学科前沿

SNSPD 助力我国首次实现 40 万千米地月高速激光通信

刘　豪，李　浩*

（中国科学院上海微系统与信息技术研究所 上海市超导集成电路技术重点实验室，上海 200050）

How SNSPD enabled China's first high-speed Earth-Moon laser communication across 400 000 kilometers

LIU Hao, LI Hao*

(Shanghai Key Laboratory of Superconductor Integrated Circuits Technology, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

当前，月球及深空探测已进入快速发展阶段。随着我国探月工程“绕、落、回”三步走战略的完成，载人登月及国际月球科研站建设被提上日程，月面高分辨率对地观测、月基空间科学研究等任务急需传输大量数据；而目前地月测控主要依赖 X/Ka 频段微波，受频谱资源和天线口径限制，传输速率长期维持在数 Mbps 量级。在这种情况下，下传一张 8K 分辨率的月面高清图像可能需要数分钟。因此，如何提升传输速率已成为深空测控通信领域的研究热点[1]。

空间激光通信以激光为信息载波，其波长较微波缩短了 3~5 个数量级，具备带宽大、方向性好、保密性强、终端轻量化等突出优点，被认为是突破深空通信瓶颈的有效途径[2]。然而，通信距离越远，技术难度越大：由于激光束散角极小，发射端的微小角度偏差到达数十万千米外的目标处即被放大为显著的位置偏差，因此实现捕获、跟踪与瞄准需要极高的指向精度；信号经超长距离空间传输后衰减极为严重，到达接收端时已降至单光子量级，在此类微弱信号条件下实现高速率传输，对探测器性能及信号处理算法均提出了严峻挑战。

2026 年 8 月，我国地月激光通信试验取得重大突破。依托中国科学院“地月空间远距离逆行轨道（distant retrograde orbit, DRO）探索研究”A 类战略性先导科技专项，中国首次在运行于远距离逆行轨道的 DRO-A 卫星与地面站之间成功建立了距离超过 40 万千米的地月高速激光通信[3]，上行与下行速率分别达到 1.25 Mbps 和 100 Mbps。下传一张 8K 分辨率的月面图像所需时间大幅缩短至约 12 s，传输速率提升了数十倍。这项研究成果由中国科学院空间应用工程与技术中心牵头，之江实验室承担星上激光通信载荷，中国科学院云南天文台提供地面望远镜设备，中国科学院上海微系统与信息技术研究所（以下简称上海微系统所）负责研制高速超导单光子阵列探测器。各单位协同攻关，共同攻克了深空极弱信号接收这一关键核心技术。

目前，全球深空激光通信竞争日益激烈。美国 NASA 于 2013 年开展了月球激光通信演示（lunar laser communication demonstration, LLCD），在月地之间成功实现了下行速率为 622 Mbps、上行速率为 20 Mbps 的通信，并采用超导纳米线单光子探测器（superconducting nanowire single-photon detector, SNSPD）阵列作为地面接收机[4]；2023—2025 年，美国 NASA 利用 Psyche 探测器开展的深空光通信（deep space optical communications, DSOC）演示，在数亿千米距离上实现了激光数据下行，最高

收稿日期：2026−09−09

通信作者：*lihao@mail.sim.ac.cn

速率达 267 Mbps, 累计回传数据超过 13.6 Tb; 其接收端采用的核心器件同样为 SNSPD 阵列[5-6]。

客观来说, 美国上述演示的下行速率指标仍高于我国开展的本次试验, 二者存在一定差距。但这一差距非但未削弱该工作的意义, 反而更加凸显其重要价值。其一, 我国此次实现了地月尺度的双向高速激光通信, 兼具上行注入与下行回传, 而美国 NASA 的 LLCD、DSOC 等演示偏重下行单向回传; 其二, 我国试验是在超过 40 万千米的真实深空链路中完成的, 对光束精准对准、极弱信号捕获、高速率传输等关键环节进行了系统验证, 实现了空间激光通信由近地向地月的跨越; 其三, 此次地月激光通信系统整体采用自主可控的技术体系, 高速阵列探测器等核心器件已实现国产化, 不依赖国外关键器件。因此, 本次突破不仅是一次成功的演示验证, 更标志着我国已具备自主开展深空高速光通信的能力, 可为载人登月、月球科研站及更远深空探测任务提供工程支撑。

地月高速激光通信链路固有的物理限制, 决定了其接收端需使用 SNSPD 来实现弱光探测。以 1550 nm 波长通信为例, 受星上激光器功率、发射束散角及地面接收望远镜口径等因素限制, 激光经过长达 40 万千米的传输后, 到达地面望远镜的光子数仅为单光子量级; 与此同时, 月球自身辐射及城市灯光等背景噪声也会进入接收视场。在信噪比较低的条件下, 传统强度探测方法已难以胜任, 需采用高阶脉冲位置调制(pulse position modulation, PPM)将信息编码至光子的到达时刻, 由单光子探测器逐光子接收, 并在皮秒级时间戳上完成时隙判决。因此, 探测器的光子探测效率与暗计数率成为制约通信距离和速率的关键参数。

传统半导体光电探测器, 如基于盖革模式(Geiger mode)在近红外波段进行单光子探测的雪崩光电二极管(avalanche photodiode, APD), 工程应用已十分成熟, 但在量子效率、时间抖动和计数率等核心参数上与 SNSPD 相比仍存在较大差距[7]。SNSPD 凭借超导纳米线的本征响应来探测单光子, 无需雪崩倍增过程即可实现超过 90% 的系统探测效率、cps 量级的低暗计数、小于 50 ps 的时间抖动以及 GHz 量级的计数率[8-10]。上述优异的综合性能优势使其成为在“每比特数个光子”的极端条件下实现百 Mbps 量级接收的理想选择, 也为地月激光通信在弱光信号条件下完成通信信号的接收与解析奠定了基础。

如图 1(a)所示, SNSPD 的核心结构由宽 50~100 nm、厚 5~10 nm 的超导纳米线(一般为 NbN 或 NbTiN 材料)构成, 并在衬底上形成尺寸为数十微米的光敏面。器件需置于 2~3 K 的低温环境中工作, 如图 1(b)所示。工作时, 纳米线处于超导态并被偏置至临界电流附近, 单个光子入射后, 在吸收点附近破坏局域超导性, 形成纳米尺度的热点, 使纳米线电阻发生急剧跃变, 进而在读出回路中产生纳秒级电压脉冲。该脉冲经外部常温放大器放大后, 示波器观测到的波形如图 1(c)所示。随着热量经衬底迅速耗散, 纳米线恢复超导态, 等待下一个光子的到来。可见, SNSPD 的功能实现依赖于超导体对单光子的本征响应, 无需雪崩倍增及复杂的淬灭电路, 因此具有高效率、低噪声和高速度的优势。

对于单脉冲入射光子数不足 1 的极弱信号探测, SNSPD 的高探测效率可显著提升系统信道裕度; 凭借低时间抖动特性, SNSPD 能够实现高阶 PPM 的时间判决, 从而在有限脉冲重复频率下通过增大调制阶数来提升系统的有效速率。同时, 依靠极低的暗计数并配合窄带滤波、时间门控等技术, 接收机即使在月光、城市灯光等强外部干扰下仍能有效分辨光子信号。采用空间并行与复用读出方式的多像素 SNSPD 阵列则可突破单像素计数速率极限, 为百 Mbps 量级乃至更高下行速率提供支持[5-6]。此外, 通信过程中激光单程传输时间约为 1.3 s, 在此期间卫星位移可达数千米, 需借助 SNSPD 的皮秒级时间分辨率来实现双向捕获、跟踪及精密时间同步。

上海微系统所是国内超导单光子探测领域的开拓者之一, 目前已形成涵盖超导薄膜制备、纳米器件结构设计、系统集成以及工程实用化的完整技术路线, 器件综合性能达到国际领先水平。在空间探测领域, 上海微系统所与中国科学院上海天文台合作, 于 2015 年将 SNSPD 应用于 532 nm 波段的卫星激光测距, 实现了毫米级测距精度[11]; 中国科学院云南天文台、南京大学等单位也采用近红外 SNSPD 开展了卫星激光测距研究[7], 进一步拓展了

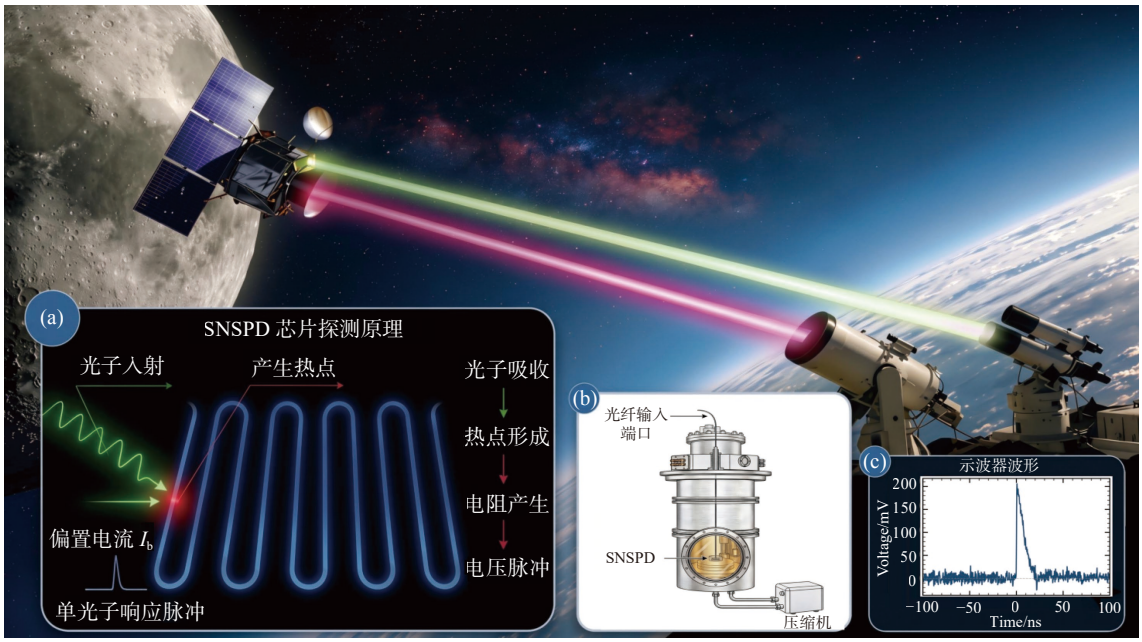

图 1　地月高速激光通信系统与 SNSPD 单光子探测原理示意图。(a)SNSPD 纳米线结构; (b)SNSPD 低温工作环境; (c)单光子探测输出电压脉冲波形

Fig. 1 Schematic diagrams of the high-speed Earth-Moon laser communication system and the single-photon detection principle of SNSPD. (a) SNSPD nanowire structure; (b) SNSPD low-temperature operating environment; (c) output voltage pulse waveform of single-photon detection

超导单光子探测技术在深空测距领域的应用范围。为满足深空应用需求，上海微系统所积极推动 SNSPD 从实验室研究向工程实用化转化，与中国科学院理化技术研究所合作开展了空间低温制冷技术研究，研制出适用于空间应用的 SNSPD 系统[12]，探测效率达到 93% 的世界领先水平[13]，突破了探测器深空工程化应用的技术壁垒。面对当前深空激光通信对探测器提出的更高要求，上海微系统所持续开展多通道并行与阵列化研究，于 2024 年研制出最高计数率达 5 GHz 的 64 像素阵列系统[14]，且目前正在开展更高计数率(10 GHz)的高速探测系统的研制，为后续地月光子通信速率的提升奠定硬件基础。

在此次地月激光通信试验中，作为超导单光子阵列探测器的研制单位，上海微系统所通过优化超导薄膜与纳米线制备工艺、改进阵列芯片结构与高速读出电路，攻克了超高灵敏度 SNSPD 阵列芯片研制、高速信号响应、弱光信号精准甄别与系统工程化集成等一系列核心难题，为下行 100 Mbps 通信速率的实现提供了器件支持，弥补了我国在地月深空极弱激光探测领域的技术短板。

地月高速激光通信链路的建立，为深空通信奠定了重要基础，但载人登月、月面科研及火星探测等深空任务对激光通信的可靠性与速率提出了更高要求，也对 SNSPD 带来了新的挑战。面向未来，需围绕以下 3 个方向开展研究：(1)在速率及通量方面持续改进 SNSPD 器件，使阵列规模达到百像素量级、电子读出部分实现低温运行、计数率达 10 GHz 量级；若采用更高阶 PPM 调制或更精细的时分复用方案，则需将器件的时间抖动降低至 10 ps 之下，并持续优化器件结构，通过阵列分流与门控偏置来避免高计数率引起的闩锁或误计数[15]；(2)面向卫星与深空平台的实际需求，研发基于更高工作温度超导材料的 SNSPD，实现空间低温制冷的轻量化与长寿命；(3)为实现高速激光通信系统的全天候组网，结合窄带滤波、时间门控、多站布局等技术，解决云遮挡或日光背景干扰问题。总体而言，探测器与信号处理逻辑的协同优化、器件轻量化与高度集成的工程应用，均是实现自主可控高性能超导单光子探测的可行方向。

目前，SNSPD 技术已从实验室极限探测能力研究，发展到完成 40 万千米地月激光通信链路的

工程验证。随着器件制备工艺、低温制冷技术及读出电路的不断迭代，SNSPD 探测器将持续为地月空间信息基础设施、载人登月实时通信及更远距离深空探测工程发挥重要作用。

参考文献：

[1] Hemmati H, Biswas A, Djordjevic I B. Deep-space optical communications: future perspectives and applications[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(11): 2020-2039.

[2] Sun Xiaoli, Skillman D R, Hoffman E D, et al. Free space laser communication experiments from Earth to the Lunar Reconnaissance Orbiter in lunar orbit[J]. Optics Express, 2013, 21(2): 1865-1871.

[3] 甘晓, 刘如楠. 我国首次在轨验证地月双向高速激光通信能力 [EB/OL]. (2026-08-27)[2026-09-02]. https://www.cas.cn/cm/202608/t20260827_5119120.shtml.

[4] Boroson D M, Robinson B S, Murphy D V, et al. Overview and results of the lunar laser communication demonstration[C]//Proceedings of SPIE, Free-Space Laser Communication and Atmospheric Propagation XXVI. San Francisco: SPIE, 2014, 8971: 89710S.

[5] Guardiani A, Vlot H, Locht L, et al. Superconducting nanowire single-photon detector array for ESA's ground laser receiver in collaboration with NASA/JPL for the Psyche deep-space optical communication demonstration[C]//International Conference on Space Optics (ICSO 2024). Antibes Juan-les-Pins: SPIE, 2025, 13699: 136991G.

[6] Hao Hao, Zhao Qingyuan, Huang Yanghui, et al. A compact multi-pixel superconducting nanowire single-photon detector array supporting gigabit space-to-ground communications[J]. Light: Science & Applications, 2024, 13: 25.

[7] Xue Li, Li Zhulian, Zhang Labao, et al. Satellite laser ranging using superconducting nanowire single-photon detectors at 1064 nm wavelength[J]. Optics Letters, 2016, 41(16): 3848-3851.

[8] Natarajan C M, Tanner M G, Hadfield R H. Superconducting nanowire single-photon detectors: physics and applications[J]. Superconductor Science and Technology, 2012, 25(6): 063001.

[9] You Lixing. Superconducting nanowire single-photon detectors for quantum information[J]. Nanophotonics, 2020, 9(9): 2673-2692.

[10] 陈敬学, 李浩. 高速超导纳米线单光子探测器研究进展 [J]. 功能材料与器件学报, 2025, 31(1): 1-10.
Chen Jingxue, Li Hao. Research progress of high speed superconducting nanowire single-photon detector[J]. Journal of Functional Materials and Devices, 2025, 31(1): 1-10.

[11] Li Hao, Chen Sijing, You Lixing, et al. Superconducting nanowire single photon detector at 532 nm and demonstration in satellite laser ranging[J]. Optics Express, 2016, 24(4): 3535-3542.

[12] You Lixing, Quan Jia, Wang Yong, et al. Superconducting nanowire single photon detection system for space applications[J]. Optics Express, 2018, 26(3): 2965-2971.

[13] Hu Peng, Ma Yuexue, Li Hao, et al. Superconducting single-photon detector with a system efficiency of 93% operated in a 2.4 K space-application-compatible cryocooler[J]. Superconductor Science and Technology, 2021, 34(7): 07LT01.

[14] Zhang Tianzhu, Huang Jia, Zhang Xingyu, et al. Superconducting single-photon detector with a speed of 5 GHz and a photon number resolution of 61[J]. Photonics Research, 2024, 12(6): 1328-1333.

[15] Knehr E, Kuzmin A, Doerner S, et al. Synchronous single-photon detection with self-resetting, GHz-gated superconducting NbN nanowires[J]. Applied Physics Letters, 2020, 117(13): 132602.