

空间光通信技术发展现状及趋势

鲁绍文¹, 侯 霞¹, 李国通², 孙建锋¹, 俞杭华¹, 陈卫标¹

(1.中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800;

2.中国科学院微小卫星创新研究院, 上海 201612)

摘要: 利用激光链路实现卫星星座内不同卫星节点之间的信息传输能够解决传统卫星通信技术中传输速率慢、频段资源紧张等问题。首先介绍空间激光通信技术的主要组成部分以及国内外研究现状; 其次, 对终端的高性能跟踪、快速捕获和高通量通信技术的难点以及主要解决方案分别进行重点说明; 最后, 阐述空间激光通信小型化、轻量化以及低功耗技术路线的发展趋势, 并对新型技术进行讨论, 为我国空间激光通信技术的发展提供参考。

关键词: 空间光通信; 瞄准捕获跟踪; 无信标光; 小型化、低功耗及轻量化

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2022019

Development Status and Trend of Space Optical Communication Technology

LU Shaowen¹, HOU Xia¹, LI Guotong², SUN Jianfeng¹, YU Hanghua¹, CHEN Weibiao¹

1. Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

2. Innovation Academy for Microsatellites of Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201612, China

Abstract: Based on the laser inter-satellite communication link to realize information transmission between different satellite nodes in satellite constellation, it can solve the problems of slow data rate and limited frequency resources in traditional satellite communication technology. Firstly, the main components of space laser communication technology and the research status at home and abroad were introduced. Then, the technical difficulties and main solutions of high-performance tracking, fast acquisition and high-throughput communication of the terminal were described respectively. Finally, the development trend of space laser communication miniaturization, lightweight and low power consumption technology were described, and the new technology was discussed, which provided relevant reference for the development of space laser communication technology.

Keywords: space optical communication, pointing acquisition and tracking, beaconless, miniaturization, low power consumption and lightweight

0 引言

相比于传统的微波通信技术, 空间激光通信以激光作为信息传输的载体, 具有通信容量大、功耗低、体积小和保密性高的特点, 成为国内外研究的重点^[1-3]。激光通信终端以卫星为搭载平台, 根据卫星所处轨道高度, 可将卫星分为低轨 (Low Earth Orbit, LEO) 卫星、中轨 (Medium Earth Orbit, MEO) 卫星和静止轨道 (Geostationary Earth Orbit, GEO) 卫星^[4-5]。在卫星平台广播的轨道、姿态信息的辅助下实现初始指向。轨道姿态预报精度以及在轨光轴

变化使得初始指向与真实指向之间存在偏差, 该偏差即为初始的不确定区域, 该不确定区域的大小在mrad量级。因此, 终端需按照一定的捕获策略对该不确定区域进行扫描覆盖, 进而实现双终端间激光链路的建立。

激光通信终端的发射增益与发散角有关, 发散角的减小将增加链路发射端的发射增益, 进而增强接收端接收到的光功率。当前终端设计发散角一般在十几到上百 μrad 量级, 卫星平台微振动导致的终端指向偏差抖动和终端发散角在同一量级, 因此终端需要设计瞄准捕获跟

踪 (Pointing Acquisition and Tracking, PAT) 闭环控制系统, 将光束指向跟踪误差抑制到终端发散角的1/10以内, 对应的指向误差损耗为0.4 dB^[6-7]。

在通信体制方面, 主要有强度调制 (Intensity Modulation, IM)、脉冲位置调制 (Pulse Position Modulation, PPM) 以及二进制相移键控调制 (Binary Phase Shift Keying Modulation, BIT/SK)^[8-9]。其中, 强度调制的发射端和接收端相对简单, 常应用在星间距离只有几千千米量级的星间激光链路中。PPM的特点是在给定的激光脉冲重复频率下, 用很小的平均光功率可以得到很高的数据传输效率, 因此在月地通信等深空通信领域得到了广泛的应用。基于相干探测的BIT/SK通信体制, 在具有接近散粒噪声极限通信灵敏度 (9光子/比特) 的同时^[10-11], 可抗背景光噪声的干扰。但是其接收端需要一个本振激光器和接收到的信号光进行相干探测, 接收系统的复杂度有所增加。该方式主要应用在对通信灵敏度有严格要求的上万千米级的星间光通信链路中。

随着激光通信技术的成熟, 目前在该领域技术研究的主要内容有:

- 激光通信终端在轨参数自主标校技术研究;
- 激光通信终端小型化、轻量化以及低功耗技术路线研究;
- 激光通信高速通信、测距以及钟差测量的一体化终端技术研究。

1 发展现状

1.1 国外研究现状

20世纪90年代, 欧洲宇航局 (ESA)、德国宇航局 (DLR)、美国宇航局 (NASA)、日本航空航天局 (JAXA) 等开始了大量的LEO与OGS、LEO与LEO、LEO与MEO, 甚至月球轨道卫星与OGS之间的激光通信实验。为了发展和验证星间光通信技术, 欧洲宇航局开始了SILEX激光通信计划。该计划中的激光通信终端可达到的最远通信距离为45 000 km, 最高通信速率为65 Mbit/s^[12-13]。2001年11月, 该计划成功实现了GEO与LEO卫星间的激光通信链路, 通信速率为50 Mbit/s, 对应的误码率为 8.9×10^{-9} 量级^[14]。在LCTSX激光通信项目的支持下, 由德国Tesat公司研发的相干激光通信终端搭载在TerraSAR-X卫星上发射升空。2008年2月实现了133 s 无误码的高速星间光通信, 通信速率为5.625 Gbit/s, 通信距离为3 800~4 900 km^[15]。据统计, 在2008年12月实现了20多次通信误码率小于 1×10^{-9} 的建链通信, 可维持的双向无误码率通信最长时间为516 s^[16]。LCTSX项目的成功, 促使ESA选择Tesat公司激光通信终端作为EDRS项目的有效激光载荷。第一个EDRS节点EDRS-A搭载

在Eutelsat 9B卫星上, 于2016年1月随质子号火箭发射升空。EDRS-A可提供速率为1.8 Gbit/s的双向激光通信链路, 该终端的功耗为160 W, 质量为56 kg^[17-18]。2013年10月, NASA成功开展了首次月球轨道卫星LADEE与OGS之间的双向激光通信实验LLCD。LLCD项目实现了最远距离40万千米的激光通信链路, 上行采用速率为10/20 Mbit/s的4PPM调制方式, 下行采用16PPM调制方式^[19]。

鉴于低轨卫星星座在通信、导航以及授时方面的巨大潜力, 美国航天企业SpaceX公司开始实施建造一个由4.2万颗卫星组成的巨型低轨卫星星座, 目前已有2 000多颗卫星在轨运行。值得注意的是, 在其2021年9月14日发射的第二个轨道层第一批51颗卫星中首次配备了激光通信终端, 并成为后续发射卫星的标配; 利用激光通信终端实现该卫星星座内任意卫星节点之间的高速数据交互。激光通信终端安装如图1所示。

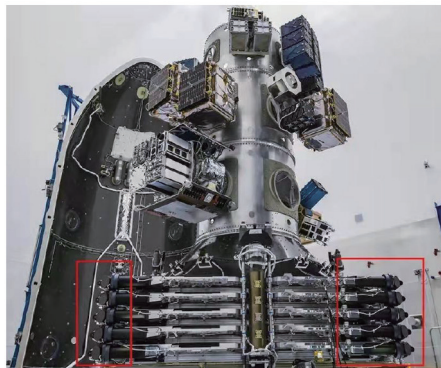


图1 激光通信终端安装

2009年, 由德国宇航局的前员工创立的Mynaric公司是一家航空航天通信网络先进激光通信技术的领先开发商和制造商。2013年11月, 其完成了高速运动机载平台下的激光通信试验。2018年2月, Mynaric与CEA-Leti研究机构在高灵敏度光电探测器技术方面建立合作关系, 使其终端在小型化、高可靠方面有了进一步提升。针对星载激光通信终端, 该公司已有CONDOR Mk2和CONDOR Mk3两款终端产品在售, 产品如图2所示。相对于单反射摆镜式的大范围指向CONDOR Mk2终端设计, CONDOR Mk3终端采用U型架式指向机构, 可覆盖半球空间。终端有效口径均为80 mm, 可实现双星间几千千米、速率为10 Gbit/s的双向激光通信。值得一提的是, 该终端采用在轨光轴自校准设计, 减小了终端在轨初期的标校难度并缩短了标校周期。

1.2 国内研究现状

考虑到激光通信技术在未来卫星通信网络中的应用

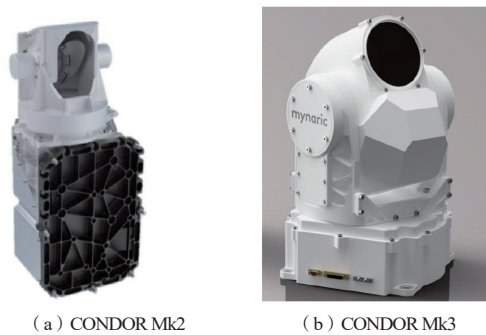


图2 Mynaric公司激光通信终端光学头
CONDOR Mk2和CONDOR Mk3

前景,我国加强了该技术领域的探索和建设。典型的研究机构包括哈尔滨工业大学、中国科学院上海光学精密机械研究所、中国科学院光电技术研究所、长春理工大学、航天科技集团等。卫星互联网被国家发改委划定为“新基建”之一,激光通信终端也被该领域科技人员认为是替代微波进行星间高速数据传输的最佳方式。2021年成立了中国卫星网络集团有限公司(以下简称“星网集团”),负责统筹中国卫星互联网的发展规划。星网集团也将激光通信技术纳入其星座通信链路建设中。

作为在终端小型化、轻量化方面的探索,由中国科学院上海光学精密机械研究所研制的无独立信标激光通信终端先后搭载在“XY-2”卫星和“GMS-β”卫星上发射升空,终端如图3所示。“XY-2”卫星激光通信终端采用一体化的设计,质量为7.5 kg,功耗为95 W。可实现星间3 000 km级、通信速率100 Mbit/s的双向激光通信。针对高速通信链路的需求“GMS-β”卫星激光通信终端采用了IM/DD的通信体制,接收端使用低噪声光纤放大器对耦合进光纤的信号光进行放大,放大后的光再进行光电探测以提升接收端的通信灵敏度;终端实现了-39 dBm@ 10 Gbit/s的通信灵敏度,设计口径为80 mm,可实现星间4 500 km级的双向激光通信。终端经过在轨初期的自检及光轴标校后,均实现了双星间稳定的通信链路。

中国航天科技集团公司五院西安分院研制的高通量激光通信终端采用QPSK高阶调制/相干探测的方案。该激光通信终端搭载在“实践二十”号卫星上于2020年1月4日到达目标地球静止轨道;随后开展了激光通信终端在轨自检及标校工作,成功实现了速率为10 Gbit/s的星地相干激光通信。这是我国当前在轨卫星激光通信的最高速率。中国航天科技集团公司五院西安分院“实践二十”号卫星激光通信终端如图4所示。

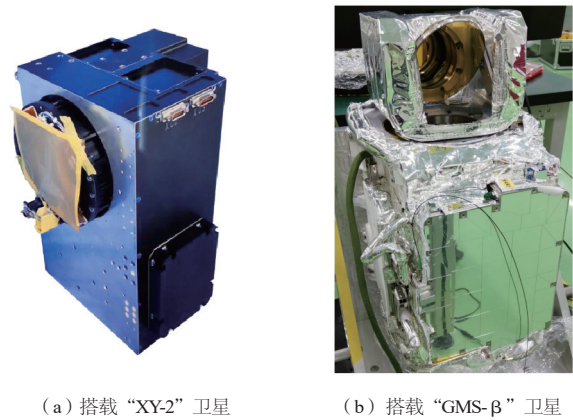


图3 搭载“XY-2”卫星和“GMS-β”卫星的激光通信终端



图4 “实践二十”号卫星激光通信终端

国内外终端技术方案对比见表1。

表1 国内外终端技术方案对比

体制	国家或地区			
	美国	欧洲	日本	中国
调制方式	OOK/PPM/DPSK	OOK/PPM/"BIT/SK"	OOK/PPM/DPSK/"BIT/SK"	OOK/PPM/DPSK/"BIT/SK"/QPSK
捕获方案	有信标光→无信标光	无信标光	有信标光→无信标光	有信标光→无信标光
粗指向机构	潜望式	潜望式	经纬仪式	潜望式
精跟踪机构	音圈电机	压电陶瓷	压电陶瓷	压电陶瓷

2 终端关键技术

2.1 高性能跟踪技术

终端在轨后影响链路性能的主要因素为搭载平台微振动导致的接收光功率起伏。不同的卫星平台由于其整星布局、星上载荷以及在轨环境的不同,对应的平台微振动功率谱分布及振动幅值也不尽相同。微振动源可分为卫星自身运动装置和外部环境干扰两大类。卫星自身

运动装置的干扰主要包括卫星反作用轮、卫星天线机械运动以及太阳翼驱动机构（Solar Array Drive Assembly, SADA）等。外部环境干扰引起卫星扰动的因素主要包括太阳辐射光压、卫星受热不均匀导致结构形变等。卫星自身运动装置的干扰是微振动源的主要分量。

NASA和ESA均利用振动测量装置对平台振动功率谱进行了在轨测量。图5为不同卫星平台在轨微振动特性测量的结果^[20-21]。不同卫星平台振动功率谱有如下两个主要特征：具有宽谱特性，高频可达2 kHz，对激光通信有影响的振动谱范围为100 Hz以内的分量；低频处的振动幅值大，高频处的振动幅值小。空间光通信领域内常以ESA谱和NASA谱作为输入激励，测量终端对平台微振动的抑制能力。两种谱对应的振动标准差（ 1σ ）分别为16 μrad 和48 μrad 。典型平台的振动功率谱分布如图5所示。

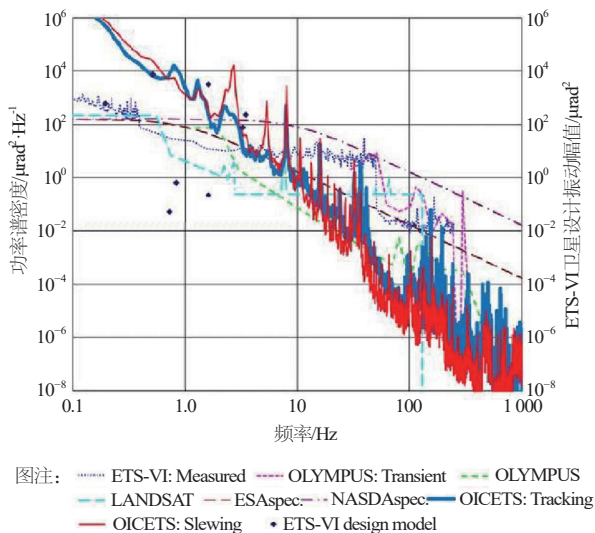


图5 典型平台的振动功率谱分布

为了抑制平台微振动的干扰，终端需具备基于光束稳定指向的闭环控制系统。图6为无信标终端方案下典型的闭环控制系统框图。

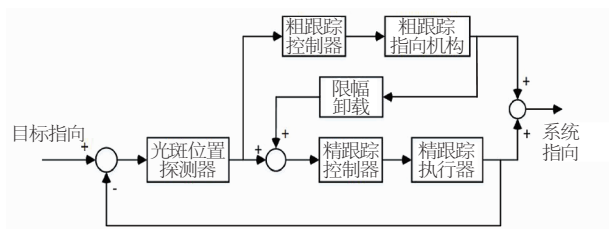


图6 无信标终端方案下典型的闭环控制系统框图

粗跟踪指向机构为低带宽、大转动范围的二维摆镜、万向节或者潜望式结构；精跟踪执行器为音圈电机

驱动或者压电陶瓷驱动的快速反射镜（Fast Steering Mirror, FSM）^[22-23]。终端对微振动的抑制能力主要取决于精跟踪控制环路性能。对于实现稳定的星间建链通信，一般要求精跟踪闭环控制-3 dB、带宽在100 Hz左右。

2.2 无信标光捕获方案

为了辅助实现星间双向快速捕获，最初的终端设计中常加入一个几百 μrad 发散角和几百mW功率的引导光源。在星间链路瞄准捕获跟踪阶段，终端互发引导光源根据探测到的引导光源光束位置实现初始的捕获，该引导光源称之为粗信标光。粗信标光的发散角高出信号光发散角一个量级，使得可以高效、快速地对目标不确定区域实现扫描覆盖。粗跟踪链路建立后的指向误差抖动控制在几十 μrad 量级。此时开启精跟踪信标光或者信号光进行通信光轴的双向捕获，继而实现稳定双向通信链路。

在有信标光的终端设计方案中，瞄准捕获跟踪流程复杂并且需要合理设置相应跟踪环节的切换条件，增加了终端瞄准捕获跟踪算法的复杂度。粗跟踪和精跟踪采用不同的激光器，在光学设计中采用不同的光学路径，导致在轨指向存在一定的变化，所以在轨也需要对粗精光轴进行二次标校。随着终端在轨标校技术的成熟，无信标光捕获方案设计逐步成为小型化、轻量化和低功耗（Minimize the Size, Weight, and Power, SWaP）终端设计中所采用的技术之一。终端在轨初期通过恒星标校、星间标校或者星地标校等方式对系统指向偏差进行标校，标校后的指向误差在百 μrad 量级。在无信标光捕获方案下，采用精跟踪执行机构的快速、小范围细扫描配合电机转动机构的慢速、大范围粗扫描实现高效率的复合扫描。精粗复合轴扫描图案如图7所示。

2.3 高通量通信技术

随着卫星互联网业务的增加，用户对于大容量通信卫星的需求越来越迫切。激光通信技术在高速率卫星通信方面较微波通信具有天然的优势。随着终端技术的成熟，设计的通信速率总体呈现急剧上升的趋势，当前终端最高速率在10 Gbit/s量级。采用的调制解调方式主要有OOK调制、PPM调制以及BIT/SK调制。随着高阶调制解调（QPSK、DQPSK、M-QAM等）以及光复用（偏振复用、波分复用等）技术的应用，激光通信终端将实现上百Gbit/s的通信速率。

2.4 关键部件技术

激光通信终端主要由光调制/解调单元、捕获跟踪单元以及相应的控制电子学单元组成。其中，影响激光通

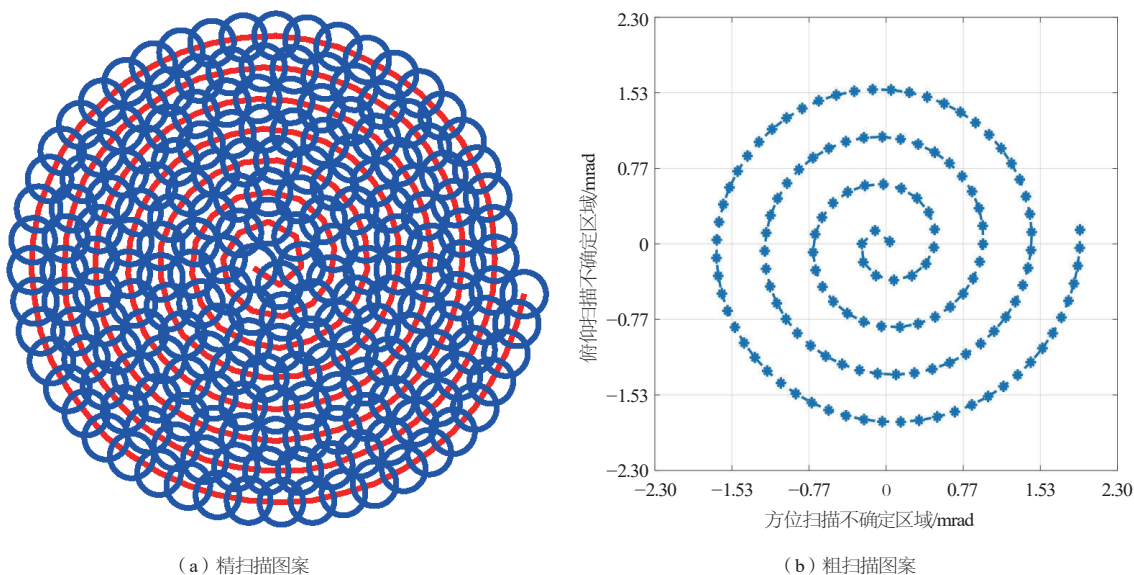


图7 精粗复合轴扫描图案

信终端性能及可靠性的主要有高性能光放大器、红外探测器以及高带宽高灵敏度光电探测器^[24]。

激光通信终端对出射光功率的要求为瓦级，因此需要采用放大器对毫瓦级的种子光进行放大输出。可采用掺铒光纤放大器（Erbium-Doped Fiber Amplifier, EDFA）或者半导体放大器（Semiconductor Optical Amplifier, SOA）进行放大。由于EDFA具有放大倍数高、光束质量好以及集成度高等优势而被广泛采用，其所有光学器件均采用单模保偏设计，从而保证较高的偏振消光比。EDFA的光电转换效率仅为10%左右，导致大部分电能以热的形式存在，因此放大器在轨长期的性能受到影响。

为实现在轨双向链路的建立，终端应具备光束位置探测单元。常用的位置探测器有四象限探测器（Quadrant Avalanche Photodetector, QAPD）和红外焦平面探测器。其中，QAPD具有位置读出速率高的优势，有利于提升终端对链路抖动的抑制能力，但由于其光敏面受限且受电子学放大噪声的影响，灵敏度无法进一步提升。红外焦平面探测器弥补了QAPD在光敏面以及灵敏度方面的限制，但其读出频率受限，一般在kHz量级。

雪崩光电探测器（Avalanche Photodetector, APD）和光电二极管（PIN管）是常用的通信探测器。APD探测器带宽与感光面尺寸成反比，常用于上百Mbit/s速率的通信探测。对于Gbit/s量级通信信号可用PIN管进行探测，但由于PIN管的响应度较APD小，可将信号光经低噪声放大器或者和本振光混频后再进行探测。通信探测器的噪声特性是决定终端通信性能的主要因素，研制出超高带

宽、超低噪声的光电探测器是一项挑战。

3 新型终端技术

激光通信终端由在轨演示转入业务运行，需要终端在轨后能快速地实现光轴标校和首次捕获，对激光通信终端的功能要求也有所增加。下一代激光通信终端新技术主要包含如下几项。

3.1 终端在轨自主标校技术

激光通信终端在轨后，需要进行的标校项主要有系统指向偏差、收发光轴一致性偏差以及跟踪点标校。引起系统指向偏差的主要因素为卫星发射主动段力学、在轨微重力及热形变所导致的终端基准镜与卫星本体坐标系之间安装矩阵系数的在轨发射变化。收发光轴一致性偏差以及跟踪点变化主要为终端内部光轴因主动段力学以及在轨热形变导致的偏差。

针对系统指向偏差的标校一般可采样星间标校、星地标校以及对恒星标校。其中相对简单且高效率的方式是采用恒星标校。在该种方式下，终端内部需要安装一个星敏，通过同时对4颗左右的恒星成像来确定终端自身在惯性系下的姿态。星敏姿态测量算法流程如图8所示。其优势在于星敏装在终端光轴附近且传输路径较短，使得在轨指向偏差缩小到上百 μrad 量级。

对于收发光轴一致性偏差以及跟踪点标校，可在终端上配备角锥，将发射光轴和接收光轴标校光源返回至自身的位置探测器上，位置探测器获取发射光轴和接收

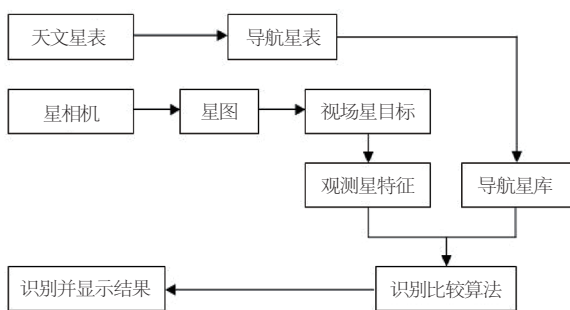


图8 星敏姿态测量算法流程

光轴之间的指向偏差。通过调整发射光轴指向实现收发光轴一致性及跟踪点的标校。标校精度主要取决于位置探测器对本地标校光斑质心计算的精度和指向调整机构的执行精度，一般可达到 μrad 量级。

3.2 小型化、轻量化以及低功耗技术路线

当前终端重量一般在十几至几十千克，对应的功耗在百瓦以上。为了实现激光通信终端SWaP设计以满足其对微小卫星平台的适应性，需对整体方案进行优化设计，可采用新技术路线实现终端的小型化。传统用于精跟踪的执行机构为快速反射镜（FSM），其重量在200 g以上。为了实现终端发射光轴的超前指向，超前指向机构一般也采用FSM机构，导致光束精细调制控制机构的重量在500 g以上，同时其驱动控制电路相对复杂，占用空间尺寸相对较大，不利于终端的SWaP设计，可采用压电微晶替代传统的FSM实现光轴的精细调整。其重量在10 g左右且控制相对简单。当前基于压电微晶的高精度光束指向调整技术正逐步走向工程应用。有望替代现有FSM机构，实现终端的小型化。压电快反镜和压电微晶如图9所示。

基于硅光芯片实现激光通信调制解调单元的模块化

有望成为终端SWaP的核心技术路线。该硅光技术将调制器、探测器、无源波导器件等集成在同一硅基衬底上，在减小终端尺寸的同时，也降低了终端的功耗。当前硅光芯片技术在工业领域已得到验证，相关指标可满足终端的使用要求，但应用于空间激光通信终端的硅光芯片尚处于研究阶段。这时主要考虑硅光芯片在空间真空及辐射环境下的可靠性问题。随着可靠性的提升，硅光芯片技术将在激光通信技术中得到大量的应用。

3.3 通信、测距及时差测量一体化技术

基于激光通信链路不仅能进行通信数据的双向传输，同时也可实现双终端间距离和终端参考时钟源之间的时差测量。2009年，俄罗斯在GLONASS-K导航卫星上搭载了测距通信激光通信终端，实现了5.5万千米双星间的测距通信，测距精度达到了3 cm^[25]。美国的LLCD激光通信项目中，激光通信终端也具备高精度的测距功能。当前，常用的测距方案有基于双向单程测量技术和基于多普勒技术两种。

在我国北斗三号卫星激光通信终端设计中采用了双向单程的星间测距方案，测量原理如图10所示。两个激光通信终端分别用A和B表示，终端安装在两颗不同的卫星上。双方约定秒脉冲的上升沿与帧同步头的最后一个比特的下降沿对齐，帧同步头最后一个比特发送后开始计时，记为 t_{SA} 和 t_{SB} ，当接收到秒内帧计数相同的帧同步头后停止计时，记为 t_{RA} 和 t_{RB} 。

A星从发送数据到接收到B星的时间差 T_A 以及B星从发送数据到接收到A星的时间差 T_B 分别为

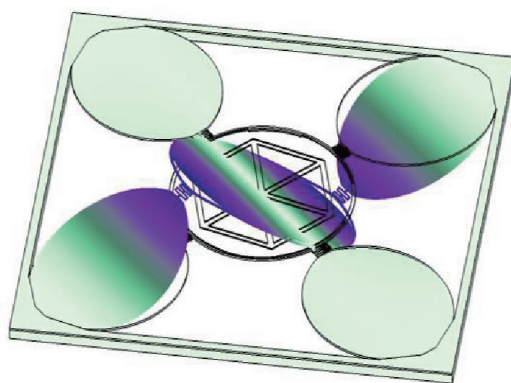
$$T_A = t_{RA} - t_{SA} = \Delta_t + T_{SB}(t) + S_2 + T_{RA}(t) \quad (1)$$

$$T_B = t_{RB} - t_{SB} = T_{SA}(t) + S_1 + T_{RB}(t) - \Delta_t \quad (2)$$

两星之间测距时间差为



(a) 压电快反镜



(b) 压电微晶

图9 压电快反镜和压电微晶

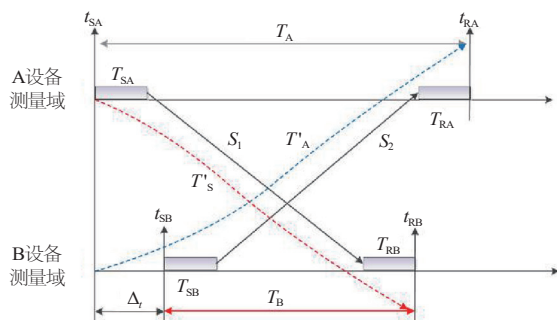


图10 双向单程测量原理

$$S = \frac{S_1 + S_2}{2} = \frac{T_A + T_B}{2} - \frac{T_{SA}(t) + T_{RA}(t) + T_{SB}(t) + T_{RB}(t)}{2} \quad (3)$$

两星之间相对钟差为

$$\Delta_t = \frac{T_A - T_B}{2} + \frac{(T_{SA}(t) - T_{RA}(t)) - (T_{SB}(t) - T_{RB}(t))}{2} + \frac{S_1 - S_2}{2} \quad (4)$$

两星之间的测距时间差 S 取决于两星测距数据的收发时间和 $(T_A、T_B)$ 以及各自的发射/接收时延之和 $(T_{SA}(t)+T_{RA}(t)、T_{SB}(t)+T_{RB}(t))$ 。两星之间的钟差 Δ_t 测量精度取决于两星测距数据的收发时间差 $(T_A、T_B)$ 以及各自的发射/接收时延之差 $(T_{SA}(t)-T_{RA}(t)、T_{SB}(t)-T_{RB}(t))$ 。终端的发射和接收时延差可在地面进行标定测量。在北斗星间激光通信终端技术中,实现了星间距离4万千米时3 mm的测距精度^[26]。

4 结束语

空间光通信技术是未来高速卫星通信网络的主要方式,国内外相关研究机构做了大量的验证试验。目前该技术已到业务化运行的阶段;同时在终端的小型化、低功耗以及轻量化设计方面不断迭代升级,终端在轨标校更加自主化。因此,其具有重要的应用前景。

参考文献：

- [1] LU S W, GAO M, YANG Y, et al. Inter-satellite laser communication system based on double Risley prisms beam steering[J]. Applied Optics, 2019, 58(27): 7517-7522.
- [2] 高铎端, 李天伦, 孙悦, 等. 空间激光通信最新进展与发展趋势[J]. 中国光学, 2018, 11(6): 901-913.
- GAO D R, LI T L, SUN Y, et al. Latest developments and trends of space laser communication[J]. Chinese Optics, 2018, 11(6): 901-913.
- [3] CAPLAN D O. Laser communication transmitter and receiver

design[M]. New York: Springer, 2007: 109-246.

- [4] 马晶, 韩琦琦, 谭立英, 等. 卫星光通信技术发展及其影响因素分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2004.
- MA J, HAN Q Q, TAN L Y, et al. Development of satellite optical communication technology and analysis of influencing factors[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2004.
- [5] 谭立英, 马晶, 黄波. 卫星光通信系统及其发展[J]. 电信科学, 1999, 15(1): 34-36.
- TAN L Y, MA J, HUANG B. Intersatellite optical communication system and its development[J]. Telecommunications Science, 1999, 15(1): 34-36.
- [6] TOYOSHIMA M, ARAKI K. In-orbit measurements of short term attitude and vibrational environment on the Engineering Test Satellite VI using laser communication equipment[J]. Optical Engineering, 2001, 40: 827-832.
- [7] 贺红雨, 孙建锋, 侯培培, 等. 精跟踪中基于声光偏转器的本振光章动探测角度误差方法[J]. 中国激光, 2018, 45(10): 218-224.
- HE H Y, SUN J F, HOU P P, et al. Angle error detection of local oscillator nutation based on acousto-optic deflector in fine tracking system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(10): 218-224.
- [8] SAKAMOTO T, CHIBA A, KANNO A, et al. Digital optical Costas loop for coherent demodulation of 10 Gbit/s BIT/SK[C]//Proceedings of OECC 2010 Technical Digest. Piscataway: IEEE Press, 2010: 766-767.
- [9] PANAHI A, KAZEMI A A. High speed laser communication network for satellite systems[C]//SPIE Defense, Security, and Sensing. Proc SPIE 8026, Photonic Applications for Aerospace, Transportation, and Harsh Environment II. [S.l.:s.n.], 2011, 8026: 153-164.
- [10] DERR F. Optical QPSK transmission system with novel digital receiver concept[J]. Electronics Letters, 1991, 27(23): 2177.
- [11] LU S W, ZHOU Y, ZHU F N, et al. Digital-analog hybrid optical phase-lock loop for optical quadrature phase-shift keying[J]. Chinese Optics Letters, 2020, 18(9).
- [12] OPPENHAUSER G, WITTIG M E. European SILEX project: concept, performance, status, and planning[C]//Proc SPIE 1218, Free-Space Laser Communication Technologies II. [S.l.:s.n.], 1990, 1218: 27-37.
- [13] TOLKER-NIELSEN T, OPPENHAUSER G. In-orbit test result of an operational optical intersatellite link between ARTEMIS and SPOT4, SILEX[C]//Proc SPIE 4635, Free-Space Laser Communication Technologies XIV. [S.l.:s.n.], 2002, 4635: 1-15.
- [14] TOLKER-NIELSEN T, OPPENHAUSER G. In-orbit test result of an operational optical intersatellite link between ARTEMIS

- and SPOT4, SILEX[C]//Proc SPIE 4635, Free-Space Laser Communication Technologies XIV. [S.l.:s.n.], 2002, 4635: 1-15.
- [15] SCHWANDER T, LANGE R, KäMPFNER H, et al. LCTSX: first on-orbit verification of a coherent optical link[C]//Proc SPIE 10568, International Conference on Space Optics — ICSO 2004. [S.l.:s.n.], 2018, 10568: 655-658.
- [16] FIELDS R, LUNDE C, WONG R, et al. NFIRE-to-TerraSAR-X laser communication results: satellite pointing, disturbances, and other attributes consistent with successful performance[C]//SPIE Defense, Security, and Sensing. Proc SPIE 7330, Sensors and Systems for Space Applications III. [S.l.:s.n.], 2009, 7330: 211-225.
- [17] PETERSSON G M, PERDIGUES J, SODNIK Z. Unmodified portable telescope for space-to-ground optical links[C]//Proceedings of 2019 IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-7.
- [18] SEEL S, KäMPFNER H, HEINE F, et al. Space to Ground bidirectional optical communication link at 5.6 Gbit/s and EDRS connectivity outlook[C]//Proceedings of 2011 Aerospace Conference. Piscataway: IEEE Press, 2011: 1-7.
- [19] BOROSON D M, ROBINSON B S, BURIANEK D A, et al. Overview and status of the lunar laser communications demonstration[C]//SPIE LASE. Proc SPIE 8246, Free-Space Laser Communication Technologies XXIV. [S.l.:s.n.], 2012, 8246: 69-78.
- [20] ARNON S, KOPEIKA N S. Laser satellite communication network-vibration effect and possible solutions[J]. Proceedings of the IEEE, 1997, 85(10): 1646-1661.
- [21] CHEN C C, GARDNER C S. Impact of random pointing and tracking errors on the design of coherent and incoherent optical intersatellite communication links[J]. IEEE Transactions on Communications, 1989, 37(3): 252-260.
- [22] GARCIA-TALAVERA M R, SODNIK Z, LOPEZ P, et al. Preliminary results of the in-orbit test of ARTEMIS with the Optical Ground Station[C]//Proc SPIE 4635, Free-Space Laser Communication Technologies XIV. [S.l.:s.n.], 2002, 4635: 38-49.
- [23] ROSE T S, JANSON S W, LALUMONDIERE S, et al. LEO to ground optical communications from a small satellite platform[C]//SPIE LASE. Proc SPIE 9354, Free-Space Laser Communication and Atmospheric Propagation XXVII. [S.l.:s.n.], 2015, 9354: 139-147.
- [24] 许楠, 刘立人, 刘德安, 等. 自由空间相干光通信技术及发展[J]. 激光与光电子学进展, 2007, 44(8): 44-51.
- XU N, LIU L R, LIU D A, et al. Technologies and recent progress of coherent optical communications in free space[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2007, 44(8): 44-51.
- [25] MAINE K P, ANDERSON P, LANGER J. Crosslinks for the next-generation GPS[C]//Proceedings of 2003 IEEE Aerospace Conference Proceedings (Cat. No.03TH8652). Piscataway: IEEE Press, 2003: 1589-1596.
- [26] ZHU F N, LU S W, SUN J F, et al. Inter-satellite laser-ranging based on intradyne coherent detection[J]. Applied Optics, 2021, 60(28): 8930.

[作者简介]

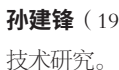


鲁绍文 (1989—), 男, 工程师, 主要研究方向为高速星间激光通信技术。

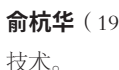


侯霞 (1975—), 研究员, 主要研究方向为空间激光载荷技术。

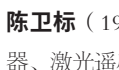
李国通 (1970—), 男, 中国科学院微小卫星创新研究院研究员, 博士生导师, 主要研究方向为卫星导航和卫星通信。



孙建锋 (1976—), 男, 研究员, 主要研究方向为空间激光载荷技术研究。



俞杭华 (1982—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为卫星通信技术。



陈卫标 (1969—), 男, 研究员, 主要研究方向为全固态激光器、激光遥感、激光通信技术。