

文章编号:1001-5078(2023)11-1644-06

· 激光应用技术 ·

## 激光致声技术在跨冰层介质的空中-水下通信应用方法

何宁, 廖欣, 蒋红艳

(桂林电子科技大学 信息与通信学院, 广西 桂林 541004)

**摘要:**无线电波、声波和光波通信技术可有效应用于复杂的海洋通信环境中,然而在极寒地区和极地区域海面冰层覆盖的情况下,其在远端发送信号将无法穿透冰层介质,而难以实现空中与水下的通信联络,故提出一种应用于跨冰层介质传输的激光致声通信体制,通过空中发射激光与海面固体冰层的相互作用诱导声波信号,再利用海面上覆盖冰层的声源辐射,向下方水体传播来建立空中到水下光波与声波的通信链路,系统将光学与声学技术的有机融合,充分利用固体冰层对声波的快速传导作用,探讨光声转换机理、调制编码及激光声传输特点与性能分析,有效解决海洋通信中受冰层覆盖影响和单一类型信号传输受限问题,为海洋跨空通信提供一种新的技术途径。

**关键词:**激光致声;冰层介质;热弹效应;水下通信;多脉冲位置调制

**中图分类号:**TN249;TN929.1 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2023.11.004

## The method of laser-acoustic technology used in the cross-ice communication from air to underwater

HE Ning, LIAO Xin and JIANG Hong-yan

(School of Information and Communication, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

**Abstract:** Radio-frequency, acoustic and optical communication technology can be effectively used in complex marine communication environments. However, in extremely cold and Polar Regions where the sea surface is covered with ice, it is difficult to realize the communication between airs and underwater because the signals sent at the far end cannot penetrate the ice medium. In this paper, a technology based on laser-induced acoustic waves is proposed to achieve the cross-ice communication. Firstly, the acoustic signal is induced by interaction between the airborne laser and the solid ice in the air irradiating the ice cover and then propagate to the water under the ice at the sea surface, and then the acoustic radiation from the ice-covered surface is utilized to propagate to the water below to establish an airborne to underwater optical and acoustic communication link. Moreover, optical and acoustic technologies are organically integrated, the rapid conduction effect of solid ice on acoustic waves are fully used to explore the optical-acoustic conversion mechanism, modulation coding as well as the characteristics of laser-induced acoustic transmission. The problems of ice coverage and transmission limitation of a single type of signal in ocean communication can be effectively solved providing a new technical approach for ocean trans-space communication.

**Keywords:** laser-induced acoustic waves; ice medium; thermoelastic effect; underwater communication; MPPM

**基金项目:**国家自然科学基金项目(No. 61961008);广西无线宽带通信与信号处理重点实验室主任基金项目(No. GXKL06200127)资助。

**作者简介:**何宁(1958-),男,研究员,主要从事激光通信与探测技术研究。E-mail: eicnhe@guet.edu.cn

**通讯作者:**蒋红艳(1985-),女,高级实验师,主要从事光通信与系统仿真技术研究。E-mail: 253984251@qq.com

**收稿日期:**2023-01-06

## 1 引言

海洋跨空通信建立主要依托海面上大气和水下两种介质实现,由于海洋环境的复杂性,其通信主要依靠无线电波、声波和光波三种传播方式。随着海洋探索不断推进,空-天-地-海立体化网络通信已成为当今通信发展的必然趋势,其中,空-海跨介质通信是亟待解决的难题,特别是在极寒地区和常年冰雪覆盖的北极,冰层严重阻碍了空气和海水两个空间的信息传输,在这种环境下分别采用上述3种技术是不能独立完成通信建立的。目前对冰层覆盖的水域通信常采用破冰手段,并借助船只或浮标布置吊放相关有源中继通信设备浸泡在水中来建立水面上下的通信联络<sup>[1]</sup>,但该方法部署难、成本高、缺乏隐蔽性和灵活性,难以在搜索和救援等突发情况下实现快速响应。由于声波在冰层和水中均具有较好地传播优势,故可利用激光致声技术将冰层作为无源中继,实现跨冰层介质空中对水下目标通信与探测。

利用声波在固体介质中优良传导特性的技术应用主要有两方面,一是采用超声波发生器直接接触金属表面或激光非接触在金属介质诱导超声方式,使声波在金属介质传导过程中遇到缺陷时产生信号跃变的回波检测来实现无损检测,美国海军发展研究中心利用100 W的 $N_2$ 分子激光器激发超声,对光束进行聚焦后实现了裂缝探测<sup>[2]</sup>;日本筑波科技株式会社的Takatsubo J等人通过激光激发超声波,利用空气耦合超声换能器检测超声波,研发出完全非接触的激光超声无损检测可视化系统<sup>[3]</sup>;中国石油天然气管道局张俊杨等人建立了基于PVDF(聚偏氟乙烯)传感器检测的激光超声实验系统,用于检测管道焊缝的质量<sup>[4]</sup>。二是直接在受冰层覆盖的水体冰面上利用声波的传导进行冰下水声通信以及冰下声通道测试应用,2015年1月在哈尔滨松花江进行了国内首次冰下水声学试验,采用了不同通信体制不同编码方式对冰层声散射系数和冰下水声道进行了测试,验证了开展相关水声技术冰下适用性研究,为后续冰下水传播建模和冰下水声信道建模提供了依据<sup>[5]</sup>;2016年,研究了直接序列扩频冰下水声通信系统<sup>[6]</sup>。2019年,采用在冰层上安装探测器阵列的方式以及基于多信道判决均衡进行了短距离单载波跨冰声学通信实验<sup>[7]</sup>;2021年,根据简正

模理论,建立了水-冰-空气级联声信道模型,并通过仿真和松花江现场实验对其进行了验证<sup>[8]</sup>。

激光致声作为一种新型的非接触式产生声波的方法,是通过高峰值功率的激光脉冲与液体或者固体介质相互作用而激发声波<sup>[9]</sup>。基于激光超声理论技术,采用激光致声手段能有效满足海洋环境通信需求。论文通过探讨基于光-声技术融合在大气-冰-水信道环境下的通信体制和编码传输方法,分析激光致声原理、声源特性、传输信道及应用特点,为开展跨冰层介质的通信应用研究提供一定参考。

## 2 激光致声原理与特性分析

气体、液体和固体受脉冲激光激励均会发生光声效应而形成激光超声信号,利用激光声波在作用介质中的传导可实现不同应用。固体介质结构相对稳定,且对声波信号的传输能力优于气体和液体,在极寒地区和极地特殊环境覆盖在水面上的冰层适合于声波传导应用。根据通信环境及冰层材料特性可适当选择激光输出能量来获得所需的激光声级别及控制到达介质表面的光斑(束)大小,从而诱导产生相应的超声波信号。激光诱导产生的超声信号不仅与激光束本身的时空特性有关,而且还与固体材料性质及表面特性有关<sup>[10]</sup>。一般情况在固体中激光激励超声波的机制可分为热弹性效应和烧蚀效应两种。

### 2.1 热弹效应

热弹效应是当入射激光束的光功率密度未达到固体表面的熔融阈值(冰一般为 $2 \sim 3 \text{ J/cm}^2$ )时,当固体表面受脉冲激光作用时,被作用区域吸收光能温度上升,激光的能量转换为热能,照射区域内热能高度集中产生热膨胀效应,这部分介质因热膨胀而产生形变,周期性的形变导致周围介质形成应力脉冲,局部区域发生光声能量转换引起固体介质表面产生切向压力,从而激发出周期变化的脉冲超声波在固体内部或沿表面传播,热弹效应下由于激发光功率较低,局部升温没有导致介质材料发生相变,可激发出纵波、横波和表面波<sup>[11]</sup>。而烧蚀机制下获得的纵波和表面波幅度很大,其转换效率远高于热弹机制。

如图1所示,当脉宽为 $t_0$ 的矩形脉冲激光垂直入射到半无限媒质(光吸收系数、热导率和热扩散

率分别为 $\beta$ 、 $K$ 和 $\alpha$ )自由表面上时,媒质吸收光能而形成相应热源,其热功率密度 $g(z,t)$ 为<sup>[12-13]</sup>:

$$g(z,t) = g_0^{-\beta z} [H(t) - H(t - t_0)] \quad (1)$$

式中, $g_0$ 为热源强度; $H(t)$ 为阶跃函数;表示矩形激光脉冲函数。

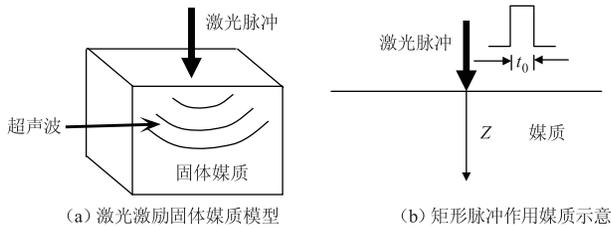


图 1 激光热弹效应超声激励示意图

Fig. 1 The schematic diagram of the laser-induced sound based on thermoelastic effect

固体冰介质属于弱吸收状态,激光超声产生的应力脉冲强度(信号)可表示为:

$$u_1 = u_0 \{ [sh(\beta ct) - sh[\beta c(t - t_0)]] H(t - t_0) \} \cdot e^{-\beta z} - u_0 sh[\beta c(t - \frac{z}{c})] H(t - \frac{z}{c}) + u_0 \cdot sh[\beta c(t - t_0 - \frac{z}{c})] H(t - t_0 - \frac{z}{c}) \quad (2)$$

式中, $u_0 = -\alpha g_0 \alpha_T E / K \beta c (1 - 2\nu)$ , $\beta$ 为光吸收系数; $E$ 为杨氏模量; $K$ 为热导率; $\alpha$ 为热扩散率; $\nu$ 为泊松比; $c$ 为超声波速。

实际应用中激光超声脉冲在时域上为双极性振动瞬时信号,由于介质结构不同特性会伴随弛豫振荡并呈传播延时衰减趋势。

### 2.2 激光声源特性<sup>[14-15]</sup>

1)激光声源作为水下通信声源的一种新激发方式,其类型主要有纵波、横波和表面波三种,纵波是唯一可以在固体、液体和气体中传播的形式,它的质点振动方向与波的传播方向相互平行;横波只能在固体中进行传播,其质点振动方向与波的传播方向相互垂直;声表面波仅在厚度远大于其波长的半无限大固体介质表面传播,其质点沿椭圆轨迹振动传播。

2)激光声激发为非接触方式,形成的光声源与固体传声介质完全耦合,是一种可移动激光声源。

3)激光声的信号强度将随着入射激光脉冲的能量增加,其能量由弱到强变化,相应的激发机制由热弹效应转为烧蚀机制,根据激光致声机制不同转换效率范围达 3% ~ 30%。

4)在脉冲激光激励超声的过程中,入射激光功率密度较低时热弹效应激发出的横波和纵波,主要沿以 $0^\circ$ 为中心轴呈对称分布的中空锥型面传播,纵波的能量最大值分布在 $\pm 60^\circ$ 左右,而横波能量最大值在 $\pm 30^\circ$ 左右,且具有尖锐的方向性,在中心轴 $0^\circ$ 的横波和纵波能量均为最小值。

5)激光声在空间和时间上具有高分辨率的宽带特性,根据作用激光脉冲宽度从纳秒到皮秒变化,激光声频率可从赫兹变化达到吉赫兹,有利于进行目标通信与探测。

## 3 系统组成架构与激光声的冰层传播特性

### 3.1 实验系统组成

不同应用环境下的通信系统在结构组成、通信体制和调制编码技术有所区别,图 2 所示为本系统所采用的实验组成原理框图。

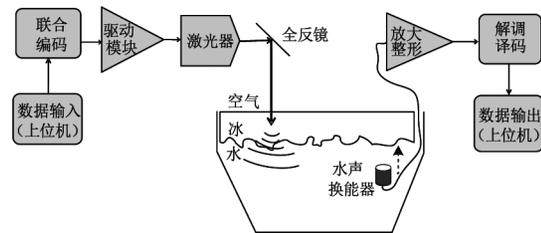


图 2 实验系统组成

Fig. 2 Block diagram of the experimental system

图 2 中经编码的信号直接驱动激光器发射,在冰层介质产生的激光声信号传播至水下,按照图 2 所示,实验是在冰层介质下方或按箭头方向通过上浮使水声换能器直接接触冰层与水的交界面来完成大气到水下跨冰层的通信建立,检波装置只要放在激光声辐射区域内任意位置均可实现声波信号探测,并送至后端进行处理。

### 3.2 激光声冰层传播特性

声波信号的传播速度与介质的种类、温度有关,一般情况下,传播速度随着介质温度和密度增大而提高,且相同物质在状态不同时其传播特性存在一定差异。水跟一般物质不同,具有冷胀热缩的特性,在液态下,其密度是 $1(4^\circ\text{C})$ ,结冰成固体时体积膨胀,密度减小至 $0.9(0^\circ\text{C})$ ,冰中水分子活动较液态水弱,分子间距小作用力大,故冰具有特殊的晶体结构。水和冰两种状态下声波传播速度分别为 $1450\text{ m/s}$ 和 $3160\text{ m/s}$ ,由此可知固体冰中声波传导更快。极地水面冰层具有一定厚度且不透明,导致激光不能穿透到达水下,目前声波通信是水下应用

最可靠的技术。而激光在冰面上诱导声波可采用机载方式实现远程非接触激励,其灵活性和隐蔽性好,受激光脉冲作用位置的固体冰层相当于放置在水面上移动声源,超声信号能穿透覆盖的海冰迅速传导至下方水体,是实现空中到水下目标通信联络最有效的方法。

当激光与冰层发生相互作用时,光波能量迅速转化为声压能量,激光声在时域上呈现为一个带区域,它包含多个峰值,形成的声波信号从幅度上表现为逐渐衰减直至消失趋势,激光脉冲能量高则激光声带区变窄幅度增加;图3所示为经冰层介质传导采集的激光声信号频域特性,由图可知中心频率约为50 kHz,声能量主要集中在100 kHz以下,可用于水下通信声源。

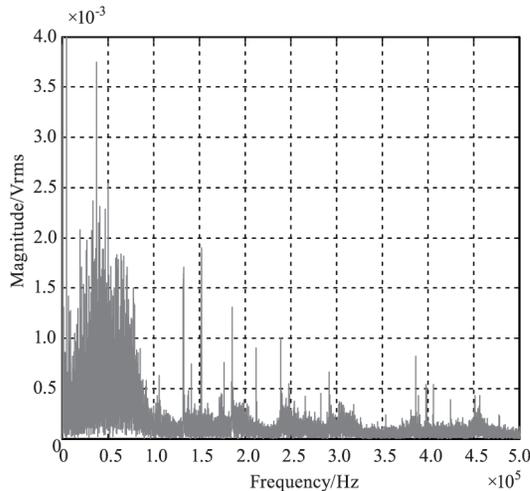


图3 单个激光声脉冲信号的频谱波形

Fig. 3 The spectrum of a single laser-induced sound pulse

#### 4 通信编码传输与性能仿真分析

通信系统传输信道主要由冰层和水构成,受水下信道随机变化干扰以及声波传输带宽限制,应选择合适的调制与纠错编码技术来保障通信传输有效性和可靠性。脉冲位置调制(Pluse Position Modulation, PPM)在具有散射和延时信道中的抗干扰性能方面有一定优势,在无线通信中应用比较广泛<sup>[16]</sup>。系统采用LDPC与MPPM联合编码有利于提高有限带宽的传输能力,图4对比PPM和MPPM两种调制方式的帧结构。

由图可知,在相同调制阶数情况下,在传统一帧传输时长8个时隙宽度下用一个脉冲指定位置传送3比特数据,而采用MPPM调制方式,在一帧传输时长5个时隙宽度下采用两个脉冲位置组合传送3比

特数据,相比每一帧传输时间缩短了3/8,若调制阶数不同采用MPPM调制均可获得不同程度的传输优势。研究表明,MPPM编码调制方式有利于改善带宽需求、功率效率和传输容量,是一种提升通信性能的有效编码方法<sup>[17]</sup>。图5所示为使用LDPC编码前后系统的误比特率仿真对比,以广义伽马分布和指数韦布尔分布衰落信道模型以及(5,2)和(6,3)MPPM调制方案为例<sup>[18-19]</sup>,使用简化的初始对数似然比的LDPC编码明显提高了衰落信道中的系统误码率性能,图中 $\sigma^2$ 表示衰落的强弱,(5,2)MPPM系统在弱衰落情况下的编码增益达11.9 dB(误比特率为 $10^{-4}$ 时)。研究结果表明,该译码方案在各种不同的衰落信道模型下对使用不同MPPM调制方式的系统产生明显的衰落抑制效果,并且其计算复杂度低,不需要信道状态信息,易于硬件实现。

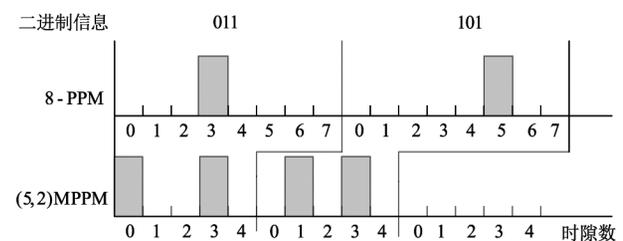


图4 PPM和MPPM时域波形图

Fig. 4 The time-domain waveforms of PPM and MPPM

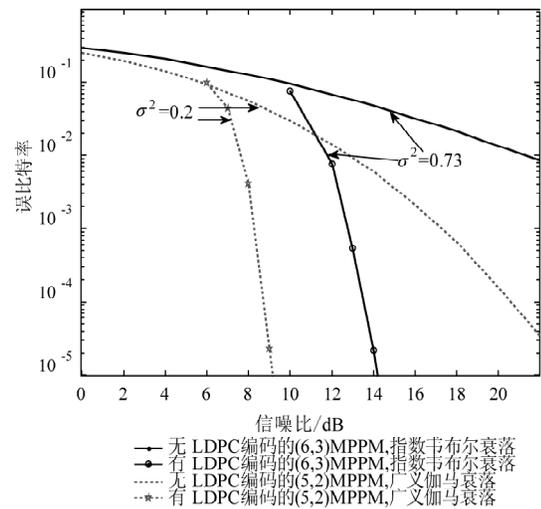


图5 LDPC编码前后的误比特率对比

Fig. 5. BERs of the MPPM system with/without LDPC code

#### 5 结 语

分析了跨冰层介质激光致声水下通信中的组成特点,针对复杂的海洋信道传输环境,提出一种光与声通信技术融合的通信机制,探讨激光致声机理与介质传输谱特性,分析了编码调制的应用

及性能对比。从激光声的频谱特性可知在频带内存在明显的频率优势,且激光声波能与固体冰层介质耦合并进行有效传递,有利于建立受海面冰层覆盖特殊信道环境-空中到水下通信的快速响应。研究表明,采用激光诱导声波通信能对远程指定区域的激光致声控制,通过机载的激光致声机制相当于在水面上建立了一个稳健的移动声源,其通信作业的灵活性和应用优势显著,该方法为开展多技术融合的跨空海洋通信提供一种新的应用参考。

#### 参考文献:

- [1] M V Volkov, T S Kalinina, A A Lunkov, et al. Modeling the underwater acoustic communication under ice cover on the Arctic shelf [J]. *J. Phys. Conf. Ser.*, 2019, 1348:012036.
- [2] Moss B C, Scruby C B. Investigation of ultrasonic transducers using optical techniques[J]. *Ultrasonics*, 1988, 26(4):179-188.
- [3] Takatsubo J, Wang B, Tsuda H, et al. Generation laser scanning method for the visualization of ultrasounds propagating on a 3-D object with an arbitrary shape[J]. *Journal of Solid Mechanics & Materials Engineering*, 2007, 1(1):1405-1411.
- [4] Kromine A K, Fomitchov P A, Krishnaswamy S, et al. Applications of scanning laser source technique for detection of surface-breaking defects [C]//Symposium on Applied Photonics, International Society for Optics and Photonics, 2000.
- [5] Yin Jingwei, Du Pengyu, Zhu Guangping, et al. The research of the under-ice acoustic experiment technology [J]. *Journal of Applied Acoustics*, 2016, 35(1):58-68. (in Chinese)  
殷敬伟, 杜鹏宇, 朱广平, 等. 松花江冰下声学试验技术研究[J]. *应用声学*, 2016, 35(1):58-68.
- [6] S Tang, G Zhu, X Zhang, et al. Under-ice underwater acoustic communication based on direct sequence spread spectrum system with parametric emission [C]//ICSPCC 2016-IEEE Int. Conf. Signal Process. Commun. Comput. Conf. Proc., 2016:4-7.
- [7] X Han, J Yin, W Chen, et al. Cross-ice acoustic communication by ice-mounted geophones; an initial experimental demonstration [J]. *Applied Acoustics*, 2019, 150: 302-306.
- [8] J Yin, W Men, G Zhu, et al. Cross-ice acoustic communication; cascade acoustic channel model and experimental results [J]. *China Communication*, 2021, 18(2): 228-240.
- [9] Li Peng, Zhao Yang, Zhou Zhiqian, et al. Research on laser induced acoustic detection of trans-media aerial underwater [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(5):20200310. (in Chinese)  
李鹏, 赵扬, 周志权, 等. 一种跨介质的空中-水下激光致声探测技术研究[J]. *红外与激光工程*, 2021, 50(5):20200310.
- [10] Chen Sheng, Yang Yanming, Zhou Hongtao, et al. Analysis of the variation on underwater acoustic signal across ice layer in the Arctic [J]. *Acta Acustica*, 2021, 46(3): 355-364. (in Chinese)  
陈晟, 杨燕明, 周鸿涛, 等. 北极水下声信号跨冰层变化分析[J]. *声学学报*, 2021, 46(3):355-364.
- [11] Yu Danzhu, Jia Bing, Chen Yuan. Study on propagation characteristics of acoustic waves in water-oil-ice multilayer medium [J]. *Hydro science and Cold Zone Engineering*, 2021, 4(1):53-58. (in Chinese)  
于丹竹, 贾兵, 陈元. 水-油-冰多层介质中声波传播特性研究[J]. *水利科学与寒区工程*, 2021, 4(1): 53-58.
- [12] Gao Huidong, Shen Zhonghua, Xu Xiaodong, et al. Theoretical study of surface acoustic wave generated by pulsed laser in solids [J]. *Journal of Applied Acoustics*, 2001, 21(5):19-24. (in Chinese)  
高会栋, 沈中华, 徐晓东, 等. 固体中脉冲激光激发声表面波的理论研究 [J]. *应用声学*, 2001, 21(5): 19-24.
- [13] Luo Xianghong, He Ning, Wang Mingpeng, et al. Design and implementation of laser ultrasonic testing system based on coherent detection [J]. *Laser & Infrared*, 2017, 47(11):1339-1342. (in Chinese)  
骆湘红, 何宁, 王明鹏, 等. 基于相干探测的激光超声检测系统设计与实现 [J]. *激光与红外*, 2017, 47(11): 1339-1342.
- [14] Shen Zhonghua, Shi Yifei, Yan Guang, et al. Progresses in the applications of laser induced surface acoustic waves [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(s1): 239-244. (in Chinese)  
沈中华, 石一飞, 严刚, 等. 激光声表面波的若干应用研究进展 [J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(s1): 239-244.

- [15] Zong Siguang, Wang Jiangan, Wang Yuhong, et al. Laser-acoustic source characteristic and its application in ocean [J]. *Journal of Applied Optics*, 2008, 29(3): 408 - 411. (in Chinese)  
宗思光, 王江安, 王雨虹, 等. 激光声源特性研究及海洋通信[J]. *应用光学*, 2008, 29(3): 408 - 411.
- [16] Liao xin, Jiang Hongyan, He Ning. Underwater time slot-hopping data transmission based on laser-induced acoustic waves [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(18): 1806002 - 1 - 8. (in Chinese)  
廖欣, 蒋红艳, 何宁. 激光诱导声波的跳时隙水下数据传输方法[J]. *中国激光*, 2022, 49(18): 1806002 - 1 - 8.
- [17] Xue Xiaomei, Li Baolong, Li Zhengquan. Research on hybrid visible light communication system based on MPPM dimming control [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2020, 31(6): 648 - 653. (in Chinese)  
薛晓妹, 李宝龙, 李正权. 基于 MPPM 调光控制的混合可见光通信系统研究 [J]. *光电子 · 激光*, 2020, 31(6): 648 - 653.
- [18] Shang jinping, Wang Ping, Tao Yuan, et al. Analysis of performance about multi-pulse PPM modulation in UV communication [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2010, 33(4): 22 - 24, 44. (in Chinese)  
尚金萍, 王平, 陶源, 等. 紫外光通信中多脉冲 PPM 调制的性能分析 [J]. *电子测量技术*, 2010, 33(4): 22 - 24, 44.
- [19] Khallaf H S, Shalaby H M H, Garrido-Balsells J M, et al. Performance analysis of a hybrid QAM-MPPM technique over turbulence-free and gamma-gamma free-space optical channels [J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2017, 9(2): 161 - 171.