过检测单光子探测器有无电脉冲输出来实现通信数据还原的, 通信误码率容易受到背景光噪声的影响。针对这一问题, 提出并研究了一种改进方法, 首先在通信接收端利用单光子探测器将光子转换为电脉冲, 然后通过统计单位比特时间内的电脉冲数目来还原通信数据。实验结果表明: 提出的方法能够在通信波长为 532 nm、通信速率为 50 kb/s、信噪比为 5.14 的情况下, 实现 84.24 bit⁻¹ 的探测灵敏度。所提出方法能够为高灵敏度水下激光通信提供一种新的技术思路。

关键词 光通信; 水下通信; 无线光通信; 光子计数

中图分类号 TN249 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.0806004

Modified Photon Counting Communication Method for Underwater Application

Han Biao^{1,2} Zhao Wei¹ Wang Wei¹ Su Yulong¹ Liu Jifang³

¹ State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

³ School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China

Abstract Underwater laser communication is influenced by the absorption and scattering of water, which causes severe signal energy attenuation during propagation. Laser communication based on the photon counting is considered as an effective way to resist signal loss and increase communication distance because of its ultra-high detection sensitivity. However, since communication data recovery is usually realized by detecting electrical pulse at the output of single photon detector directly in traditional photon counting communication, the communication bit error rate would be easily influenced by background light noise. In this paper, an improved method is proposed and studied to solve this problem. In our approach, the photons arrived at the communication receiver are converted into electrical pulses by single photon detector first. Then, communication data is recovered through counting the electrical pulse number on unit time. The experimental result shows that detection sensitivity of 84.24 bit⁻¹ can be realized by the proposed method, when the communication wavelength is 532 nm, the communication rate is 50 kb/s, and the signal to noise ratio is 5.14. The novel approach proposed in this paper provides a new technical idea for high-sensitivity underwater laser communication.

Key words optical communications; underwater communication; wireless optical communication; photon counting

OCIS codes 060.4510; 350.4600; 030.5260; 030.5290

收稿日期: 2016-03-24; 收到修改稿日期: 2016-04-19

基金项目: 国家自然科学基金(61231012, 61378079)、中国科学院基金(CXJJ-14-M09, CXJJ-15Q064)

作者简介: 韩彪(1987—), 男, 博士研究生, 助理研究员, 主要从事光电技术应用方面的研究。

E-mail: hanbiao@shaanxi.163.com

导师简介: 赵卫(1963—), 男, 博士, 研究员, 主要从事超快光子学方面的研究。E-mail: wzhaow@opt.ac.cn

1 引 言

无线通信技术对于水下无线传感网络^[1-5]、水下无人机^[6]等应用至关重要。由于电磁波在水中衰减严重,传统微波通信不能适应水下环境^[7],这使得信号衰减较小的水声通信成为当前水下无线通信领域的主流。但受声波频率、水下声学噪声以及传输过程中多路径效应的制约,水声通信速率通常在 10 kb/s 量级^[8-10],这极大地限制了通信的有效性和实时性。水下蓝绿激光通信由于带宽高、光束发散角小^[11],在通信速率和重量功耗方面具有水声通信无法比拟的优势,目前已成为水下高速数据传输领域的重要研究方向^[12]。

由于水中光信号衰减的存在,蓝绿激光通信的有效距离受限,如何克服信号衰减的影响、提高通信的有效距离一直是该领域的重点研究课题^[13-15]。其中,基于光子计数的通信方式能够识别光子量级的微弱信号,是提高通信灵敏度、增加通信距离的一种可行方法^[15]。

然而,现有的光子计数通信是通过判断单光子探测器有无电脉冲输出来实现通信数据还原的,通信过程容易受到背景噪声光的影响,造成误码率的增加^[15]。针对这一问题,本文改进了传统光子计数通信方法,首先在通信接收端统计每个比特时间内探测得到的电脉冲数量,然后为电脉冲数目设置一个阈值,通过比较每个比特内的电脉冲数量与阈值的相对大小,进而从探测信号中还原出通信数据。这一方法可以为水下高灵敏度激光通信提供一种新的解决思路。

2 通信原理

改进后的光子计数通信原理如图 1 所示。微弱的通信光信号到达接收端后,首先利用单光子探测器将光子转换为电脉冲,当光信号较强时,电脉冲数量较多;当光信号较弱时,电脉冲数量较少。然后利用计数器统计每个通信比特时间内电脉冲的个数。最后设置一个阈值,并比较每个比特内电脉冲个数与阈值的相对大小,当电脉冲个数大于阈值时,认为原始信号为高电平;反之,认为原始信号为低电平,以此完成通信数据的还原。

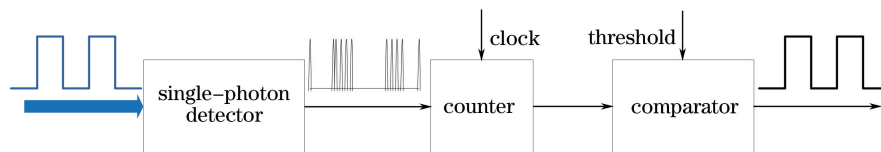


图 1 基于光子数统计通信原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of communication based on photon number statistics

在该方法中,阈值的设置是通信的关键。实际通信过程中,发射端首先向接收端发送一组方波序列作为阈值估测信号,方波频率 F 与通信数据的传输速率 R 满足如下关系:

$$F = R/2. \quad (1)$$

接收端探测到方波信号后根据每个高电平和低电平对应的电脉冲数量估测数据恢复所需的判决阈值,然后通信发射端再向接收端发送要传输的数据。

3 实验装置及测试原理

3.1 实验装置

实验装置如图 2 所示,整个系统由信号发生器、通信发射端、用于模拟水下环境的水槽、通信接收端 4 个部分组成。

信号发生器可以产生方波和伪随机二进制序列(PRBS),输出信号分为两路,一路输送给通信发射端用于产生通信光信号,另一路输送给通信接收端的误码测试仪作为系统误码率测试的参考信号。

发射端由 532 nm 固体激光器和可变光衰减器组成,其中激光器在信号发生器的触发下产生通信光信号,可变光衰减器用于控制发射端输出的光功率。

用于模拟水下环境的水槽长 48 cm、宽 30 cm,水位高度 30 cm。实验时为了模拟水体散射和湍流的影响,在水中加入尺寸为 $3\sim 10\ \mu\text{m}$ 的氢氧化镁粒子作为散射体并用水泵搅动水体。

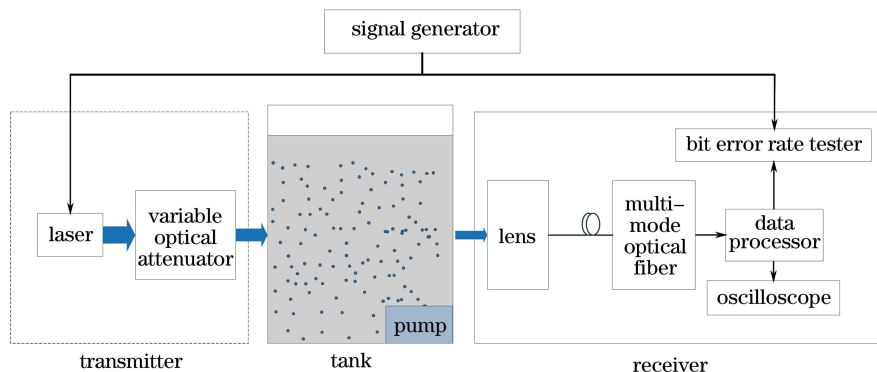


图 2 实验装置框图

Fig. 2 Block diagram of experimental setup

接收端由透镜、多模光纤、单光子探测器、基于现场可编程门阵列(FPGA)开发的数据处理装置、示波器以及误码测试仪组成,其中透镜表面镀有中心波长为 532 nm、半峰全宽为 15 nm 的通透膜。信号到达接收端后,首先利用透镜将空间光信号汇聚到多模光纤中,并通过多模光纤将光信号输送到单光子探测器,然后单光子探测器将光信号转换成电信号,最后利用数据处理装置从探测器输出的信号中恢复出原始数据,并采用误码测试仪和示波器对通信性能进行测试和观测。

3.2 核心参数测试原理

实验中需要直接测试的参数包括通信误码率和到达单光子探测器的光信号功率。误码率的测试比较简单,通过比较发射端输出的信号和接收端恢复的数据信号是否相同即可得到。但对于到达探测器的光功率而言,由于信号十分微弱,传统光功率计无法直接测量。

光信号的强弱可以用信号中包含的光子数进行表征,在本实验中光功率的大小用单位比特时间内的平均光子数表征,并通过统计探测器输出的电脉冲数目来完成测量,基本原理如下。

从统计学的角度来讲,对于单光子探测器而言,单位时间内输入的光子数 N_1 和输出的电脉冲数 N_2 满足如下关系:

$$N_2 = \eta N_1, \quad (2)$$

式中 η 为探测器的探测效率,通过查阅器件手册可以得到。本实验所选取的探测器在 532 nm 波段的探测效率为 50%。

另一方面, N_1 与通信速率 R 以及单位比特内的平均光子数 N_R 满足如下关系:

$$N_1 = N_R \times R. \quad (3)$$

联立(2)式和(3)式可以得到:

$$N_R = N_2 / (\eta R). \quad (4)$$

因此通过统计单位时间内探测器输出的平均电脉冲数 N_2 ,再利用(4)式即可得到单位比特内的平均光子数 N_R 。

4 实验结果及分析

首先,测试到达探测器的背景噪声光功率,按照 50 kb/s 的通信速率进行统计,得到背景光功率为 16.38 bit^{-1} 。

然后,打开激光器,在水中加入一定量的氢氧化镁并用水泵搅动水体,利用光功率计分别测试水体输入端和输出端的光功率,得到水体的衰减系数为 48.26 m^{-1} 。

最后,通信发射端发送速率为 50 kb/s 的光信号,并利用可变衰减器控制出射光功率。实验得到的通信时钟、发射端输出的原始信号、单光子探测器输出信号以及数据处理装置恢复的信号如图 3 所示。

改变信号发射功率,则到达探测器的光功率随之变化。测试不同探测光功率下的通信误码率,每组数据的测试时间为 10 min。同时,结合背景光噪声计算信噪比。具体测试参数如表 1 所示。

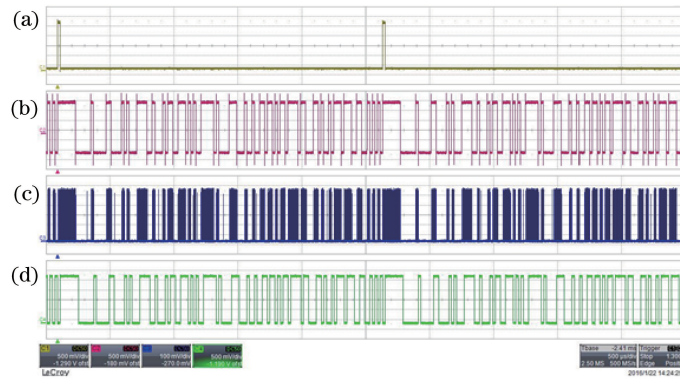


图 3 实验结果。(a)时钟信号；(b)原始信号；(c)探测器输出信号；(d)恢复信号

Fig. 3 Experimental results. (a) Clock signal; (b) initial signal; (c) signal from detector; (d) recovery signal

表 1 测试结果

Table 1 Test results

Time	Average photons /bit ⁻¹	Bit error rate	Signal to noise ratio
1	95.94	3.26×10^{-8}	5.86
2	91.26	1.31×10^{-7}	5.57
3	84.24	3.59×10^{-7}	5.14
4	79.56	1.64×10^{-6}	4.86
5	74.88	8.35×10^{-6}	4.57
6	65.52	4.53×10^{-5}	4.00
7	56.16	6.88×10^{-4}	3.43
8	46.80	1.75×10^{-3}	2.86

从表 1 可以看到,在背景光噪声一定的情况下,随着到达探测器接收面光功率的减小,信噪比逐渐降低,通信误码率逐渐增大。在通信速率为 50 kb/s,信噪比为 5.14 的情况下,当单位比特平均光子数为 84.24 时,误码率为 3.59×10^{-7} 。空间激光通信通常以误码率为 1×10^{-6} 时的光功率作为探测灵敏度标准,对照表 1 可以看到,在本实验中通信系统的探测灵敏度优于 84.24 bit^{-1} ,而此时的信噪比为 5.14。

5 结 论

在改进传统光子计数通信的基础上,提出了一种基于光子数统计的水下激光通信方法,并以实验验证了方法的可行性。以 532 nm 激光器作为光源,在通信速率为 50 kb/s 的情况下,得到的探测灵敏度优于 84.24 bit^{-1} ,并且此时的信噪比为 5.14。研究结果表明,所提出的方法能够有效抑制背景光噪声的影响,这为高灵敏度水下激光通信提供了一种新的技术思路。

参 考 文 献

- 1 Akyildiz I F, Pompili D, Melodia T. Challenges for efficient communication in underwater acoustic sensor networks[J]. ACM Sigbed Review, 2004, 1(2): 3-8.
- 2 Tennenbaum A, Dyakiw M, Cui J H, *et al.* Application of low cost optical communication systems to underwater acoustic networks[C]. IEEE 11th International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems, 2014: 755-758.
- 3 Anguita D, Brizzolara D, Parodi G. Building an underwater wireless sensor network based on optical communication: research challenges and current result [C]. IEEE 2009 Third International Conference on Sensor Technologies and Applications, 2009: 476-479.
- 4 Anguita D, Brizzolara D, Parodi C. Optical communication for underwater wireless sensor networks: a VHDL-implementation of a physical layer 802.15.4 compatible[C]. Oceans, 2009: 1-2.
- 5 Anguita D, Brizzolara D, Parodi C. VHDL modules and circuits for underwater optical wireless communication systems [J]. Wseas Transaction on Communications, 2010, 9(9): 525-552.
- 6 Doniec M, Detweiler C, Vasilescu I, *et al.* Using optical communication for remote underwater robot operation [C].

-
- IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2010, 25(1): 4017-4022.
- 7 Gayathri C B, Singh D, Dhanusha M D S, *et al.* Design of high speed underwater optical communication using on-off keying algorithm[C]. International Conference on Communications & Signal Processing, 2015: 1355-1360.
 - 8 Akyildiz I F, Pompili D, Melodia T. Underwater acoustic sensor networks: research challenges[J]. Ad Hoc Networks, 2005, 3(1): 257-279.
 - 9 Farr N, Bowen A, Ware J, *et al.* An integrated, underwater optical/acoustic communications system[C]. Oceans IEEE-Sydney, 2010: 1-6.
 - 10 Kilfoyle D B, Baggeroer A B. The state of the art in underwater acoustic telemetry [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2000, 25(1): 4-27.
 - 11 Hollins R, Rudge A, Bennett S. Technologies for blue-green underwater optical communications[C]. SPIE, 2013, 8899: 88990F.
 - 12 Chancey M A. Short range underwater optical communication links[D]. Raleigh: North Carolina State University, 2005: 24-44.
 - 13 Chen M, Zhou S, Li T. The implementation of PPM in underwater laser communication system [C]. International Conference on Communications, Circuits & Systems, 2006, 3: 1901-1903.
 - 14 Cox W C, Simpson J A, Domizioli C P, *et al.* An underwater optical communication system implementing Reed-Solomon channel coding[C]. Oceans, 2008: 1-6.
 - 15 Hiskett P A, Struthers R S, Tatton R, *et al.* A photon-counting optical communication system for underwater data transfer[C]. SPIE, 2012, 8542: 854214.