

激光与光电子学进展

单光子探测在无线光通信收发技术中的应用

万超¹, 郝浩², 赵清源^{1,2*}, 刘浩¹, 李聪³, 陈特³, 曹桂兴³, 涂学凑^{1,2}, 张蜡宝^{1,2}, 贾小氢^{1,2},
康琳^{1,2}, 陈健^{1,2}, 王华兵^{1,2}, 吴培亨^{1,2}

¹网络通信与安全紫金山实验室, 江苏 南京 211111;

²南京大学超导电子学研究所, 江苏 南京 210023;

³中国空间技术研究院通信与导航卫星总体部, 北京 100094

摘要 针对无线光通信中的收发技术, 从空间光通信和水下光通信两方面梳理相关的研究进展, 根据不同场景从通信波段、调制方式、光电探测器三个方面总结无线光通信收发技术的发展趋势, 分析单光子探测在无线光通信中的应用前景, 并报道了本研究组将串联型超导纳米线单光子探测器应用于空间光通信取得的结果, 为相关研究工作的开展提供借鉴和思路。

关键词 光通信; 无线光通信; 空间光通信; 水下光通信; 光电探测器; 单光子探测; 调制解调

中图分类号 TN929.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0500001

Application of Single Photon Detection in Wireless Optical Communication Transceiver Technology

Wan Chao¹, Hao Hao², Zhao Qingyuan^{1,2*}, Liu Hao¹, Li Cong³, Chen Te³, Cao Guixing³,
Tu Xuecou^{1,2}, Zhang Labao^{1,2}, Jia Xiaoqing^{1,2}, Kang Lin^{1,2}, Chen Jian^{1,2},
Wang Huabing^{1,2}, Wu Peiheng^{1,2}

¹Purple Mountain Laboratories, Nanjing, Jiangsu 211111, China;

²Research Institute of Superconductor Electronics, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210023, China;

³Institute of Telecommunication and Navigation Satellites, China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China

Abstract Aiming at the transceiver technology in wireless optical communication, this paper combs the relevant research progress from two aspects of free space optical communication and underwater optical communication, summarizes the development trend of wireless optical communication transceiver technology from communication bands, modulation modes, and photodetectors according to different scenarios, analyzes the application prospect of single photon detection in wireless optical communication. Then we report our team's results of applying superconducting series nanowire single-photon detectors to space optical communication, which is expected to provide reference and ideas for related research.

Key words optical communication; wireless optical communication; free space optical communication; underwater optical communication; photodetector; single photon detection; modulation and demodulation

收稿日期: 2021-06-24; 修回日期: 2021-08-01; 录用日期: 2021-09-08

基金项目: 国家自然科学基金(62071214, 61801206)、江苏省双创人才项目(20191479)、江苏省双创团队项目(20192032)

通信作者: *qyzhao@nju.edu.cn

1 引 言

无线光通信是指在两个或多个终端之间,利用无线传输的光束作为载波实现通信的一种方式,常用的光源有激光二极管(LD)和发光二极管(LED)等。相比于微波通信,无线光通信具有通信速率高、功耗低、体积小、抗干扰能力强等特点,在空间和海洋探测、应急通信、超高速泛在光联网、天地一体化网络等方面有着重大的战略需求与应用价值。

根据链路传输媒介的不同,无线光通信可分为以空气或真空为媒介的空间光通信,以及以海水为媒介的水下光通信。目前,空间光通信已经在卫星和地面以及星间等多种链路成功进行了在轨试验,水下光通信作为一种新的通信技术也在逐渐兴起,获得了广泛关注。按照系统功能划分,无线光通信涉及捕获跟踪、通信收发、信道补偿和光机电设计等4类关键技术^[1]。

在通信收发方面,空间光通信和水下光通信具有一定的相似性,可以互为借鉴,同时,二者又具有各自的特点,在构建从深空到水下全覆盖的无线光通信网络时需综合考虑。本文着重针对无线光通信中的收发技术,对空间光通信和水下光通信的研究现状进行梳理,总结其发展趋势,分析了单光子探测在无线光通信中的应用前景,并报道了本研究组基于串联型超导纳米线单光子探测器在空间光通信方面取得的结果,为相关研究提供参考。

2 空间光通信收发技术的研究现状

2.1 国外空间光通信收发技术的研究现状

空间光通信从20世纪90年代至今已经进行了卫星-地面站、卫星-卫星、卫星-飞机等多种链路的在轨试验,处于领先地位的主要是美国、欧洲和日本^[2]。根据调制技术和通信距离的不同,可大致分为三类。

1) 同步卫星高度以内、采用强度调制/直接检测的空间光通信

空间光通信在轨试验初期,处于领先地位的主要是日本和欧洲,典型代表卫星为日本的ETS-VI和OICETS,以及欧洲的ARTEMIS。这一阶段的空间光通信距离都在同步卫星高度以内,收发方式为强度调制/直接检测(IM/DD)。

1995年前后,日本的同步卫星ETS-VI和美国喷气推进实验室(JPL)的地面站之间成功实现了世

界首次星地双向空间光通信,通信链路如图1^[3]所示。上行链路波长为514 nm,下行链路波长为830 nm。调制方式上,ETS-VI采用了曼彻斯特编码的开关键控(OOK)方式,在一个时钟周期内,利用上升沿表示编码1,利用下降沿表示编码0,这种调制方式也可以看作是两时隙脉冲位置调制(2-PPM)。在接收机前端,ETS-VI光学载荷和地面站都使用了雪崩光电二极管(APD)作为光电探测器^[4],用于将接收的光信号转变为电信号,探测器带宽为1.75 MHz,通信速率为1.024 Mb/s。

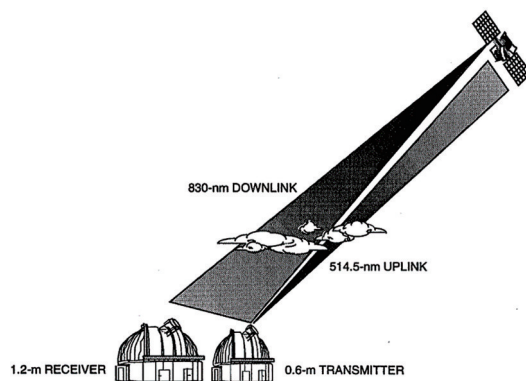


图1 ETS-VI和地面站的光通信链路^[3]

Fig. 1 Optical communication link between ETS-VI and ground station^[3]

ARTEMIS是欧洲航天局SILEX项目中的一颗地球同步卫星,于2001年和SILEX中的另外一颗近地观测卫星SPOT-4实现了世界首次单向星间光通信,通信子系统由TESAT公司研制。2005年,ARTEMIS和日本的低轨卫星OICETS配合,实现了世界首次星间双向空间光通信,通信链路如图2^[5]所示。其中,上行链路波长为847 nm,速率为50 Mb/s,下行链路波长为819 nm,速率为2 Mb/s。调制方面,下行链路(ARTEMIS发射端)采用了2-PPM调制方式,和ETS-VI相同;上行链路(OICETS的发射端)采用了非归零编码的开关键控方式(NRZ-OOK),在一个时钟周期内,利用高电平代表编码1,利用低电平代表编码0。接收机前端,ARTEMIS和OICETS也都采用了APD对光信号进行直接检测。此后,这两颗卫星又分别和飞机、地面站等建立了空间光通信链路^[2],收发技术基本没有太大变化。

2) 同步卫星高度以内、采用相干方式的空间光通信

虽然初期IM/DD方式的空间光通信在轨试验

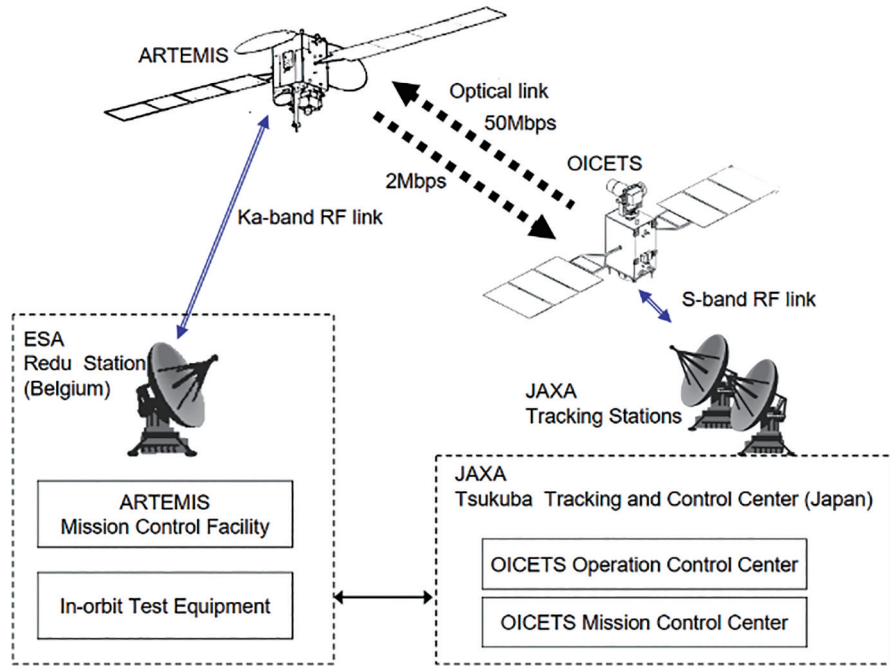


图 2 ARTEMIS 和 OICETS 的光通信链路^[5]

Fig. 2 Optical communication link between ARTEMIS and OICETS^[5]

对星地、星间以及卫星与飞机之间等多种链路都进行了验证,具有重要意义,但通信速率较低,无法完全体现空间光通信的优势。因此,在低轨卫星 OICETS 之后,出现了采用相干方式的空间光通信系统。

2008 年,德国的低轨卫星 TerraSAR-X 和美国的低轨卫星 NFIRE 首次实现了星间双向相干光通信演示,搭载的光通信终端仍由 TESAT 公司研制,如图 3^[6]所示,通信波长为 1064 nm。调制方面,采用了二进制相移键控(BPSK),使用初始相位 0 和 π 表示编码 0 和 1。BPSK 传递信息时所用的相位是固定不变的,对本振信号和接收信号之间的相位精

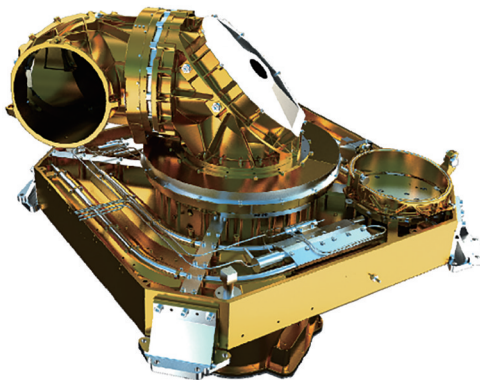


图 3 TerraSAR-X 和 NFIRE 搭载的光通信终端^[6]

Fig. 3 Optical communication terminal on TerraSAR-X and NFIRE^[6]

度要求较高,差分相移键控(DPSK)在 BPSK 的基础上,利用前后相邻码元载波相位的相对变化来传递信息,有利于降低对于本振信号和接收信号之间的相位精度要求,在后文的激光通信中继演示验证(LCRD)项目中获得了使用。

直接检测方式无法获得信号的相位信息,需使用相干检测方式对相位调制的信号进行解调。图 4^[7]为两种相干检测方式的原理图,其中,平衡探测器由两个性能基本一致的光电探测器构成,常见有 PIN 型光电二极管和 APD,在通信距离较远时,APD 因灵敏度较高而使用得较多^[8];相比于单管探

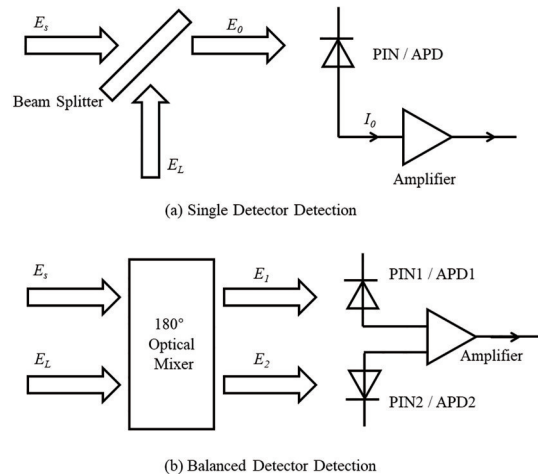


图 4 相干检测原理图^[7]

Fig. 4 Schematic diagram of coherent detection^[7]

测,平衡探测更有利于改善相干光通信的性能。TerraSAR-X 和 NFIRE 的接收机就采用了平衡探测器^[7],以零差方式对信号进行检测,通信速率达到 5.625 Gb/s,误码率(BER)为 10^{-9} 。2010年,NFIRE 和欧洲航天局光学地面站(OGS)之间成功进行了星地双向相干激光通信^[9],验证了星地相干空间光通信的可行性。

此后,欧洲航天局开始计划欧洲数据中继系统 EDRS^[10],拟使用两颗同步卫星作为中继,采用空间光通信的方式接收低轨卫星的数据,再利用 Ka 波段将接收到的数据回传至地面,即 LEO-GEO-GROUND 中继方式,旨在实现第一个通信速率达 Gb/s、并提供商业服务的空间激光通信系统。其中,星间光通信部分将沿用 TerraSAR-X 中的收发技术,通信速率为 1.8 Gb/s。

同样在 2008 年,日本宇航探索局(JAXA)开始研制用于数据中继的小型化高码率空间光通信终端,波长 1064 nm,采用 BPSK 调制,零差相干接收方式,通信速率可达 2.5 Gb/s^[11]。2011年,日本情报通信研究机构(NICT)研制出 1064 nm 和 1550 nm 双波

段相干接收机,能够解调 6 Gb/s 的 BPSK 信号^[11]。此外,日本还开展了 1550 nm 波段,基于相干体制通信,速率高达 40 Gb/s 的卫星与飞机以及卫星和地面站之间的激光通信终端相关研制工作^[2]。

3) 地月距离以外、采用脉冲位置调制/单光子探测的空间光通信

在地月距离以外的深空光通信方面,具有代表性的在轨试验主要由美国开展。2013年,美国国家航空航天局(NASA)的地月激光通信演示试验(LLCD)首次实现了绕月飞行器 LADEE 和可移动地面站 LLGT 之间的双向激光通信,代表了目前空间光通信的最高水平,通信链路如图 5^[12]所示,上行链路波长为 1558 nm,下行链路波长为 1550 nm。

调制方式上,可移动地面站 LLGT 和 LADEE 的光学载荷都采用了脉冲位置调制(PPM),利用脉冲出现的位置来传递信息,但所用的时隙数量不同,LLGT 采用了 4-PPM 调制方式,每 4 个数据时隙后跟有 12 或 28 个静默时隙,上行速率为 10、20 Mb/s,LADEE 光学载荷采用了 16-PPM 调制方式,下行速率为 38~622 Mb/s^[12]。

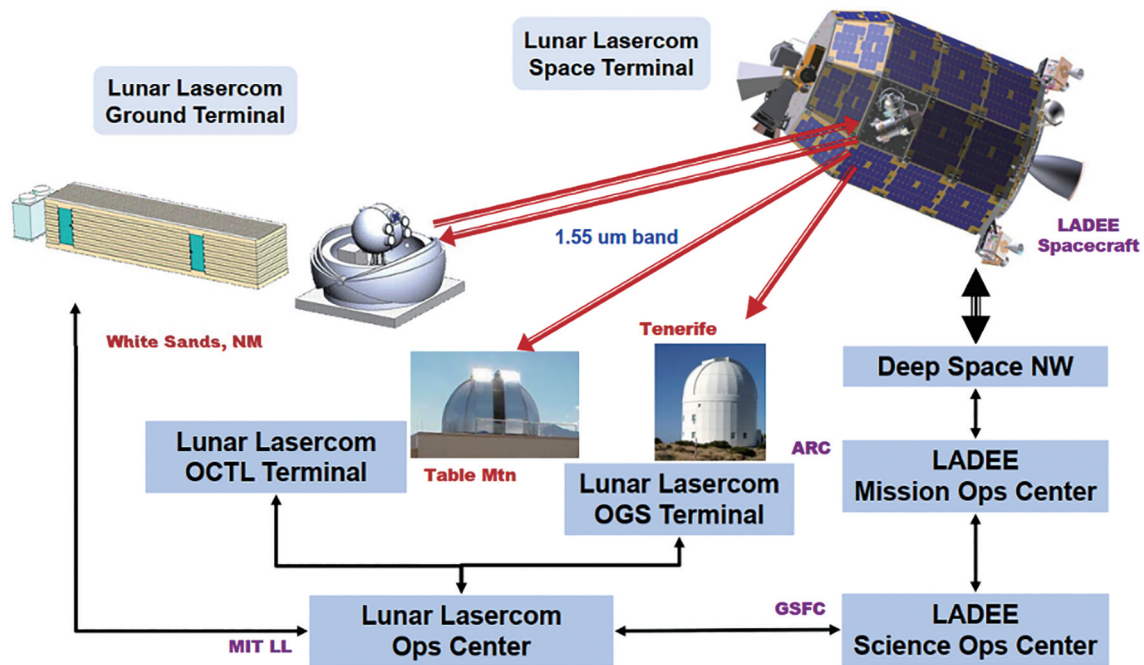


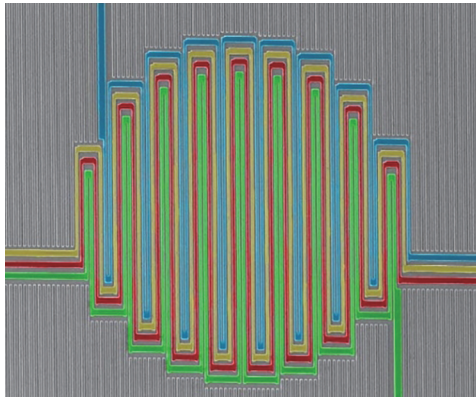
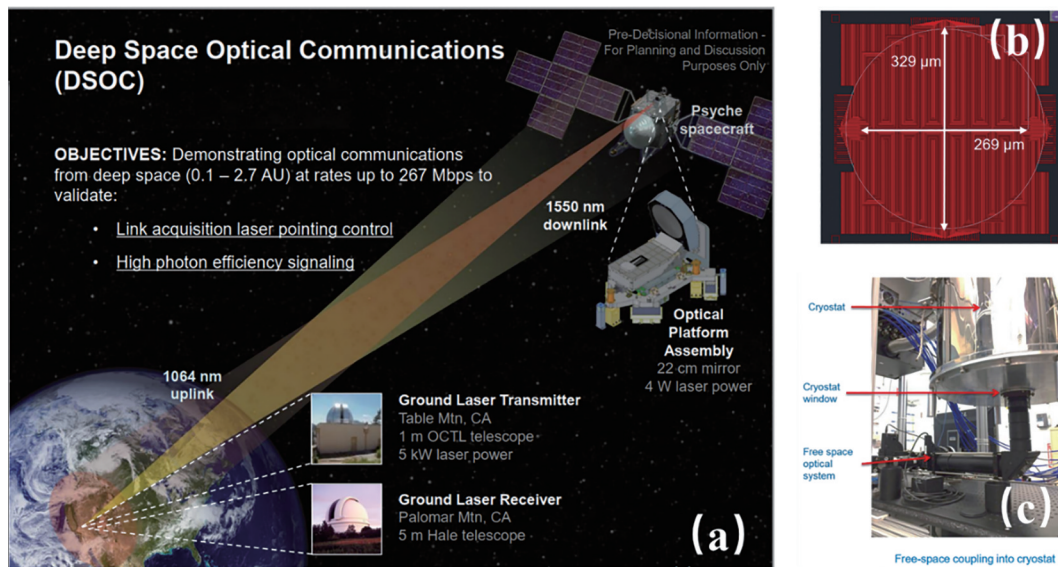
图 5 地月激光通信演示试验的光通信链路^[12]

Fig. 5 Optical communication link of LLCD^[12]

接收机前端,LLGT 使用了超导纳米线单光子探测器(SNSPD)阵列对调制后的光信号进行检测。如图 6 所示,SNSPD 阵列的像元数为 4,由林肯实验室研制,制备材料为氮化铌,光敏面直径为 $14 \mu\text{m}$,使用多模光纤进行耦合,探测效率为 50%,时间抖

动为 30 ps ^[13]。

LLCD 的成功使美国又启动了激光通信中继演示验证(LCRD)和深空光通信(DSOC)等一系列空间光通信计划。LCRD 项目将演示地球同步轨道卫星与地面接收站的高速双向通信,并利用地球同步

图 6 LLGT 接收端使用的超导纳米线单光子探测器阵列^[13]Fig. 6 SNSPD array used in the LLGT optical receiver^[13]图 7 DSOC 相关报道。(a) DSOC 光通信链路；(b) 地面站使用的 SNSPD 阵列版图；(c) 空间光耦合方式^[15]Fig. 7 Relevant reports about DSOC. (a) Optical communication link of DSOC; (b) SNSPD array layout for the ground station; (c) free space optical coupling method^[15]

2.2 国内空间光通信收发技术的研究现状

我国的空间光通信起步相对较晚,研究机构主要有哈尔滨工业大学、中国科学院、中国空间技术研究院以及南京英田光学工程股份有限公司等,研制的光通信终端已成功进行了在轨试验。此外,中国工程物理研究院、中国电子科技集团公司第三十四研究所、长春理工大学、哈尔滨工程大学等单位也在空间光通信方面进行了大量的研究,并取得了众多成果。其中,中国工程物理研究院近几年在太赫兹无线光通信方面取得了突破性成果,在 0.14 THz 波段,开展了距离 21 km,单路实时通信速率达 5 Gb/s 的无线通信试验^[16];中国电子科技集团公司第三十四研究所主要面向机载、舰载等空间光通信终端开展研究,相关产品在国内获得广泛应用^[17];长春理

工大学近几年主要针对大气湍流等方面开展研究^[18-19];哈尔滨工程大学则主要面向室内外可见光通信以及水下光通信开展研究^[20-21]。

目前,我国发射的光学实验卫星主要有海洋二号(HY-2)、墨子号(QUESS)和实践十三号(SJ-13)等,轨道高度均在同步卫星高度以内,通信方式以强度调制/直接检测为主。其中,低轨卫星海洋二号和地面站之间建立了双向激光通信链路,通信距离 2000 km,最大下行速率 504 Mb/s,实现了我国首次星地激光通信^[22]。高轨卫星实践十三号在国际上首次实现了高轨卫星和地面站之间的双向激光通信,最高通信速率可达 5 Gb/s,通信距离 40000 km^[1]。“墨子号”是世界首颗量子科学实验卫星,搭载了中国科学院上海光学精密机械研究所(SIOM)研制的

相干激光通信终端,进行了我国首次相干激光通信试验,上行波长为 1064 nm,速率为 20 Mb/s,下行波长为 1550 nm,速率为 5.12 Gb/s,通信距离达 1000 km 以上^[23],并在国际上率先实现了千 km 级星地量子

纠缠分发,奠定了我国在量子通信方面的领先地位。

为便于对比,表 1 对典型空间光通信在轨试验的收发技术特点进行了汇总。

表 1 典型空间光通信在轨试验收发技术特点汇总

Table 1 Summary of typical space optical communication transceiver technology

| Year | Terminal | Wavelength /nm | Modulation | Detector | Distance /km | Communication rate / $(\text{Mb}\cdot\text{s}^{-1})$ |
|----------|------------------------|----------------|--------------|-------------------------|-----------------------|--|
| 1995 | ETS-VI / TMF | 514 (up) | 2-PPM | APD | >37000 | 1.024 |
| | Ground Station | 830 (down) | | | | |
| 2005 | ARTEMIS / | 847 (up) | NRZ-OOK (up) | APD | 45000 | 50 (up) |
| | OICETS | 819 (down) | 2-PPM (down) | | | 2 (down) |
| 2008 | TerraSAR-X / NFIRE | 1064 (two-way) | BPSK | Balanced detector | 5000 | 5625 |
| 2011 | HY-2 /Ground Station | — | — | — | 2000 | 504 (down) |
| 2013 | LADEE / LLGT | 1558 (up) | SCPPM | SNSPD array (ground) | 400000 | 20 (up) |
| | Ground Station | 1550 (down) | | | | 622 (down) |
| 2016 | QUESS / Ground | 1064 (up) | — | — | >1000 | 20 (up) |
| | Station | 1550 (down) | | | | 5120 (down) |
| 2017 | SJ-13 / Ground Station | — | — | — | 40000 | 5000 |
| Underway | Psyche / OCTL | 1064 (up) | SCPPM | SNSPD array | 1.5×10 ⁷ — | 267 (down) |
| | Ground station | 1550 (down) | | | 4×10 ⁸ | |

3 水下光通信收发技术的研究现状

早期的水下光通信只在军事领域得到应用。21 世纪后,美国、澳大利亚和意大利等国家在水下光通信研究方面成绩显著。2004 年,美国伍兹霍尔海洋研究所和麻省理工学院在海水中采用蓝光 LED 阵列作为光源,光电二极管(PD)作为探测器,实现了距离 5 m,速率 115 kb/s 的水下光通信。2005 年,美国麻省理工学院和澳大利亚国立大学合作,设计了一套完整的包括静态和动态节点的水下观测网络,实现了传感器网络水下光通信,发射端使用了波长 532 nm 的 LED,接收端使用了 PIN 型光电二极管,并采用串行红外(SIR)、快速红外(FIR)和特速红外(VFIR)等几种传输模式实现了用于计算机设备之间短距离光通信的 IrDA 协议,平均传输速率 320 kb/s。2008 年,美国圣地亚哥加州大学在 2 m 的水槽中首次实现了速率高达 1 Gb/s 的水下光通信。2009 年,意大利的 Davide Anguita 利用超高速硬件编程语言,在光学物理层实现了 IEEE 802.11 与 IEEE 802.15.4 标准的兼容,并在 1.8 m 的水槽中利用 LED 和光电二极管实现了速率为 100 kb/s 的水下光通信^[24]。

近些年来,水下光通信发展迅速,国外已有成

熟商用产品出现^[25],我国也在一些重大工程项目中进行使用,如 2020 年底我国自主研发的万米载人潜水器“奋斗者”号和深海着陆器“沧海号”之间首先通过蓝绿光水下光通信方式建立通信链路,再经过“沧海号”和“探索二号”保障船之间 10 多千米的光缆,以及“探索二号”保障船和卫星间的微波通信链路,成功实现了万米海底的实时高清画面直播通信^[26]。

为满足水下光通信不断发展的需求,研究机构也一直致力于更远距离和更高速率的水下光通信研究,近几年文献报道较多的国外研究机构主要有沙特阿拉伯的阿卜杜拉国王科技大学(KAUST)、意大利的比萨圣安娜大学(SSSUP)和英国的思克莱德大学(US),国内研究机构主要有浙江大学(ZJU)、复旦大学(FU)、中国科学技术大学(USTC)、台北科技大学(NTUT)、台湾大学(NTU)、明志科技大学(MCUT)等^[27-29]。此外,中国科学院上海光学精密机械研究所、中国科学院西安光学精密机械研究所和清华大学等单位也进行了大量研究^[30]。

阿卜杜拉国王科技大学在 2016 年使用 APD,在 12 m 的距离实现了速率为 2 Gb/s 的水下光通信,在 20 m 时速率仍有 1.5 Gb/s,且误码率均低于

前向纠错的极限值 3.8×10^{-3} , 实验系统和测试结果如图 8^[31] 所示。2017 年, 在 12 m 的距离将通信速率

提高到了 2.2 Gb/s^[32]。这几次实验都采用了 NRZ-OOK 的调制方式。

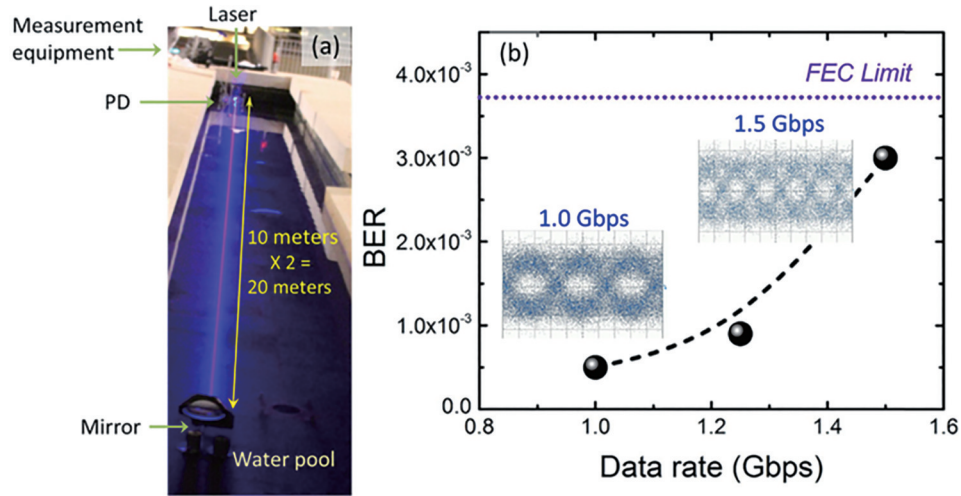


图 8 阿卜杜拉国王科技大学水下光通信实验。(a) 实验系统; (b) 误码率与通信速率测试结果^[31]

Fig. 8 Underwater optical communication experiment of KAUST. (a) Experimental system; (b) test results of BER and communication rate^[31]

比萨圣安娜大学在 2018 年设计了兼容 10Base-T 以太网标准协议的水下光通信收发终端, 如图 9^[33]

所示, 光源为波长 470 nm 的 LED 阵列, 采用曼彻斯特编码方式, 接收端探测器为 APD, 在 10 m 的距离上实现了 10 Mb/s 的通信速率, 图中额外的 PIN 型光电二极管用于监测接收功率。

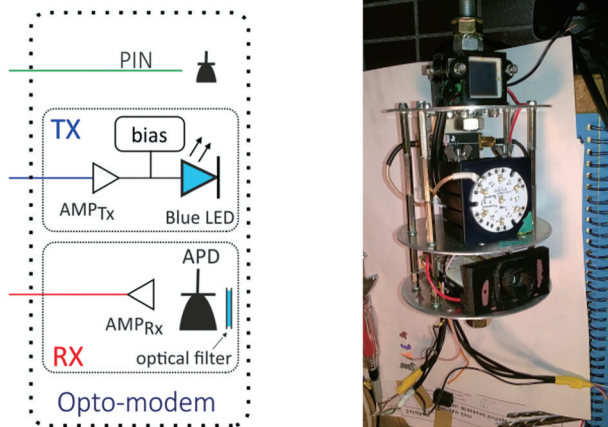


图 9 比萨圣安娜大学水下光通信终端原理图与实物照片^[33]

Fig. 9 Scheme and picture of the underwater optical communication terminal of SSSUP^[33]

思克莱德大学在 2019 年采用波长 450 nm 的串联微型 LED (μ LED) 阵列作为光源, PIN 型光电二极管作为探测器, 基于正交振幅调制 (QAM) 和正交频分复用 (OFDM) 方式, 分别在 1.5 m 和 3 m 的距离实现了 4.92 Gb/s 和 3.22 Gb/s 的水下光通信, 图 10 为实验系统框图^[34]。

浙江大学在 2017 年演示了从空气到水下的无线光通信, 这也是少有的考虑了空气和水交界面的实验, 系统构成如图 11^[35] 所示, 图 11(a)~(c) 分别为所用发射模块、接收模块和水池照片。发射端使用了波长 520 nm 的激光二极管, 调制后的激光信号先经过 5 m 的空气信道, 再经过 21 m 的水下信道, 最后再进入空气中, 经透镜会聚后入射至 APD 上, 调制方式

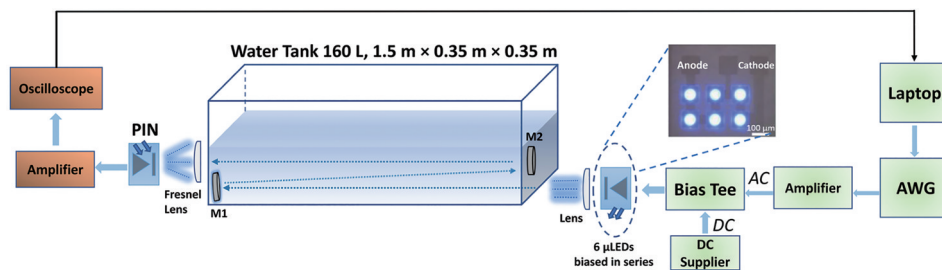


图 10 思克莱德大学的水下光通信实验系统框图^[34]

Fig. 10 Underwater optical communication experimental system of US^[34]

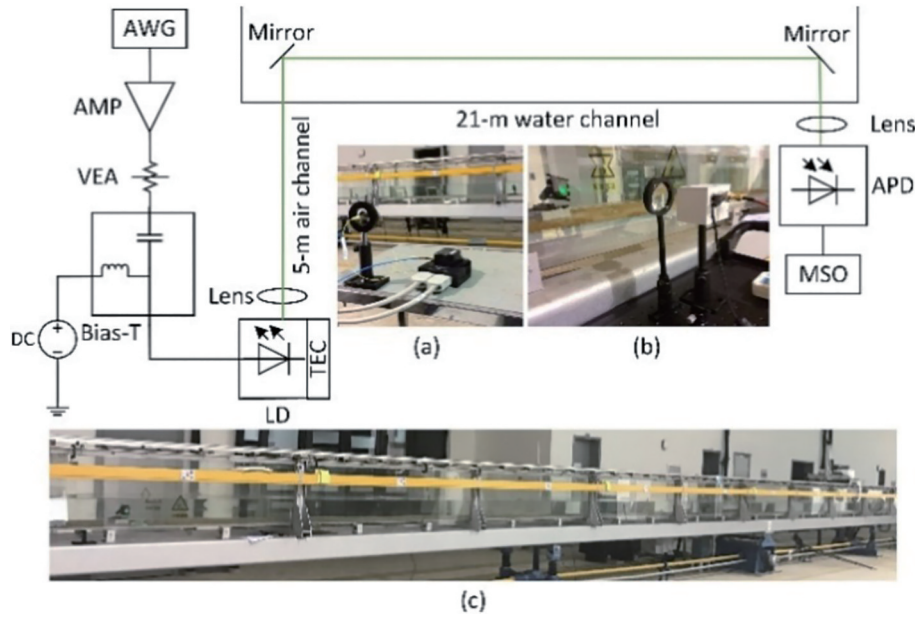


图 11 浙江大学水下光通信实验系统^[35]

Fig. 11 Underwater optical communication experimental system of ZJU^[35]

为 32QAM-OFDM, 通信速率为 5.5 Gb/s。2018 年, 浙江大学利用离散多音频(DMT)调制技术, 分别使用 APD 和 PIN 型光电二极管, 在 15 m 和 5 m 的距离实现了 7.33 Gb/s 和 16.6 Gb/s 的通信速率, 通信波长为 450 nm^[36-37], 并于 2019 年将 DMT 和 256QAM 调制相结合, 利用 PIN 型光电二极管在 35 m 距离上实现了 12.62 Gb/s 的通信速率^[38]。

除使用 APD 和 PIN 型光电二极管等常规线性探测器, 浙江大学还尝试将多像元光子计数器(MPPC)应用至水下光通信系统。MPPC 由工作在盖革模式下的雪崩光电二极管(GM-APD)阵列构成, GM-APD 也常被称为单光子雪崩二极管(SPAD), 是一种常见的单光子探测器, 在可见光波段通常基于硅材料制成。2018 年, 浙江大学使用 MPPC, 分别采用脉冲幅度调制(PAM)和 PPM 调

制方式, 在 2 m 和 46 m 的距离实现了 12.288 Mb/s 以及 Mb/s 量级的通信速率^[39-40], 实验系统如图 12^[40]所示。2019 年, 采用 32QAM-OFDM 调制, 在 21 m 的距离将通信速率提高至 312.03 Mb/s^[41]。

复旦大学在 2017 年采用 APD 和 PIN 型光电二极管, 基于 NRZ-OOK 方式, 在 34.5 m 的距离上实现了 2.7 Gb/s 的水下光通信, 通信波长 520 nm^[42]。2018 年, 分别采用单个 PIN 管和两个 PIN 管, 基于 PAM8 和 64QAM-DMT 调制方式, 在 1.2 m 距离上实现了 1.5 Gb/s 和 2.175 Gb/s 通信速率, 通信波长分别为 457 nm 和 521 nm^[43-44], 并于 2019 年基于 64QAM-DMT 调制在同样的距离将通信速率提升到了 3.075 Gb/s^[45]。

此外, 复旦大学也开展了将单光子探测器应用于水下光通信的相关研究, 2020 年, 使用单光子雪

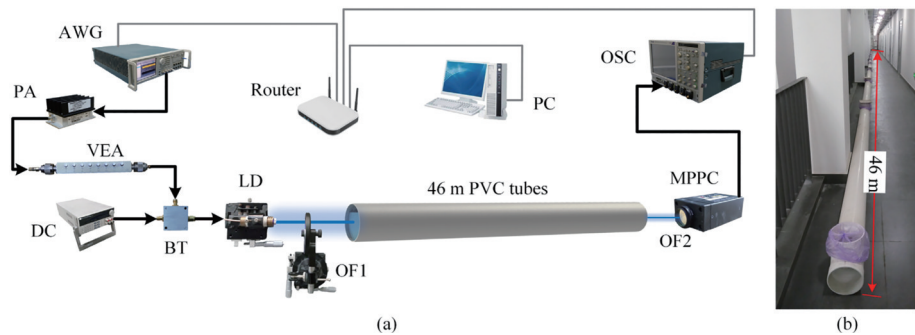


图 12 浙江大学使用多像元光子计数器的水下光通信实验系统^[40]

Fig. 12 Underwater optical communication experimental system using MPPC of ZJU^[40]

崩二极管,基于OOK调制方式,在117 m的距离上实现了2 Mb/s的通信速率,图13为相关的实验系统照片^[46]。

中国科学技术大学在2019年采用NRZ-OOK的

方式分别在60 m和100 m距离上实现了2.5 Gb/s和500 Mb/s的水下光通信^[47-48],误码率也均低于前向纠错码率的极限值 3.8×10^{-3} ,发射端采用了520 nm的激光二极管,接收端采用了APD。

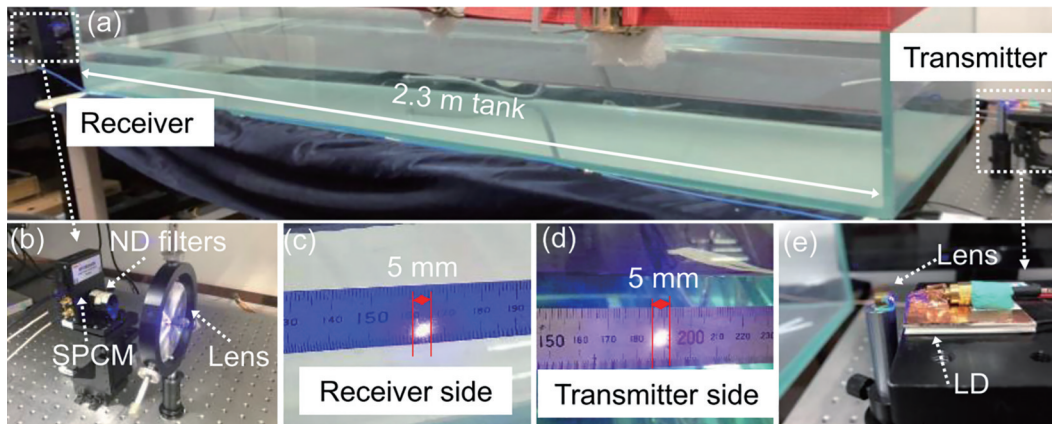


图13 复旦大学使用单光子雪崩二极管的水下光通信实验系统^[46]

Fig. 13 Underwater optical communication experimental system using SPAD of FU^[46]

2016年,台北科技大学采用16QAM-OFDM方式,在8 m的距离实现了9.6 Gb/s的水下光通信^[49],2017年,又采用PAM4方式,在10 m的距离实现了16 Gb/s的水下光通信^[50]。同年,台湾大学采用16QAM-OFDM方式,分别在1.7 m和10.2 m的距离上实现了12.4 Gb/s和5.6 Gb/s的水下光通信^[51]。2019年,明志科技大学采用PAM4调制方式,在12.5 m距离上实现了30 Gb/s的水下光通信^[52]。

值得一提的是,中国科学院上海光学精密机械

研究所在2018年利用光电倍增管(PMT)设计了一种用于水下远程通信的光子计数型接收系统,如图14所示,工作波长为532 nm,调制方式为256-PPM,并采用不同码率的里所码(RS码)和低密度奇偶校验码(LDPC码)作为纠错码,在249.2 m的距离上成功实现了水下光通信,接收端的灵敏度可达3.32 bit/photon^[53],这也是笔者目前所见文献报道中最远距离的水下光通信实验。

为便于对比,表2按研究机构对典型水下光通信实验的收发技术特点进行了汇总。

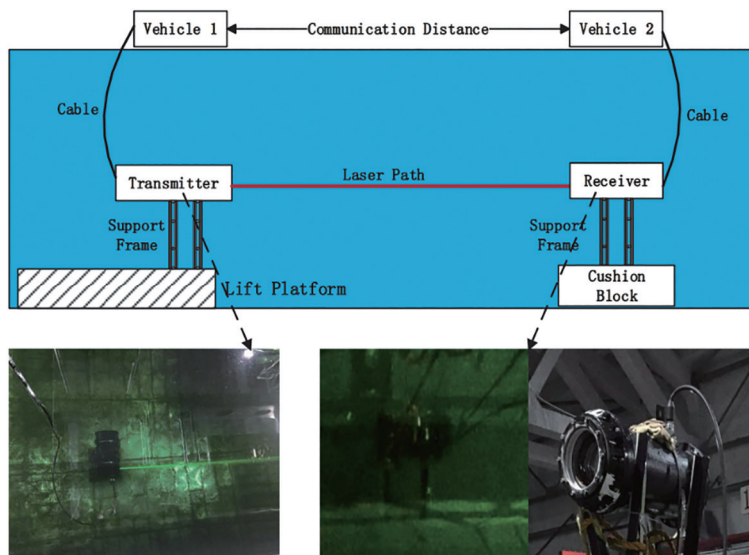


图14 中国科学院上海光学精密机械研究所光子计数型水下光通信实验系统^[53]

Fig. 14 Underwater optical communication experimental system based on photon counting of SIOM^[53]

表 2 典型水下光通信实验收发技术特点汇总

Table 2 Summary of the typical underwater optical communication transceiver technology

| Institution | Year | Wavelength /nm | Modulation | Detector | Distance /m | Communication rate /((Gb·s ⁻¹)) |
|-------------|------|----------------|------------------|----------|-------------|---|
| KAUST | 2016 | 450 | NRZ-OOK | APD | 20/12 | 1.5/2.0 |
| SSSUP | 2018 | 470 | Manchester coded | APD | 10 | 0.01 |
| US | 2019 | 450 | QAM-OFDM | PIN | 1.5/3 | 4.92/3.22 |
| ZJU | 2017 | 520 | 32QAM-OFDM | APD | 21+5 | 5.5 |
| ZJU | 2018 | 450 | DMT | APD/PIN | 15/5 | 7.33/16.6 |
| ZJU | 2019 | 450 | 256QAM-DMT | PIN | 35 | 12.62 |
| ZJU | 2018 | 460 | PAM4 | MPPC | 2 | 0.012 |
| ZJU | 2019 | Blue LED | PPM | MPPC | 46 | Mb·s ⁻¹ |
| ZJU | 2019 | 520 | 32QAM-OFDM | MPPC | 21 | 0.312 |
| FU | 2017 | 520 | NRZ-OOK | APD/PIN | 34.5 | 2.7 |
| FU | 2018 | 457 | PAM8 | PIN | 1.2 | 1.5 |
| FU | 2018 | 521 | 64QAM-DMT | 2 PINs | 1.2 | 2.175 |
| FU | 2019 | Blue LED | 64QAM-DMT | PIN | 1.2 | 3.075 |
| FU | 2020 | 450 | OOK | SPAD | 117 | 0.002 |
| USTC | 2019 | 450 | NRZ-OOK | APD | 60 | 2.5 |
| USTC | 2019 | 520 | NRZ-OOK | APD | 100 | 0.5 |
| NTUT | 2016 | 405 | 16QAM-OFDM | PD | 8 | 9.6 |
| NTUT | 2017 | 488 | PAM4 | PIN | 10 | 16 |
| NTU | 2017 | 450 | 16QAM-OFDM | PIN | 1.7/10.2 | 12.4/5.6 |
| MCUT | 2019 | 488 | PAM4 | APD | 12.5 | 30 |
| SIOM | 2018 | 532 | 256-PPM | PMT | 249.2 | — |

4 单光子探测在无线光通信收发技术中的应用前景

无线光通信技术近年来发展迅速,对比分析空间光通信和水下光通信收发技术的研究现状,呈现以下发展趋势。

1) 空间光通信波长转向 1550 nm 波段,水下光通信保持 450~550 nm 波段

受激光器和光电探测器发展限制,早期的空间光通信波长主要在 800 nm 波段,随着光纤通信技术的发展,1550 nm 波段的空间光通信系统可参照光纤通信的成熟技术提高系统性能,而且便于和地面光纤系统进行全光交换,这也是未来空间光通信发展的趋势。对于水下光通信,受海水透射窗口的限制,通信波长将仍然保持在 450~550 nm 蓝绿光波段,以减小传输路径损耗。

2) 近距离多种调制方式并存,远距离极端场景首选 PPM 调制

由于传输介质的不同,无线光通信系统的作用距离会有所差异。对于空间光通信,同步轨道以内可视为近距离,地月距离以外的深空可视为远距离

极端场景;对于水下光通信,10 m 以内可视为近距离,200 m 以上可视为远距离极端场景。

在近距离情况下,随着光电探测器性能的不不断提高,OOK 方式已可以实现 Gb/s 以上的通信速率,且实现简单,一段时间内仍将是常见的调制方式。若要进一步提升通信速率,可以考虑相干或其他高阶调制。因此,近距离时将形成多种调制方式并存的局面。

在远距离极端场景下,一方面发射功率受限,路径损耗大,需使用能量利用率较高的调制方式,另一方面可能存在较为明显的多普勒频移效应,需谨慎用相干方式。相比于其他调制方式,PPM 能量利用率高,且属于强度调制,不容易受多普勒频移影响,将成为远距离极端场景下调制方式的首选。

3) 近距离仍以线性探测器为主,远距离极端场景采用单光子探测器

在接收机前端探测器的选择上,通信距离较近时,线性探测器基本可满足需求,并适用于多种调制方式的探测,以高灵敏度、大带宽的 PIN 型光电二极管和工作于线性模式的 APD,以及由其构成的平衡探测器为代表,仍将是接收机前端探测器的首

选。表 3^[54]对不同材料的 PIN 型光电二极管和 APD 的典型性能进行了汇总。

在通信距离较远且发射功率受限的极端场景下,到达接收端的能量较弱,通常仅有几个光子,以

PMT、SPAD、SNSPD 等为代表的单光子探测器,因其光子计数的探测方式可以和 PPM 调制完美匹配,将是接收机前端探测器的首选。表 4^[55]对不同类型的单光子探测器性能进行了汇总。

表 3 不同材料的 PIN 和 APD 的典型性能汇总^[54]

Table 3 Summary of typical performances of PIN and APD based on different materials^[54]

| Parameter | Si-PIN | Si-APD | Ge-PIN | Ge-APD | InGaAs-PIN | InGaAs-APD |
|------------------------------------|----------|---------|----------|---------|-------------------------|-------------|
| Wavelength /nm | 400—1100 | | 800—1800 | | 900—1700 | |
| Peak /nm | 900 | 830 | 1550 | 1300 | 1300 (1550) | 1300 (1550) |
| Responsivity /($A \cdot W^{-1}$) | 0.6 | 77—130 | 0.65—0.7 | 3—28 | 0.63—0.8 (0.75—0.97) | |
| Quantum efficiency /% | 65—90 | 77 | 50—55 | 55—75 | 60—70 | 60—70 |
| Gain | 1 | 150—250 | 1 | 5—40 | 1 | 10—30 |
| Bias voltage /(-V) | 45—100 | 220 | 6—10 | 20—35 | 5 | <30 |
| Dark current /nA | 1—10 | 0.1—1.0 | 50—500 | 10—500 | 1—20 | 1—5 |
| Capacitance /pF | 1.2—3 | 1.3—2 | 2—5 | 2—5 | 0.5—2 | 0.5 |
| Rise time /ns | 0.5—1 | 0.1—2 | 0.1—0.5 | 0.5—0.8 | 0.06—0.5 | 0.1—0.5 |

表 4 不同类型单光子探测器的典型性能汇总^[55]

Table 4 Summary of the typical performances of different single photon detectors^[55]

| Detector | Wavelength /nm | Efficiency /% | Maximum count rate /($10^6 s^{-1}$) | Dark count /($10^3 s^{-1}$) | Jitter /ps |
|----------------|----------------|---------------|---------------------------------------|-------------------------------|------------|
| GaAsP PMT | 550—650 | 40 | 10 | <10 | 80 |
| InP/InGaAs PMT | 950—1700 | 2 | - | 250 | 400 |
| Si SPAD | 820 | 55 | 1 | <0.1 | 20 |
| InGaAs SPAD | 1310 | 45 | 197 | 12 | 140 |
| SNSPD | 1550 | >90 | 25 | <0.01 | <5 |

由上述无线光通信的发展趋势可以看出,在深空、深海等极端场景下,单光子探测结合高能量利用率的调制方式将是实现远距离无线光通信的重要途径,其中,SNSPD 和 Si SPAD 两种单光子探测器在 1550 nm 波段和可见光波段具有各自的性能优势,将分别在远距离极端场景下的空间光通信和 underwater 光通信系统中发挥重要作用。此外,针对近距离但功率受限场景,如近地微纳卫星等,单光子探测也有着潜在的应用价值,前景广阔。

5 串联型超导纳米线单光子探测器在高速光通信中的应用

单光子探测在远距离极端场景下有着重要的应用前景,但单个器件的最大计数率较低,一般在几到几十兆每秒,如表 4 所示,这也是限制通信速率的主要因素,无法满足高速光通信的相关需求。为解决这一问题,通常采用多个单光子探测器构成阵列,弥补单个器件响应速度慢的缺点,以提高总的计数率,进而提升通信速率,如前文所述美国 LLCD

项目中使用的 4 像元 SNSPD 阵列,以及 DSOC 项目中正在研制的 64 像元 SNSPD 阵列,但阵列中的每个像元都需要独立的读出电路,结构复杂,可扩展性差。

针对阵列方案的不足,结合单光子探测在无线光通信的应用前景和自身优势,近几年,南京大学超导电子学研究所和网络通信与安全紫金山实验室(PML)合作紧密,从器件层面进行探测速度提升,开展了基于超导纳米线单光子探测器、面向极端场景的单光子通信研究工作,并获得了一些初步结果。

图 15^[56]为南京大学研制的高速串联型超导纳米线单光子探测器照片及其等效电路,基本单元为单个 SNSPD 和电阻并联,并联电阻的引入有利于提升单个单元的响应速度;最终的器件结构再由多个基本单元串联而成,不同的单元可以工作于近乎并行的方式,进而提升器件总体的响应速度。实验测得高速串联型器件(SND)的最大计数率可达 $380 \times 10^6 s^{-1}$,相比同样面积 SNSPD($51 \times 10^6 s^{-1}$)提高了 6 倍多^[56]。值得一提的是,高速串联器件依

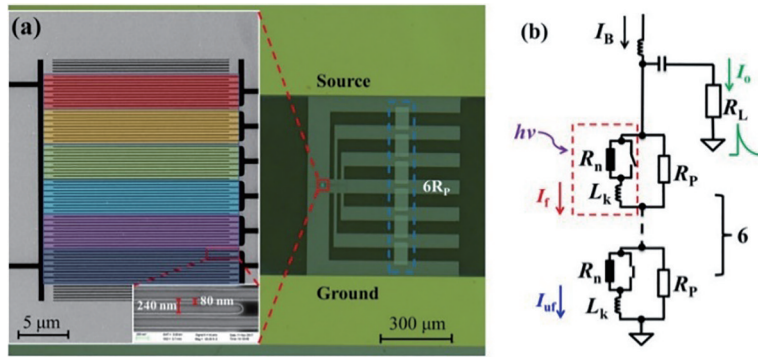


图 15 南京大学高速串联型超导纳米线单光子探测器。(a) 器件结构; (b) 等效电路模型^[56]

Fig. 15 High-speed series nanowire superconducting single-photon detector from Nanjing University.

(a) Device structure; (b) equivalent circuit model^[56]

然为单端输出, 可视为单个器件, 和阵列方案使用多个独立读出的 SNSPD 像元来提高计数率不同; 通过将多个高速串联器件构成阵列, 有望再进一步提升单光子探测的计数率。

此外, 相比传统的 SNSPD, 串联型器件还具备光子数分辨能力, 在探测到多个光子时, 输出脉冲幅度成比例增大, 用于判定此时发送端发送光脉冲的概率更大, 因此, 具备更强的抗背景噪声能力。

图 16 为串联型器件和传统 SNSPD 在 8-PPM 调制, 串行级联脉冲位置调制 (SCPPM) 纠错编码, 平均脉冲噪声光子数 $n_b = 0.1$ 时的误码率和平均信号脉冲光子数关系的计算结果。可见, 在相同误码率的情况下, 串联型器件所需的平均信号脉冲光子数更少, 相应的信噪比更低, 抗背景噪声能力更强。

基于上述高速串联型器件, 我们也开展了相关的通信实验, 图 17 为实验系统框图, 在电脑上编码的 SCPPM 数据下载至任意波形发生器 (AWG) 上, 控制高速电光调制器产生发射信号, 发射信号通过

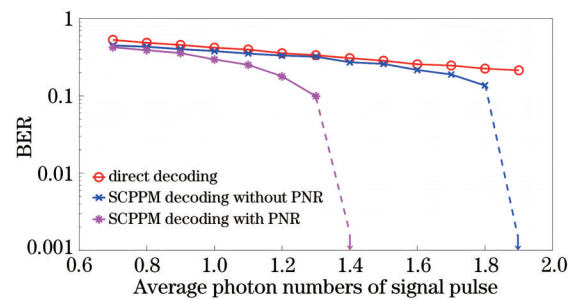


图 16 串联型器件和传统 SNSPD 在相同条件下误码率和平均信号光子数的仿真结果

Fig. 16 Simulation results between BER and average photon number based on SND and conventional SNSPD under same conditions

光纤或自由空间传送至接收端, 通过衰减器模拟信道衰减, 最终由串联型器件进行探测, 探测信号经低温和常温两级放大器后, 使用高速示波器进行采集, 并在电脑上进行滤波和 SCPPM 解码等后处理, 最终和发送数据类比, 计算通信误码率。

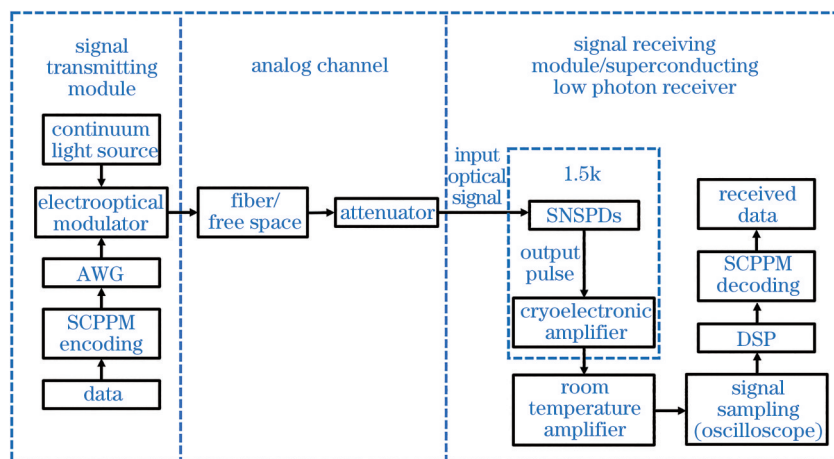


图 17 南京大学和紫金山实验室开展单光子通信研究的系统框图

Fig. 17 System diagram of single photon communication research conducted by Nanjing University and PML

通过调节 PPM 的时隙数量、时隙时间以及码字与码字之间的静默时间,最终获得的最大通信速率为 800 Mb/s,考虑到所用 SCPPM 的码率为 1/2,因此最大有效通信速率为 400 Mb/s。和美国 LLCD 项目相比,其实现 622 Mb/s 通信速率使用了 4 像元 SNSPD 阵列,归一化至单个像元的通信速率为 155.5 Mb/s。可见,我们的方案确实是在通信速率上获得了显著提升。

图 18 为在上述最大通信速率下,使用不同译码方式测量的误码率与信号光子数的关系。采用 SCPPM 纠错码且误码率为 0 时,所需的平均脉冲信号光子数仅为 2。相比于直接译码,在相同的误码率下,采用 SCPPM 纠错码所需的信号光子数更少,抗噪声能力更强。可见,在将单光子探测技术应用于高速光通信时,除了设计响应更快的探测器,还需要结合器件输出特性优化通信调制模式、编码方案、纠错算法等,多个方面结合以便发挥探测器的最大性能。

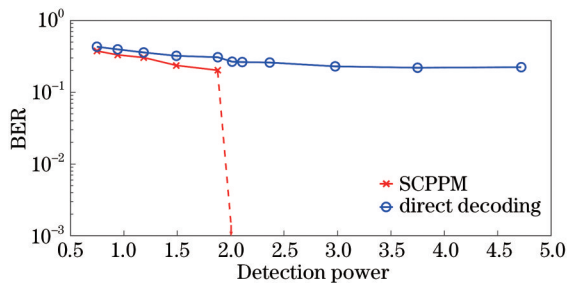


图 18 串联型器件在最大通信速率下,两种译码方式测量的误码率与信号光子数关系

Fig. 18 Relationship between BER and photon number measured by two decoding methods at maximum communication rates based on SND

6 结束语

无线光通信凭借自身优势,有望成为空间和海洋探测、天地海一体化网络等方面的重要通信方式。作为无线光通信系统的关键技术之一,通信收发技术将对系统性能起决定性作用。单光子探测作为弱光探测的主要手段,近些年发展迅速,也逐渐被应用于无线光通信系统中。本文梳理了无线光通信收发技术的研究现状,分析了单光子探测在其中的应用前景,有利于掌握相关技术的发展趋势,为研究者提供借鉴,助力我国无线光通信技术的发展。

参 考 文 献

[1] Wang T S, Lin P, Dong F, et al. Progress and

prospect of space laser communication technology[J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(3): 92-99.

王天枢,林鹏,董芳,等.空间激光通信技术发展现状及展望[J].中国工程科学,2020,22(3):92-99.

[2] Bai S, Wang J Y, Zhang L, et al. Development progress and trends of space optical communications [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(7): 070001.

白帅,王建宇,张亮,等.空间光通信发展历程及趋势[J].激光与光电子学进展,2015,52(7):070001.

[3] Wilson K E. An overview of the GOLD experiment between the ETS-6 satellite and the Table Mountain facility[R]. Washington, D.C.: NASA, 1996.

[4] Toyoshima M, Araki K, Arimoto Y, et al. Reduction of ETS-VI laser communication equipment optical-downlink telemetry collected during GOLD[R]. Washington, D.C.: NASA, 1996.

[5] Jono T, Takayama Y, Ohinata K, et al. Demonstrations of ARTEMIS-OICETS inter-satellite laser communications[C]//24th AIAA International Communications Satellite Systems Conference, June 11-14, 2006, San Diego, California. Reston: AIAA Press, 2006.

[6] Smutny B, Lange R, Kämpfner H, et al. In-orbit verification of optical inter-satellite communication links based on homodyne BPSK[J]. Proceedings of SPIE, 2008, 6877: 687702.

[7] Shi Q Y, Ai Y, Liang H X, et al. Analysis and test of balanced detector in coherent optical communication [J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(16): 207-211.

石倩芸,艾勇,梁赫西,等.相干光通信中平衡探测器的研究与测试[J].科学技术与工程,2016,16(16):207-211.

[8] Juarez J C, Young D W, Sluz J E, et al. High-sensitivity DPSK receiver for high-bandwidth free-space optical communication links[J]. Optics Express, 2011, 19(11): 10789-10796.

[9] Fields R A, Kozlowski D A, Yura H T, et al. 5.625 Gbps bidirectional laser communications measurements between the NFIRE satellite and an optical ground station[J]. Proceedings of SPIE, 2011, 8184: 81840D.

[10] Seel S, Kämpfner H, Heine F, et al. Space to ground bidirectional optical communication link at 5.6 Gbps and EDRS connectivity outlook[C]//2011 Aerospace Conference, March 5-12, 2011, Big Sky, MT, USA. New York: IEEE Press, 2011: 11943839.

[11] Zhang L, Guo L H, Liu X N, et al. Latest progress

- and trends of development of space laser communication [J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2013, 32(4): 286-293.
- 张靓, 郭丽红, 刘向南, 等. 空间激光通信技术最新进展与趋势[J]. 飞行器测控学报, 2013, 32(4): 286-293.
- [12] Boroson D M, Robinson B S. The lunar laser communication demonstration: NASA's first step toward very high data rate support of science and exploration missions[J]. Space Science Reviews, 2014, 185(1/2/3/4): 115-128.
- [13] Boroson D M, Scozzafava J J, Murphy D V, et al. The lunar laser communications demonstration (LLCD)[C]//2009 International Conference on Space Mission Challenges for Information Technology, July 19-23, 2009, Pasadena, CA, USA. New York: IEEE Press, 2009: 23-28.
- [14] Edwards B L, Israel D, Wilson K, et al. Overview of the laser communications relay demonstration project [C]//SpaceOps 2012 Conference, June 11-15, 2012, Stockholm, Sweden. Reston: AIAA Press, 2012.
- [15] Matt S. Superconducting nanowire single photon detectors opportunities for HEP[EB/OL]. (2019-12-08) [2021-05-04]. https://agenda.hep.wisc.edu/event/1391/contributions/7030/attachments/1675/1887/CPAD_8_December_2019.pdf.
- [16] Wu Q Y, Lin C X, Lu B, et al. Design and tests of 21 km, 5 Gbps, 0.14 THz wireless communication system[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2017, 29(6): 170064.
- 吴秋宇, 林长星, 陆彬, 等. 21 km, 5 Gbps, 0.14 THz 无线通信系统设计与试验[J]. 强激光与粒子束, 2017, 29(6): 170064.
- [17] FSO (Free Space Optics) [EB/OL]. [2021-05-04]. <http://www.gioc.com.cn/jiejue.php?cid=4>.
- 无线光传输系统 [EB/OL]. [2021-05-04]. <http://www.gioc.com.cn/jiejue.php?cid=4>.
- [18] Zhou C, Yu X N, Jiang H L, et al. Research on atmospheric turbulence suppression methods of near the earth wireless laser communication channels based on APD adaptive gain control[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(4): 0406002.
- 周畅, 于笑楠, 姜会林, 等. 基于 APD 自适应增益控制的近地无线激光通信信道大气湍流抑制方法研究[J]. 中国激光, 2022, 49(4): 0406002.
- [19] Gong X Y, Zhang P, Wu X J, et al. Research on influence of aberration and turbulence on performance of 90° space optical hybrid[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(4): 0401003.
- 宫喜宇, 张鹏, 吴潇杰, 等. 像差及湍流对 90°空间光混频器性能的影响研究[J]. 光子学报, 2021, 50(4): 0401003.
- [20] Han S, Zhang J, Meng F Y, et al. Darkroom weak optical communication based on single photon detection[J]. Journal of Information Engineering University, 2017, 18(6): 679-682.
- 韩松, 张剑, 孟凡玉, 等. 基于单光子检测的暗室弱光通信[J]. 信息工程大学学报, 2017, 18(6): 679-682.
- [21] Chen J J, Li H L. Research on underwater LED optical communication system based on MDPCM modulation technology[J]. Applied Science and Technology, 2021, 48(1): 42-47.
- 陈娇娇, 李鸿林. 基于 MDPCM 调制技术的水下 LED 光通信系统研究[J]. 应用科技, 2021, 48(1): 42-47.
- [22] Wu Y M, Liu X, Luo G J, et al. Research progress and structure system of space optical communication network technology[J]. Optical Communication Technology, 2017, 41(11): 46-49.
- 吴应明, 刘兴, 罗广军, 等. 空间光通信网络技术的研究进展及架构体系[J]. 光通信技术, 2017, 41(11): 46-49.
- [23] Ren J Y, Sun H Y, Zhang L X, et al. Development status of space laser communication and new method of networking[J]. Laser & Infrared, 2019, 49(2): 143-150.
- 任建迎, 孙华燕, 张来线, 等. 空间激光通信发展现状及组网新方法[J]. 激光与红外, 2019, 49(2): 143-150.
- [24] Wei W, Chen N N, Zhang X H, et al. Survey on optical wireless communications for underwater sensor networks[J]. Sensor World, 2011, 17(3): 6-12.
- 魏巍, 陈楠楠, 张晓晖, 等. 用于水下传感器网络的无线光通信研究概况[J]. 传感器世界, 2011, 17(3): 6-12.
- [25] BlueComm family of underwater optical communications [EB/OL]. [2021-05-08]. <https://www.sonardyne.com/product/bluecomm-underwater-optical-communication-system/>.
- [26] Xi'an Institute of Optics and mechanics helps China set a new record in manned deep diving[EB/OL]. (2020-12-07)[2021-05-08]. http://www.xab.cas.cn/cmsj/202012/t20201207_5810833.html.
- 西安光机所助力中国载人深潜新纪录[EB/OL].

- (2020-12-07)[2021-05-08]. http://www.xab.cas.cn/cmsj/202012/t20201207_5810833.html.
- [27] Zhu S J, Chen X W, Liu X Y, et al. Recent progress in and perspectives of underwater wireless optical communication[J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2020, 73: 100274.
- [28] Cossu G. Recent achievements on underwater optical wireless communication[J]. *Chinese Optics Letters*, 2019, 17(10): 100009.
- [29] Fei C, Hong X J, Du J, et al. High-speed underwater wireless optical communications: from a perspective of advanced modulation formats [J]. *Chinese Optics Letters*, 2019, 17(10): 100012.
- [30] Zeng F J, Yang K J, Yan X, et al. Research progress on underwater laser communication systems [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(3): 0300002.
曾凤娇, 杨康建, 晏旭, 等. 水下激光通信系统研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(3): 0300002.
- [31] 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.
- [32] Shen C, Guo Y J, Sun X B, et al. Going beyond 10-meter, Gbit/s underwater optical wireless communication links based on visible lasers[C]//2017 Opto-Electronics and Communications Conference (OECC) and Photonics Global Conference (PGC), July 31-August 4, 2017, Singapore. New York: IEEE Press, 2017: 17358916.
- [33] Cossu G, Sturmiolo A, Messa A, et al. Sea-trial of optical ethernet modems for underwater wireless communications[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(23): 5371-5380.
- [34] Arvanitakis G N, Bian R, McKendry J J D, et al. Gb/s underwater wireless optical communications using series-connected GaN micro-LED arrays[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 12(2): 7901210.
- [35] 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.
- [36] Fei C, Zhang J W, Zhang G W, et al. Demonstration of 15-m 7.33-Gb/s 450-nm underwater wireless optical discrete multitone transmission using post nonlinear equalization[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(3): 728-734.
- [37] Fei C, Hong X J, Zhang G W, et al. 16.6 Gbps data rate for underwater wireless optical transmission with single laser diode achieved with discrete multi-tone and post nonlinear equalization[J]. *Optics Express*, 2018, 26(26): 34060-34069.
- [38] Hong X J, Fei C, Zhang G W, et al. Discrete multitone transmission for underwater optical wireless communication system using probabilistic constellation shaping to approach channel capacity limit[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(3): 558-561.
- [39] Kong M W, Chen Y F, Sarwar R, et al. Underwater wireless optical communication using an arrayed transmitter/receiver and optical superimposition-based PAM-4 signal[J]. *Optics Express*, 2018, 26(3): 3087-3097.
- [40] Shen J N, Wang J L, Chen X, et al. Towards power-efficient long-reach underwater wireless optical communication using a multi-pixel photon counter [J]. *Optics Express*, 2018, 26(18): 23565-23571.
- [41] Wang J L, Yang X Q, Lv W C, et al. Underwater wireless optical communication based on multi-pixel photon counter and OFDM modulation[J]. *Optics Communications*, 2019, 451: 181-185.
- [42] Liu X Y, Yi S Y, Zhou X L, 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.
- [43] Chi N, Zhao Y H, Shi M, et al. Gaussian kernel-aided deep neural network equalizer utilized in underwater PAM8 visible light communication system[J]. *Optics Express*, 2018, 26(20): 26700-26712.
- [44] Wang F M, Liu Y F, Jiang F Y, 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.
- [45] Wang F M, Liu Y F, Shi M, et al. 3.075 Gb/s underwater visible light communication utilizing hardware pre-equalizer with multiple feature points [J]. *Optical Engineering*, 2019, 58(5): 056117.
- [46] Chen H L, Chen X W, Lu J, et al. Toward long-distance underwater wireless optical communication based on a high-sensitivity single photon avalanche diode[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2020, 12(3): 7902510.
- [47] 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.
- [48] Lu C H, Wang J M, Li S B, et al. 60 m/2.5 Gbps underwater optical wireless communication with NRZ-OOK modulation and digital nonlinear equalization [C]//Conference on Lasers and Electro-Optics, May 5-10, 2019, San Jose, California. Washington, D.C.: OSA, 2019: 1-2.
- [49] 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): 7906107.
- [50] 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.
- [51] 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: 40480.
- [52] Tsai W S, Lu H H, Wu H W, et al. A 30 Gb/s PAM4 underwater wireless laser transmission system with optical beam reducer/expander[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 8605.
- [53] 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.
- [54] Ghassemlooy Z, Popoola W, Rajbhandari S. *Optical wireless communications: system and channel modelling with MATLAB*[M]. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2018.
- [55] Ferrari S, Schuck C, Pernice W. Waveguide-integrated superconducting nanowire single-photon detectors[J]. *Nanophotonics*, 2018, 7(11): 1725-1758.
- [56] Tao X, Hao H, Li X, et al. Characterize the speed of a photon-number-resolving superconducting nanowire detector[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2020, 12(4): 4501308.