

光极限探测技术在空间通信中的应用

王建宇^{1,2,†} 张亮^{1,††} 文天成¹

(1 中国科学院上海技术物理研究所 上海 200083)

(2 中国科学院大学杭州高等研究院 杭州 310013)

2021-12-20收到

† email: jywang@mail.sitp.ac.cn

†† email: zhliang@mail.sitp.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20220201

The application of photon-limit detection to communication in space

WANG Jian-Yu^{1,2,†} ZHANG Liang^{1,††} WEN Tian-Cheng¹

(1 Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

(2 Hangzhou Institute for Advanced Study, University of Chinese Academy of Sciences, Hangzhou 310013, China)

摘要 光是人类最早的科学研究对象之一，光子是光的最小能量单元，具备量子的基本特征。随着科学技术发展，人类已经能够实现单个光子的极限探测。光的常规探测已经普遍应用于地面光纤通信中，而光的极限探测则在空间量子通信及深空超远距离光通信中具备重要的应用价值。文章介绍了光极限探测技术在空间量子科学实验、空间光子通信中的典型应用及涉及的核心技术。

关键词 光子，量子通信，光通信，墨子号

Abstract Light was one of the earliest scientific research subjects of mankind. A photon is the smallest unit of light energy and has basic quantum characteristics. With the development of science and technology, human beings have been able to reach the limit of detecting a single photon. The conventional detection of light has been widely used in ground level optical fiber communication, but the detection of light at the single-photon limit has important application in free space quantum communication and ultralong distance deep space optical communication. This paper introduces the typical applications and core technologies of photon detection technology in quantum science experiments and photonic communication in space.

Keywords photon, quantum communication, optical communication, Micius

1 引言

光是人类生活中必不可少的物质，人们对光的认知也经历了很长的过程。早在先秦时期，《墨经》中就有关于光的直线传播与小孔成像的记载^[1]。西方经过欧几里得、笛卡尔、费马等科学家的研究，总结了光的反射、折射等定律，奠定了几何光学的基础。17世纪，牛顿发现了光的色

散现象，并提出了光的“微粒说”。1690年惠更斯提出了光的波动学说，1801年杨氏双缝实验证明了光的波动性。此后，科学家们围绕光的波动性和粒子性一直争论不止^[2]。直到1905年，爱因斯坦在光电效应实验的基础上提出了光子假说^[3]，认为光既是粒子又是波。光是由光子组成的光子流，光的能量和其频率成正比，并且光子具有“整体性”，只能被整个地吸收或放出，只有

当单个光子的能量大于电子的逸出功时，才可以激发出金属表面的自由电子，即产生光电效应。

根据光电效应原理可以进行光电探测，随着人们对各类研究的不断深入，如在量子通信以及超远距离光通信研究中，由于发射端的信号源本身非常微弱或者传输链路的损耗非常大，需要在接收端对各种极微弱的光进行探测，甚至对单个光子进行极限探测。单个光子所产生的光电流很难检测到，因此在进行单光子探测时，通常使用基于多级倍增原理的光电倍增管，或者基于半导体雪崩效应的盖革模式雪崩二极管，将光电流进行放大以便检测。此外，还有一种新型的超导纳米线单光子探测技术，由于具有更高的探测效率，更短的死时间和更低的暗计数率，逐渐成为主流的单光子探测技术^[4]。

本文将围绕光的极限探测技术，介绍其在空间量子科学实验、空间光子通信中的应用，并对我国第一颗量子科学实验卫星“墨子号”，以及国内外的空间光子通信系统进行简要介绍。

2 空间量子科学实验

光子是最小能量单元，具备量子的基本特征，包括波粒二象性、不可分割、测不准原理、不可克隆原理等。随着光子操纵及探测技术的发展，产生了一门新的交叉学科——量子信息学。量子通信是量子信息学中发展最成熟的方向之一，其利用量子力学原理对量子态进行操控，在两个地点之间进行信息交互，具备信息论安全的特性。量子通信最为直接的方式是通过光纤或者近地面自由空间信道传输。但是，这两种信道的损耗都随着距离的增加而指数增加。由于量子

不可克隆原理，量子通信的信号不能像经典通信那样被放大，而且光纤传输会引起光子的偏振态退化效应，这使得之前量子通信的世界纪录仅为数百公里量级^[5]。因此，如何实现安全、长距离、可实用化的量子通信是该领域的最大挑战和国际学术界几十年来奋斗的共同目标。利用外太空几乎真空因而光信号损耗非常小的特点，通过卫星的辅助可以大大扩展量子通信距离。同时，由于卫星具有方便覆盖整个地球的独特优势，是在全球尺度上实现超远距离实用化量子密码和量子隐形传态最有希望的途径。自本世纪初以来，该方向已成为了国际学术界激烈角逐的焦点。

2011年底，中国科学院战略性先导科技专项“量子科学实验卫星”正式立项，中国科学技术大学潘建伟教授研究团队，联合中国科学院上海技术物理研究所王建宇研究组、上海微小卫星创新研究院、国家空间科学中心等多个单位成功研制了“墨子号”量子科学实验卫星，于2016年8月16日在酒泉卫星发射中心发射升空。“墨子号”量子卫星圆满完成了星地量子密钥分发、量子纠缠分发以及隐形传态等科学目标^[6-8]。卫星实物图及天地量子实验照片如图1所示，其中红色光束代表地面站发射的信标激光，用来给卫星指示地面位置，绿色线为卫星信标光点滑过空间的轨迹。

量子密钥分发，顾名思义就是通过量子态的传输，使遥远两地的用户共享密钥，可利用该密钥对信息进行一次一密的严格加密，这是目前人类已知的不可窃听、不可破译的信息论安全的通信方式。量子密钥分发实验采用卫星发射量子信号、地面接收的方式。“墨子号”量子卫星过境时，与地面光学站建立光链路，通信距离从500 km到1200 km。卫星上量子密钥光源每秒发送4000万个信号光子，平均成码率1.1 kbps，一次过轨实验可生成300 kbit的安全密钥^[6]。这一重要成果为构建覆盖全球的量子保密通信网络奠定了可靠的技术基础。以星地量子密钥分发为基础，将卫星作为可信中继，可以实现地球上任意两点的密钥共享，将量子密钥分发范围扩展到覆盖全球。

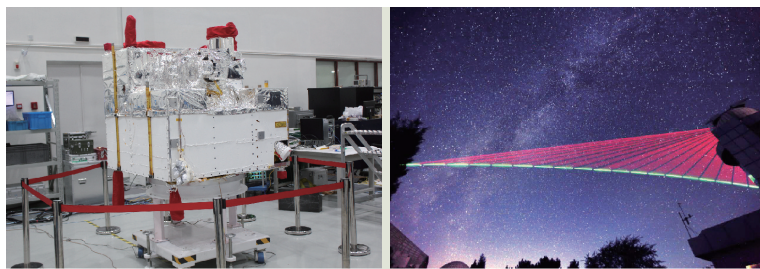


图1 “墨子号”量子科学实验卫星及实验照片

图2为星地量子密钥分发的示意图^[6]，系统由卫星与光学地面站两部分组成。卫星过境地面站时通过光学与跟踪瞄准系统建立卫星与地面站之间的量子光链路。卫星作为信号发射端，通过四个激光器(LD1、LD2、LD3、LD4)结合偏振棱镜、分光棱镜、半波片等产生四个偏振态(水平、竖直、45°、135°)的激光脉冲，四个激光器根据随机数分时发光，激光脉冲再经过衰减后使得平均脉冲光子数小于1个，也成为诱骗态量子光源(图2(b))。地面站采用大口径光学望远镜接收卫星发射的微弱光信号，通过分光棱镜、偏振棱镜、半波片等对卫星量子信号进行偏振解调，将对应偏振态的光子分别传递给四个单光子探测器(SPD1—4)测量光子到达时间(图2(c))。考虑到卫星绕地球运动时引起的双端偏振基矢方向变化，地面端采用可旋转的半波片校正旋转偏差。卫星与地面站根据特定的量子密钥分发协议(如BB84协议)开展后续的密钥比对与纠错等步骤，最终生成收发两端共享的密钥。量子密钥分发的安全性主要体现在两个方面：一是由于单光子不可分割，发射端发送的光子要么被接收端收到，要么被窃听者获取，而只有接收端实际接收到的光子才用来产生最终的密钥，因此窃听者获取不到密钥信息；二是假如窃听者技术先进到可以将发射端发送的所有光子全部截获并复制后发送给接收端，由于单光子态不可克隆，发射端发送的单光子偏振态本来服从一定的概率分布，人为的测量将会影响该偏振态的分布，通过收发双端的密钥比对系统可以识别出窃听者的存在。

由于单光子态不可克隆，无法通过人为测量的方法传递单光子态，量子隐形传态技术利用量子纠缠特性可以将物质的未知量子态精准传送到遥远地点，而不用传送物质本身。地星量子隐形传态采用地面发射纠缠光子、天上接收的方式。“墨子号”量子卫星过境时，与海拔5100 m的西

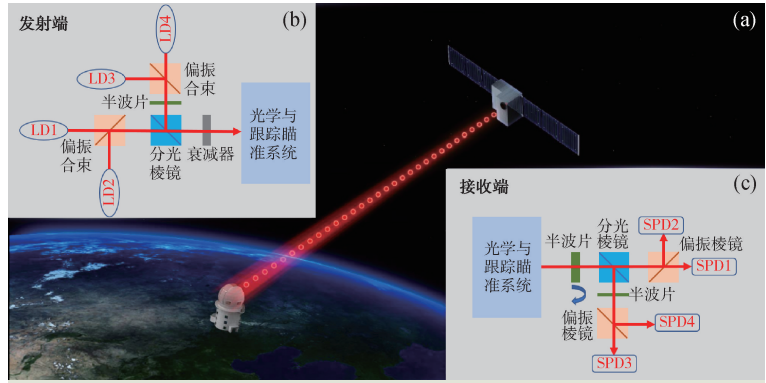


图2 星地量子密钥分发示意图

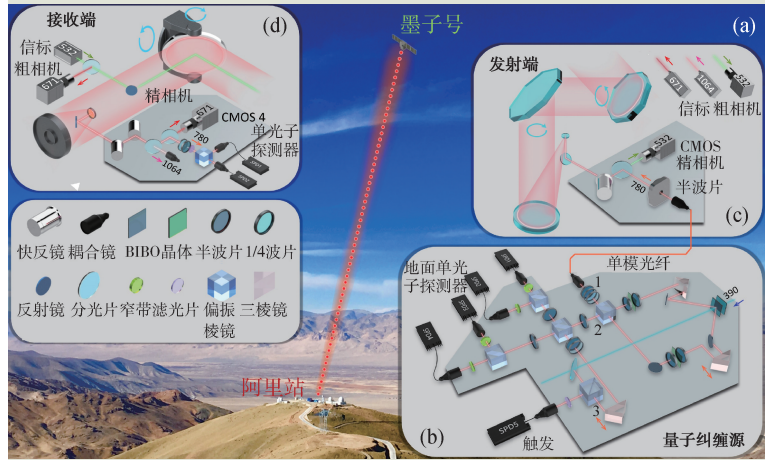


图3 地星量子隐形传态示意图

藏阿里地面站建立光链路。地面光源每秒产生8000个量子隐形传态事例，地面向卫星发射纠缠光子，实验通信距离从500 km到1400 km，所有60个待传送态均以大于99.7%的置信度超越经典极限^[8]。这一重要成果为未来开展空间尺度量子通信网络研究，以及空间量子物理学和量子引力实验检验等研究奠定了可靠的技术基础。

图3为地星量子隐形传态的示意图^[8]，系统同样由卫星与光学地面站两部分组成。卫星过境地面站时通过激光捕获跟踪与瞄准技术建立卫星与地面站之间的量子光链路，卫星端包括二维摆镜、跟踪相机及快反镜等，地面端包括信标、跟踪相机、二维转台等。地面站作为信号的发射方，配备多光子量子纠缠源(图3(b))产生纠缠光子对，将其中1路光子通过单模光纤连接跟瞄系统发送到卫星上，其他地面测量。卫星上的载荷设备采用光学望远镜收集地面发送的光子信号，将

信号传输给两路星载单光子探测器(图3(d))。单光子探测器测量到的光子状态用于量子隐形传态的信息处理。卫星载荷设备采用高隔离度的分光片、窄带滤光片以及时间同步技术降低背景噪声。

在空间量子科学实验中突破了多项核心技术,本文主要介绍与单光子传输和探测有关的两项技术:一是单光子探测器在空间环境中的应用;二是高精度星地光路对准。

单光子探测器在空间环境中的应用一直是国际技术难题,其难点主要体现在外太空环境中存在大量高强度的辐射粒子,尤其是质子辐射会造成单光子探测器的晶格缺陷,也就是位移总剂量效应,从而引起单光子探测器暗计数的暴增。暗计数是单光子探测器的固有噪声与核心指标,由于量子通信中有效信号非常微弱,暗计数成为制约系统信噪比的核心因素。据辐照实验评估,不采取特殊措施时太空辐照带来的单光子探测器暗计数每天的增量约为300 cps/天(cps是“个/秒”的缩写),已超过了空间量子科学实验可容忍的上限。

“墨子号”量子卫星中采用硅基盖革模式单光子探测器,根据机理分析,影响其暗计数的因素主要有两个方面:一是空间辐照环境带来的微分质子能谱,能谱越高暗计数越高;二是探测器的工作温度,工作温度越高,损伤造成的材料漏电流越大,从而暗计数越高。为此,“墨子号”量子卫星中采取了两种措施:一是在单光子探测器的外围打造全周的金属屏蔽体减少空间辐照通量,

使用钽和铝材料构建了等效22 mm的铝屏蔽,结果表明可以降低50%以上的质子注量;二是创造更低温的工作环境,首先采用热管及冷板将探测器的安装座热量传递到外太空冷背景空间,将探测器的环境温度降低到零下40℃以下,然后再采用半导体制冷器将探测器内核温度进一步降低到零下60℃。通过这些措施,实测单光子探测器在太空中的暗计数增量降低到了小于1 cps/天^[9],将探测器的可用寿命从几天提高到了数年。图4为“墨子号”量子卫星载荷中单光子探测器安装示意图及实物图,四个单光子探测器使用铝防护体包围起来,铝防护体内部还有一层钽屏蔽层,热管将铝防护体连接到卫星对外太空的冷板上以便于降温。

为了降低链路损耗,星地量子通信中量子信号的发散角非常窄,在2角秒左右。星地高精度光路对准技术用于在卫星高速运动下实现卫星同时与两个地面站的高精度激光链路建立,链路对准精度达到0.2角秒。由于卫星平台相对地面站的高速运动以及平台中的微振动干扰,如何将微弱的量子信号精确地瞄准地面站是其中的关键问题。“墨子号”卫星为低轨道卫星,在一轨实验过程中对地面站的可视时间小于10分钟。以双站量子实验任务为例说明卫星同时对两个地面站的量子链路建立过程,如图5所示。当卫星位于地面站1水平线以下时开始调整姿态,在飞行到地面站1的5°仰角时(B点)完成卫星对站指向;在地面站1的15°仰角(C点)前,要求卫星与地面站1完成量子光链路的建立并保持。相对于地面站2,当卫星到达地面站2的5°仰角(D点)以上时开始链路建立,在地面站2的15°仰角(E点)前完成与地面站2的量子光链路建立并保持。当卫星位于两个地面站±75°天顶角的交叉区域(E—F)时进行量子通信,当卫星飞行出实验区域时中断链路。由于低轨卫星过站时间短,要求卫星载荷对地面站的捕获时间小于3 s,并满足实验过程中的跟踪范围要求。

为了实现卫星同时对两个地面站的链路建立,采用卫星对站指向和载荷粗、精跟踪相结合多级跟踪架构,如图6所示。卫星平台具备对地面站姿态机

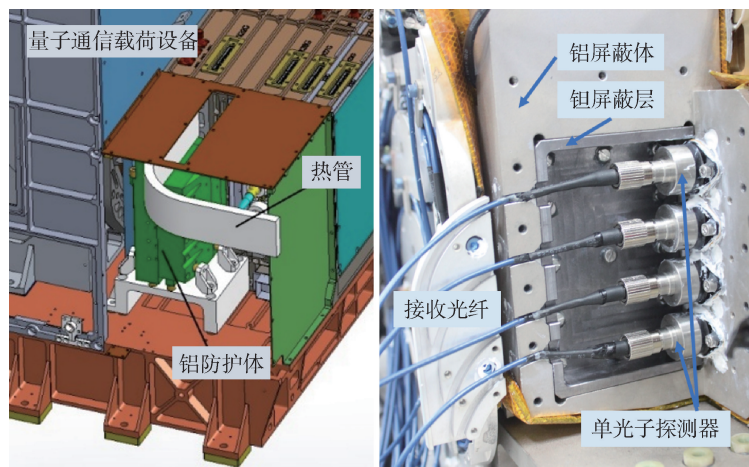


图4 “墨子号”量子卫星中的星载单光子探测器

动能力，指向角度根据卫星轨道位置与地面站位置计算出，指向精度优于 0.5° 。卫星配置两个光机载荷，分别基于二维指向镜形式与二维转台形式。基于二维指向镜的载荷在卫星姿态指向地面站1基础上，对地面站1进行粗跟踪与精跟踪。基于二维转台的载荷具备独立大范围对站指向能力，将载荷望远镜指向地面站2，再利用快速反射镜实现精跟踪。粗跟踪精度达到 0.005° ，精跟踪精度达到 0.00005° 。

3 空间光子通信

2021年6月11日，国家航天局公布了“天问一号”祝融号火星车拍摄的着陆点全景、火星地形地貌等影像图^[10]，如图7所示。随着我国首次火星探测任务的开展，航天器指令发送及收集到的各类观测数据、状态信息的实时回传对更可靠、性能更优越的测控通信技术提出了要求。但是，微波通信的性能在面向更远、更快的通信需求时显得日益窘迫(例如“天问”上搭载的高光谱、超光谱载荷所提供的高分辨率影像实时回传)，这为空间通信技术的发展指明了新的方向。

空间激光通信技术是利用激光束作为信息载体，实现两应用目标间通信的技术，由于其具有信道容量大、功耗低、体积小、抗扰能力强及无频谱使用限制等优势，近年来被广泛应用于同步轨道、中低轨道及深空卫星等通信任务中，是解决高速数传的有效途径^[11]。

自20世纪90年代起，空间激光通信技术进入了飞速发展的三十年。在欧洲航天局的SILEX系列激光通信实验中^[12]，简单、低成本的强度调制/直接探测(IM/DD)方式得到了广泛应用，即按照一定关系把信息比特映射到特定时间长度的光脉冲中，再利用光电探测器响应光辐射强度变化并直接输出相应的电压和电流来完成信息获取，这个过程只利用了激光的强度信息。在更远、信噪

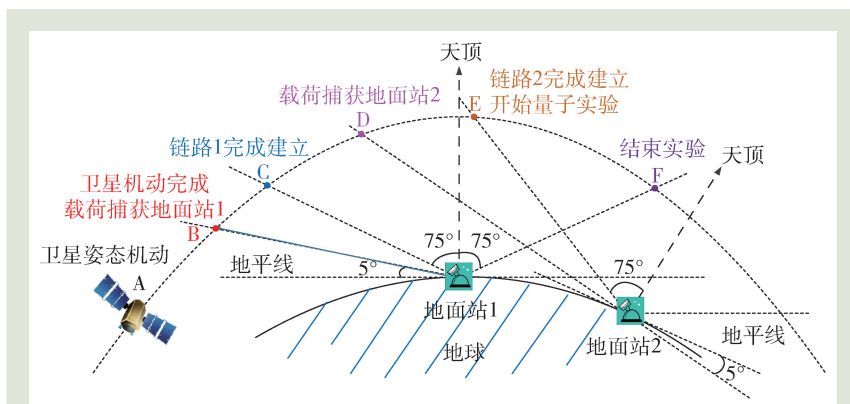


图5 星地光链路建立过程

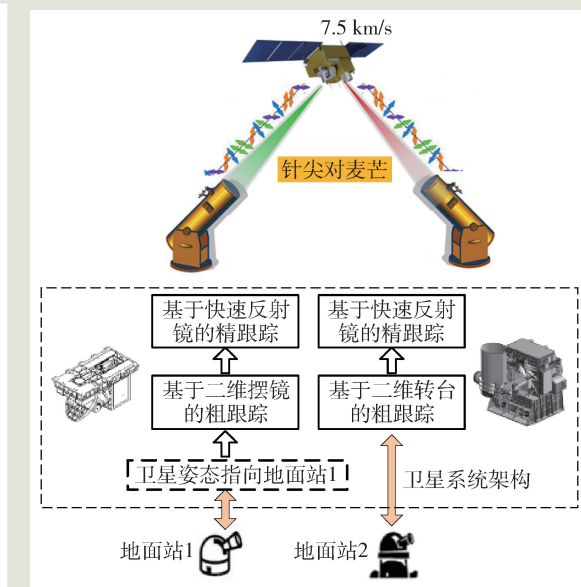


图6 星地高精度光路对准示意图

比更低的通信场景下，利用激光的相位信息实现通信的相干探测体制则更具优势。在发射端，信息被加载到光波的幅值、偏振或相位上，从而具有更高的接收灵敏度；接收端则利用本地振荡器产生的同频激光和接收信号光进行相干混频，再通过数字滤波恢复基带信号。2008年，在德国航空航天中心研制的5.625 Gbps相干激光通信终端LCT上，这一技术首次得到空间应用^[13]。

作为常规空间激光通信体制的两大代表，IM/DD与相干探测各有优势，但是在激光通信面向深空探测的应用中，它们仍存在不容忽视的短板。以月—地通信链路为例，在40万公里的距离下，按照典型星地终端参数计算得到的全链路通信光损耗达到 -90 dB以上。而直探体制一般接收

灵敏度在-33 dBm左右，意味着月地通信发射功率需要达到 57 dBm(500 W)，不具备可行性；相干体制的接收灵敏度虽然可以达到-46 dBm，对月发射功率 44 dBm(25 W)的可实现性仍然不高，此外接收系统易受大气湍流和多普勒频移效应等影响，存在锁频不稳定的因素。对比上述的两种方案，单光子通信体制将探测灵敏度提升了2—3个数量级，只需瓦级功率的激光器即可实现 Gbps 以上的通信速率，为面向深空的激光通信提供了一条可行之道。

单光子通信技术在深空通信中目前应用最成功的验证是 2013 年由美国 NASA 和 MIT Lincoln

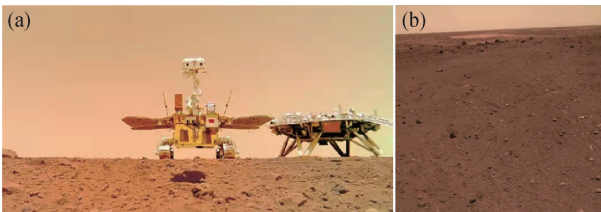


图7 “祝融号”火星车回传的图像 (a)着陆器—巡航器合影；(b)火星地形地貌



图8 美国月球激光通信演示试验

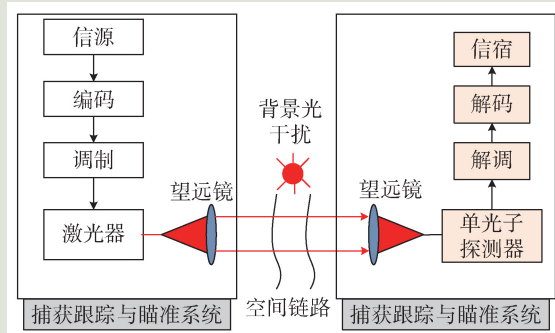


图9 空间光子通信系统示意图

实验室合作的月地激光通信演示实验(LLCD)^[14]，该实验创新性地应用了包括高峰值功率光纤发射机^[15]、高效的脉位调制(PPM)、级联 Turbo 纠错编码^[16]、超导纳米线阵列探测器^[17]及地面望远镜分集接收等一系列新技术，实现了月地链路上最大速率 622 Mbps 的下行数据传输，如图 8 所示。此外，将于几年后实施的美国 DSOC 计划^[18]和欧洲 DOCS 计划^[19]也将采用类似的方案，在小行星以及日地拉格朗日点等更远的深空链路下(0.25—2 A.U.，1 A.U.=1.496×10⁸ km)实现较高速(Mbps 量级)的激光通信。

图 9 为空间光子通信系统的组成示意图。和一般的激光通信系统类似，空间单光子通信系统包括发射终端与接收终端两部分，或者终端将发射与接收合为一体。发射端包含信源、编码、调制、激光光源、光学天线以及跟踪捕获装置，接收端包括接收光学天线、探测器、解调、解码、信宿以及跟踪捕获装置。最大区别在于接收端采用单光子探测器，能够响应相当弱的信号光脉冲(几个光子/脉冲)，因为主要面向深空等衰减巨大的链路，因此传输信道、调制编码方法与前者也存在一些差别。

光子通信中的主要技术难点体现在三个方面：一是背景光干扰，采用光子探测的激光通信极大地提高了探测灵敏度，但同时背景光的影响相比其他通信体制更严重；二是探测速率受限，受常规单光子探测器死时间限制，最大计数速率一般小于 50 M/s，为实现 Gbps 量级的通信速率，需研究提高通信速率的对策；三是超远距离光链路的捕获、跟踪与瞄准，近地卫星的捕获跟踪与瞄准策略将不再适合深空情景，需研究适合深空环境的跟瞄方案。

高效单光子调制技术：由于接收端的光子数量极为匮乏，很难恢复出光载波的相位、频率等信息，因此光子调制技术首先需要考虑的就是光子利用效率。一般常用的开关键控(OOK)方式功率利用率低(1 比特/脉冲)，且抗干扰能力较差，在超远距离链路下不适用，因而在光子通信中使用功率利用率高的脉冲位置调制(PPM)方案。PPM 调制将 n 位二进制数据映射到 2^n 个时段中

的某一个脉冲信号，图 10 为 4-PPM 与 OOK 的比较示意图，图中 4-PPM 将 2 位二进制数据映射到 4 个时隙位置中的不同位置，从而只需要一个光脉冲就可以传递 2 个比特的数据。此外联合偏振信息调制，还可以成倍提升系统的通信速率。

二进制信息比特	1001	0010	0001	1000	0110	1101
开关键控 (On-Off-Keying)						
二进制信息比特	00	11	10	01	10	00
二进制信息比特 脉位调制 (Pulse Position Modulation)						

图 10 强度调制方式比较：OOK 和 PPM

高效编解码技术：由于通信接收终端对于光子极其敏感，由月球等天体引起的背景噪声 (10^5 — 10^6 光子/秒) 无法忽视，光子泊松信道下的信号丢失、背景光干扰均会带来误码率提升，因此结合泊松信道，基于里德—所罗门奇偶校验码 (RS)、低密度奇偶校验码 (LDPC) 或 Turbo 卷积码与高阶脉位调制级联的串行级联调制编码及同步方案 (RS-PPM、LDPC-PPM 及 SCPPM)^[20] 在深空光子通信信道编码中得到了广泛应用。SCPPM 作为深空激光通信中性能优异的编码方案，与传统 Turbo 码在编码的内外层卷积码结构及译码的内外码概率信息迭代软判决上有着相似之处，区别在于交织器 (Interleaver) 和内码累加器以及解调作为一个内码整体进行译码，同时解决了突发错误、长码优势和解调三个问题。采用 SCPPM 编码可以实现优于 1 光子/比特的通信灵敏度，并达到优于 10^{-7} 的误码率。

高速单光子探测技术：光子通信对单光子探测的要求主要是光子分辨和探测速率，即具备识别同时到达光子数的能力，以充分利用信噪比剔除噪声影响，并且探测死时间足够小，能够满足目标通信速率要求。常规探测器诸如光电倍增管、硅基雪崩单光子探测器、超导纳米线探测器 (SNSPD) 等虽然性能各具优势，但都无法同时满足高计数率与光子数分辨要求，因此目前较有潜力的方法是采用多像元 SNSPD 阵列和基于光纤分束的盖革 APD 多路接收方法^[21]。

盖革模式 APD 反偏电压大于二极管的击穿电压。当光子被吸收产生一个电荷时，电荷倍增 (雪崩) 直到饱和，饱和电流一般由外部电路限制，电流可以自我维持。在 APD 能够响应后续光脉冲前，必须使偏置电压低于击穿电压来终止饱和和雪

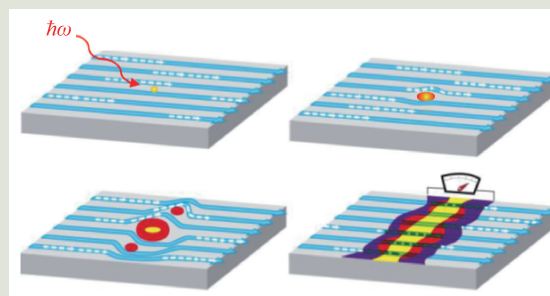


图 11 超导纳米线探测光子机理

崩电流。

超导纳米线探测器是一种新型单光子探测器 (图 11)，工作在稍低超导临界电流的状态；其吸收光子形成一个电阻态区域，通过检测这个电阻态即可以检测到入射光子利用低温超导体入射光子带来的电阻效应，具有高探测效率 (~90%)、高灵敏度，低噪声、死时间短 (~5 ns) 及小抖动的优点，多通道交错排列结构的纳米线阵列有望将通信速率提升至数 Gbps 的水平，应用潜力巨大。

4 总结

基于光学的通信技术已经在地面光纤网络中得到成熟应用，面向空间环境的量子通信成为当前国际研究热点。自从墨子最早记录光的直线传播与小孔成像以来，经过千年的沉寂，我国终于在空间量子信息技术方面引领世界，实现了多个国际首次的量子科学实验突破，也将光的极限探测技术提升到了新的台阶。光的极限探测技术不只用于空间量子通信中的密钥产生，还可用于直接传输信息，我们称为空间光子通信技术，其在月球探测中已经得到初步验证并将在未来更远距离深空探测中具有重要的应用前景。光极限探测技术在空间中的应用离不开单光子探测技术

的发展，同时也促进了单光子探测器的创新与技术提升，比如近年来发展迅速的超导纳米线探测器阵列就受到空间光通信应用的牵引。对光极限探测及应用技术的进一步深入研究无疑能够带动多项交叉技术的突破，促进人类科学文化的进步。

参考文献

[1] 谭戒甫. 墨经分类译注. 中华书局, 1981

[2] 吴强. 基础物理教程之四: 光学. 中国科学技术大学出版社, 1996

[3] 邓明富. 中学物理教学参考, 2005, 034(010): 60

[4] 吴青林, 刘云, 陈巍等. 物理学进展, 2010, 30(003): 296

[5] Wang J Y, Yang B, Liao S K *et al.* Nat. Photonics, 2013, 7: 387

[6] Liao S K, Cai W Q, Liu W Y *et al.* Nature, 2017, 549: 43

[7] Yin J, Cao Y, Li Y H *et al.* Science, 2017, 356: 1140

[8] Ren J G, Xu P, Yong H L *et al.* Nature, 2017, 549: 70

[9] Yang M, Xu F, Ren J G *et al.* Optics Express, 2019, 27: 36114

[10] 中国国家航天局官网: <http://www.cnsa.gov.cn/n6758823/n6758843/c6812026/content.html>

[11] 姜会林, 安岩等. 飞行器测控学报, 2015, 34(03): 207

[12] Sodnik Z, Lutz H, Furch B *et al.* Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2010, 7587(6): 4

[13] Gregory M *et al.* SPIE, 2011, 7923: 792303

[14] Boroson D M *et al.* Overview and Results of the Lunar Laser Communication Demonstration. Proc. SPIE 8971, Free-Space Laser Communication and Atmospheric Propagation XXVI, 89710S, 2014

[15] Edwards B L, Daddato R, Hamkins J *et al.* An Update on the CCSDS Optical Communications Working Group. International Conference on Space Optical Systems and Applications, 2017

[16] Moision B, Hamkins J. Coded Modulation for the Deep-Space Optical Channel: Serially Concatenated Pulse-Position Modulation. The Interplanetary Network Progress Report, 2005, 42-161: 1

[17] Shaw M D, Stern J A, Birnbaum K *et al.* Tungsten Silicide Superconducting Nanowire Arrays for the Lunar Laser OCTL Terminal. Conference on Lasers and Electro-Optics, 2013

[18] Wenkert D, Elkins-Tanton L T, Asphaug E I *et al.* Journey to a Metal World: Concept for a Discovery Mission to Psych. 45th Lunar and Planetary Science Conference, 2014

[19] Sodnik Z, Heese C, Arapoglou P *et al.* European Deep-space Optical Communication Program. Free-space Laser Communication and Atmospheric Propagation: Proc. SPIE, 2018

[20] Moision B, Hamkins J. Deep-space Optical Communications Downlink Budget: Modulation and Coding. Interplanetary Network Progress Report, 2003

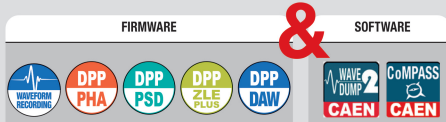
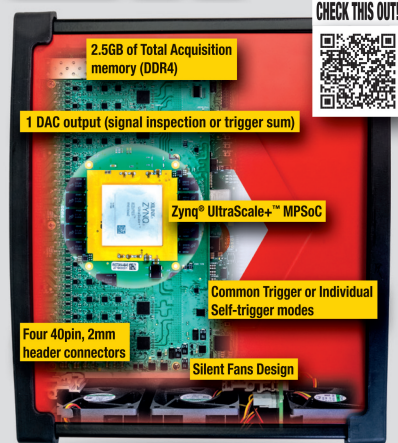
[21] Wen G H *et al.* IEEE Photonics Journal, 2021, 13: 7900310

新产品 DT2740/2745 64 通道 16-bit 125 MS/s 数字化仪

CAEN Electronic Instrumentation

DT2740/2745 是 CAEN 全新的数字化仪系列, 可实现原始波形记录或实时数字脉冲处理 (DPP)

- 16-bit 分辨率 125MS/s 采样率 ADC
- 64 通道, 单端或差分接口可选
- 模拟增益软件调节, 最高可达*100倍 (仅限DT2745)
- 原始波形记录或数字脉冲处理多种模式
- 可同时内置不同的 DPP 算法
- 内置开放式 FPGA 和嵌入式 ARM 处理器 (Linux)
- 提供多种接口类型: USB-3.0 和 1/10 GbE 或 CONET 光纤链路 (在同一插槽上更换)
- 可轻松加装侧面金属支架
- 静音风扇设计



CAEN and LabVIEW libraries available for custom developments.

官方授权代理商 (中国): 北京中检维康电子技术有限公司
www.phycover.com - 电话: 86-10-88026700 - 邮箱: info@phycover.com