

空间激光通信研究现状及发展趋势

付强¹, 姜会林^{1*}, 王晓曼², 刘智², 佟首峰¹, 张立中¹
(1. 长春理工大学空间光电技术研究所, 吉林 长春 130022;
2. 长春理工大学电子信息工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要:综述了空间激光通信的技术优势,总结了国外主要空间激光通信系统运行计划和相应的参数指标,重点介绍了空间激光通信技术在美国、欧洲、日本的研究现状,给出了激光通信的关键技术。指出了未来的空间激光通信技术不仅会使通信速率越来越高,其通信模式也会从点对点单一通信模式向中继转发和构建空间激光通信网络方向发展。最后对我国空间激光通信技术的发展作了简要介绍。

关键词:空间激光通信;数据传输;通信模式

中图分类号:TN929.12 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/CO.20120502.0116

Research status and development trend of space laser communication

FU Qiang¹, JIANG Hui-lin^{1*}, WANG Xiao-man², LIU Zhi², TONG Shou-feng¹, ZHANG Li-zhong¹

(1. *Institute of Space Photoelectric Technology, Changchun University
of Science and Technology, Changchun 130022, China;*
2. *School of Electronics and Information Engineering, Changchun University
of Science and Technology, Changchun 130022, China*)
** Corresponding author, E-mail: HLJiang@cust.edu.cn*

Abstract: This paper reviews the outstanding advantages of space laser communication and gives the operating plans of main foreign communication links and their technological parameters. It describes the present situation of space laser communication in the United States, Europe and Japan in detail, and explains the key technologies of space laser communication. It points out that the transmission speed of the laser communication will be faster and faster in future and the communicating model also can be changed from the points to points to the re-laying repeater and constructing space communication networks. Finally, this paper introduces the development of space laser communication briefly in China.

Key words: space laser communication; data transmission; communication mode

1 引言

空间激光通信经过多年探索取得了突破性进展,已成为解决微波通信瓶颈、构建天基宽带网、实现对地观测海量数据实时传输的有效手段,具有很大的民用和军用潜力。其优势主要体现在^[1]:

(1)光波频率高。其频率比微波频率高3~4个数量级,作为通信的载波有更宽的利用频带,可实现海量数据实时传输,对于地球科学研究、环境灾害监测、军事信息获取等应用意义重大。

(2)光波波长短。与微波相比其发射天线口径成倍减小,同时激光发散角小,能量高度集中,功率相对较低,使得通信终端在体积、重量和功耗方面都具有明显优势。该特点使得光通信终端易于搭载多种平台,实用化程度高。

(3)激光方向性好。它的发射光束极窄,使得激光通信具有高指向性,而且能够有效地提高

防窃听能力,使得对地观测数据传输具有极高的保密性。

(4)光波波段远离电磁波谱。空间激光通信抗干扰能力比空间微波通信强得多,在机场、战区等特殊环境下,仍能保证对地观测数据的顺畅传输。

(5)空间激光通信经过大气时,通过选择适宜的波长、采用多点布站、自动浮动阈值、自适应光学等措施可以有效减少气候及天气的影响。

因此,先进的空间激光通信将对信息时代,特别是数据海量传输技术的发展起到极大的促进和支撑作用。

2 国外空间激光通信研究现状

近年来空间激光通信的研究已成为热点,特别是美国、欧洲、日本等国家投入了大量的财力和技术力量^[2-4]。国外针对空间光通信链路的主要成功试验及计划情况见表1。

表1 国外主要空间光通信任务及参数指标统计表

Tab.1 Statistics of foreign space optical communication plans and parameters

序号	链路类型	系统名称	搭载终端	通信距离/km	国别(年)	通信光波长/nm	通信速率	误码率	备注
1		SILEX	低轨卫星 SPOT4 高轨卫星 ARTEMIS	40 000	ESA(法国) 2001年	797~853	50 Mbps	10^{-6}	同步静止轨道/低轨道
2	卫星间	LUCE	ARTEMIS 卫星 OICETS 卫星	45 000	日本,欧洲 2005年	发射847 接收819	接收 2.048 Mbps 发射 50 Mbps	10^{-7}	同步静止轨道/低轨道
3			美国 NFIRE 德国 TerraSAR-X	5 000	美国德国 2008年		5.6 Gbps		
4			同步静止轨道卫星 与低轨卫星		日本 JXAX 2013年		2.5 Gbps 10 Gbps(下一步)		计划
5	卫星对飞机	LOLA	ARTEMIS 卫星 神秘 20 飞机	38 000	法国 2006年	800	50 Mbps		首次成功的卫星与飞机通信试验
6		LCT	STRV2 低轨卫星	500~ 2 000	美国 2000年	通信 810 信标 852	155 Mbps~ 1.24 Gbps	10^{-6}	空间试验失败
7		LUCE	OICETS 卫星 NICT 地面站	600~ 1 500	日本 2006年	发射 847 接收 819	接收 2.048 Mbps 发射 50 Mbps	10^{-7}	首次低轨地面的双向激光通信试验
8	卫星对地面		ALPHASAT 卫星		ESA 2013年发射		2.8 Gbps		宽带数据中继传输计划
9		LLCD	月球对地		美国 NASA 2013年		622 Mbps		“月球大气和尘埃环境探测”计划
10		LCRD	中继卫星		美国 NASA 2016年		10 Gbps 深空低速率		激光通信系统中继计划
11	空对空	FALCON	飞机-飞机	90~132	美国 AFRL 2011年	1 545~ 1 555	2.5 Gbps	10^{-9}	

Table continued

序号	链路类型	系统名称	搭载终端	通信距离/km	国别(年)	通信光波长/nm	通信速率/Mbps	误码率	备注
12	空对地	TwinOtter	飞机- MIT 地面站	25(斜程)	美国 MIT 2009 年	1 550	2.66 Gbps		
13		LCT	飞艇-地面	64.15	德国 2005 年	800	50 Mbps		
14	通信 网络	TSAT	卫星组网		美国 2016		10~40 Gbps		转型通信卫星

2.1 欧洲

欧洲是空间激光通信技术的引领者,研究机构有欧空局(ESA)、Matra Marconi Space 公司和 Oerliken 公司等。其中 ESA 的卫星间激光通信(SILEX)系统和德国的 LCTSX 系统分别标志着空间激光通信发展的两个里程碑。

(1) SILEX 系统

ESA 从 1985 年开始实施 SILEX 计划,主要目的是在试验基础上验证卫星间激光通信的所有技术,SILEX 系统如图 1 所示。其中以数据中继卫星 ARTEMIS 为代表,其接收速率为 50 Mbps,波长为 847 nm 的非归零(NRZ)调制信号,然后调制到 Ka 波段将数据转发到 RF 地面站(Redu,比利时),其通信波长为 819 nm,可发射 2 Mbps 速率的脉冲位置调制(PPM)信号。

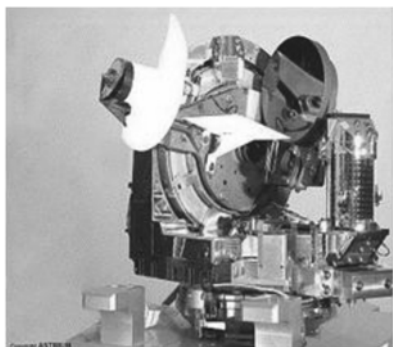


图1 SILEX 系统

Fig.1 SILEX System

2001 年 11 月 20 日,ESA 的 ARTEMIS 卫星上的激光通信终端 SILEX 与法国地面观测卫星 SPOT4 首次实现星际间激光通信单工链路试验,其通信波长为 800 nm,通信距离为 45 000 km,通信速率为 50 Mbps,误码率为 10^{-6} 。

2003 年 3 月至 2009 年,ESA 的 ARTEMIS 卫星上的激光通信终端 SILEX 与光学地面站

(OGS)做了大量试验。据统计,ARTEMIS 卫星与 OGS 之间做了 393 次双向链路试验,其中失败了 34 次,成功概率为 91.3%,链路保持的总时间为 78 h,OGS 系统如图 2 所示。



图2 OGS 系统

Fig.2 OGS system

2005 年 12 月,ESA 的 ARTEMIS 卫星上的激光通信终端 SILEX 与日本 OICETS 卫星的激光通信终端 LUCE 建立通信链路。通信波长为 800 nm,通信距离为 45 000 km,通信速率上行数据为 2 Mbps,下行数据为 50 Mbps。

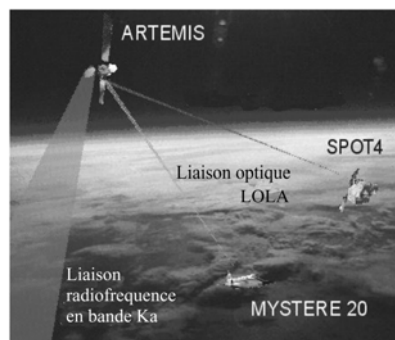


图3 ARTMIS 卫星上的激光通信终端 SILEX 建立的链路

Fig.3 Established link from laser communication terminal SILEX on satellite ARTEMIS

2006 年,法国的 LOLA 试验在 ARTEMIS 卫星和飞机之间展开,如图 3 所示。飞机搭载了 ELSA 终端,ELSA 终端是降低了重量和体积的 SILEX 简化版。在有湍流的大气条件下,激光链路成功地传输了视频和音频信号,信号采用了复杂的编码以处理大气的衰减和损耗。这次试验证明了强度调制/直接检测(IM/DD)方式可以在比较强的大气湍流条件下工作。

(2)LCTSX 通用型终端

德国的 TerraSAR-LCTSX 终端采用零差二进制相移键控(BPSK)相干探测技术,属于激光星际链路研究计划。TerraSAR-LCTSX 星载相干激光终端和搭载它的 TerraSAR-X 遥感卫星如图 4、图 5 所示。

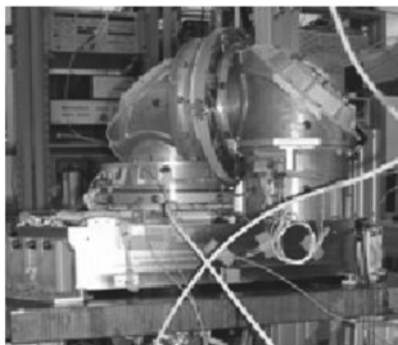


图 4 TerraSAR-LCTSX 星载相干激光终端

Fig.4 LCTSX laser coherent terminal borned on Terra-SAR



图 5 TerraSAR-X 遥感卫星以及其搭载的激光通信终端

Fig.5 Terra SAR-X remote sensing satellite and laser communication terminal

在 La Palma 和 Tenerife 两个岛屿之间进行了

自由空间 BPSK 相干光通信试验,其传输距离为 142 km,通信码速率为 5.6 Gbps,如图 6 所示。在

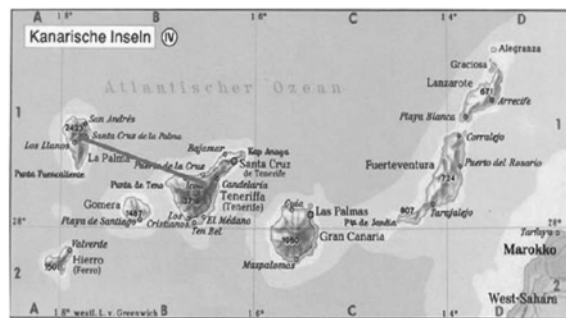


图 6 LCTSX 终端地面试验

Fig.6 Ground test of LCTSX terminal

TerraSAR-LCTSX 终端研发过程中,分析了星载相干激光对地通信系统中光发射机和光接收机在恶劣的天气条件下的通信性能。试验结果表明,零差 BPSK 光通信技术在大气信道中具有很好的性能。

搭载 LCTSX 终端的美国 NFIRE 卫星和德国 TerraSAR-X 卫星分别于 2007 年 4 月和 6 月发射成功。2008 年 3 月,NFIRE 卫星与 TerraSAR-X 卫星通过激光终端在相距 6 000 km 建立了激光数据传输链路,进行了空间宽带数据传输,实现了双向通信 5.6 Gbit/s 的超高速数据传输。在适当的天气条件下,链路可以建立。图 7 为这次星地链路试验的误码率。

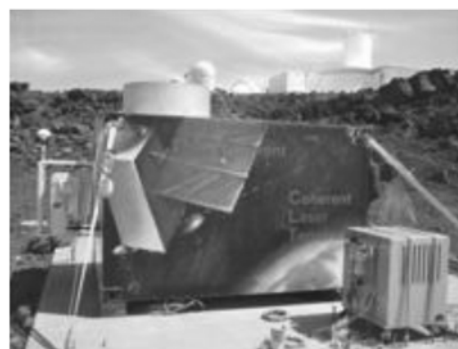


图 7 移动光学地面站

Fig.7 Mobile OGS

由上图可以看出,在通信过程中,由于大气的影 响,链路的误码率会突发性地跳动 5~6 个数量级。可见,大气信道对星地激光通信链路的影响

及通信误码率长期、稳定地保持是一个亟待解决的问题。

为了检验星地相干通信技术的可行性, TE-SAT 公司建造了移动光学地面站, 如图 8 所示。

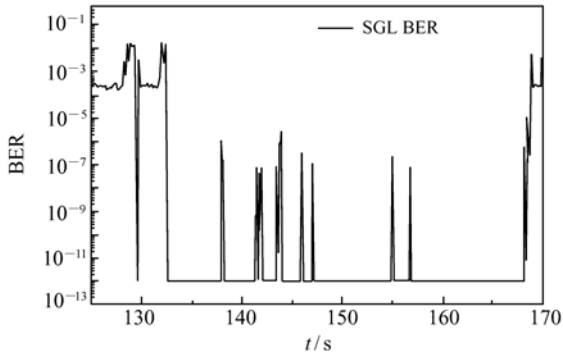


图 8 5.625 Gbps 星地相干链路试验误码率

Fig. 8 Error rate of coherent link test at 5.625 Gbps

2.2 美国

美国卫星光通信从 20 世纪 70 年代就开始了相关研究, 主要研究机构是美国宇航局 (NASA) 和美国空军研究实验室 (AFRL), 主要科研单位是加州理工大学喷气动力实验室 (JPL) 和麻省理工学院林肯实验室 (MIT)。还有 Thermo Trex 公司、Ball Aerospace 公司也进行了很多研究工作。以下介绍几个比较有代表性的研究成果:

(1) 激光通信演示系统

激光通信演示系统 (OCD) 由 NASA 支持的 JPL 于 1994 年研制成功, 目的是验证超远距离星地激光通信的可行性, 是一个基于实验室的演示

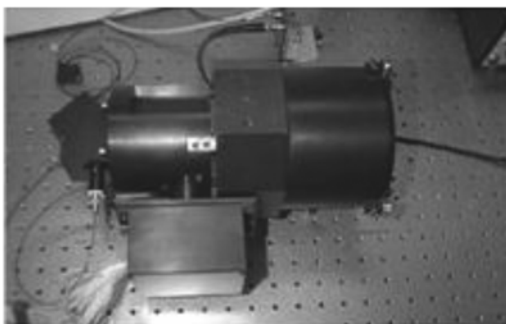


图 9 激光通信演示系统 (OCD)

Fig. 9 Laser communication demonstration system

系统, 如图 9 所示。OCD 的设计集中了当时很多先进的技术, 如光束获取、高带宽跟踪、精确光束

瞄准和前馈补偿等技术。设备包括一个直径为 10 cm 的光学天线、一个用于空间获取的 CCD 阵列、高带宽跟踪装置。数据率可达 250 Mbps, 通信波长为 0.8 μm , 采用开关键控 (OOK) 方式进行数据调制。

(2) STRV-2 试验

搭载在 STRV-2 上的激光通信终端 LCT 由美国弹道导弹防御组织 (BMDO) 支持研究, 目的在于演示低轨卫星 TSX-5 与地面站间的上行和下行激光通信, 验证卫星与地面间通信速率达到 Gbps 量级是否可行。

STRV-2 的通信单元采用直接调制半导体激光发射和雪崩光电二极管接收。捕获对准跟踪 (APT) 单元采用波长为 0.8 μm 的半导体激光作为信标光, CCD 探测器接收, 铯原子滤波器做背景光抑制。光学天线单元采用发射端和接收端相互分离的结构, 星载终端天线直径为 1.6 cm (发射) 和 13.7 cm (接收), 地面站终端天线直径为 30.5 cm (发射) 和 40.6 cm (接收)。STRV-2 系统采用了多个发射孔径, 其中星载终端 4 路, 地面站终端 12 路, 减少了大气闪烁的影响^[5]。

2.3 日本

日本是较早进行光通信研究的国家之一, 其研究发展迅速且取得了重大突破。日本于 1995 年与美国 JPL 一起实现了世界上首个星地光通信链路, 从而证明了星地光通信是可行的。其主要研究机构是邮电省的通信研究实验室 (CRL)、日本宇宙开发事业团 (NASDA)、日本电气公司 (NEC) 和东芝公司 (TOSHIBA)。

(1) 激光通信试验

日本的工程测试卫星 6 号 (ETS-VI) 上所搭载的 LCE 装置 (如图 10 所示) 实现了世界上首个星地激光链路。ETS-VI 于 1994 年 8 月发射升空, 由于推进火箭故障, 没有进入预定的地球同步轨道, 缩短了生命周期。但通过 CRL 和 NASA 的 JPL 合作, 进行了一些空间对地激光通信链路试验。LCE 项目主要完成了以下验证工作:

a) 实现了 APT 功能。在 1994 年 12 月至 1996 年 7 月期间实现了多次激光链路通信。

b) 完成了双向光通信试验。ETS-VI 和地面站之间采用强度调制、直接探测技术, 实现了上行

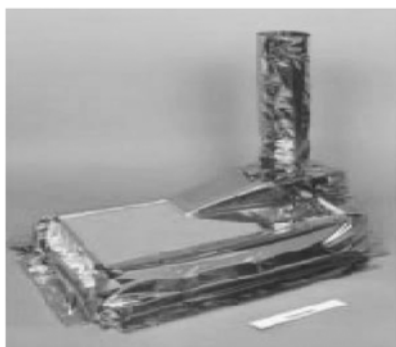


图10 ETS-VI激光通信终端

Fig. 10 ETS-VI laser communication terminal

(510 nm 波长氩离子激光)和下行(830 nm 波长, 13.5 mW 铝镓砷激光)链路。传输数据率为 1.024 Mbps,通信距离大于 40 000 km。卫星上收发天线直径为 7.5 cm,地面接收天线直径为 1.5 m,发射天线直径为 20 cm。

c)测量了上行和下行链路光束的传输特性。试验测量了 ETS-VI 星地光通信链路中大气湍流对接收光功率等通信参数的影响,包括不同时间段测量得到的上行链路和下行链路中接收光功率随时间的变化情况、不同时间段测量得到的上行链路和下行链路中接收到的功率谱密度随时间的变化情况。

d)测试了光学器件在空间中的工作特性。试验中对激光器、各种探测器等光学相关器件进行监测,并发现采用闭环方式较开环方式能更好地抑制跟瞄机械装置产生的振动影响。

(2)激光通信演示试验

日本在 1990 年建造了空间光学通信研发中

表 2 LCDE 参数指标

Tab. 2 Parameter indexes of LCDE

参数	指标
天线口径/cm	15
通信码速率/Gbps	2.5
调制方式	归零脉冲强度调制
地面天线口径/cm	10(发射),50(接收)
信标光波长/nm	680
通信波长(上行)/nm	1 562
通信波长(下行)/nm	1 552
上行功率/W	1
下行功率/W	0.4

心的光学地面设施,计划将此作为一个主要用于星地激光通信研究的固定地面站,该地面站系统配备了自适应光学装置^[6]。他们还在 2000 年研制出用于国际空间站(ISS)对地双向超高速激光通信终端 LCDE,安装在名为“希望号”的可装卸式实验舱 JEM 的实验平台上,主要参数如表 2 所示^[7]。

(3)OICETS 卫星激光通信终端

日本 NASDA 研制的 OICETS 卫星激光通信终端 LUCE 在 2005 年 8 月 23 日升空,进入高度为 610 km、倾斜为 97.8°的近地太阳同步轨道。该卫星的主要目的之一是试验 LEO 轨道到地面的激光信号传输特性,通信波长为 800 nm,试验分别与日本国家情报与通信技术研究所(NICT)和德国宇航中心(DLR)的光学地面站合作完成。2006 年 3 月和 5 月在 NICT 进行了卫星到地面的试验,3 月 28 日在地面站接收到下行链路的数据。在试验期间,光学链路成功地进行重复连接,地面站和 OICETS 可以有效地进行捕获和跟踪。2006 年 9 月 19 日,OICETS 最终接收到上行链路数据的误码率为 10^{-7} 。夜间进行了 18 次实验,每一终端的捕获和跟踪成功率约为 61%。在这次实验中,从 NICT 地面站开始发射信标光和信号光一直到系统进入初始捕获跟踪阶段,持续时间为 50 s,精瞄准传感器的功率在初始跟踪阶段处于饱和状态。OICETS 卫星对地激光通信链路如图 11 所示,激光通信终端 LUCE 如图 12 所示,德国 DLR 地面站如图 13 所示。

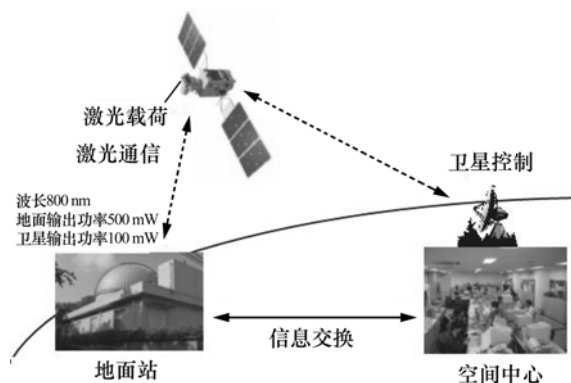


图 11 OICETS 卫星对地激光通信链路

Fig. 11 Laser communication links between satellite and ground

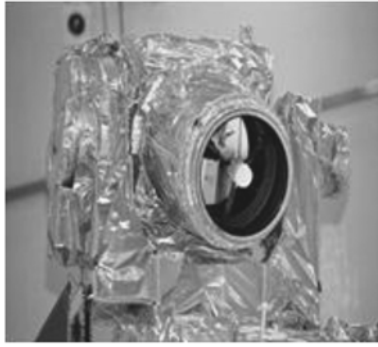


图12 LUCE 激光通信终端

Fig. 12 LUCE laser communication terminal



图13 德国 DLR 卫星地面站

Fig. 13 Germany DLR OGS

2006年6月,在DLR进行了卫星到地面的试验,KIODO实验是与德国DLR光学地面站共同完成的,6月间进行了8次夜间试验,在晴朗的天空下成功建立了光学链路。在试验过程中,进行了下行链路的BER测量,获得的地面站记录中最好BER为 10^{-6} 。试验结果表明,在强湍流条件下、大气信号衰减很大,接收光斑抖动较为严重,光斑宽展对通信和跟瞄性能影响很大,需要采用有效措施加以解决,提高激光传输性能^[8-9]。

3 空间激光通信关键技术

3.1 高功率、高速率激光调制发射技术

高功率、高速率激光调制发射系统由激光器、调制器、驱动器、温度控制、功率控制、光放大器、光学天线和信道编码部分组成,同时采用电子学滤波、光学滤波、自适应滤波技术来提高信噪比。

3.2 高灵敏度、复杂环境下的光信号接收技术

激光接收方式主要有直接探测和相干探测。直接探测是目前空间激光通信系统最常用的形式,技术比较成熟;但是该探测方式的探测灵敏度取决于器件性能,通信速率升高,探测器灵敏度随之下降。在相同通信条件下,相干探测可以提高光接收机灵敏度10~20 dB,但要求信号光与本振光具有良好的相干性、频率稳定性及精确的空间光场匹配能力,这种探测方式涉及的系统复杂,实现难度大,是目前国际上的研究热点。

3.3 高精度APT技术

为实现高精度动态跟踪,通常采用粗精复合轴APT技术。粗跟踪具有较大的视场、较低的伺服带宽,主要用于实现快速捕获和稳定粗跟踪,使信标光斑可靠进入精跟踪视场;精跟踪具有较小的动态范围、较高的伺服带宽和高跟踪精度,可进一步有效抑制粗跟踪残差。复合轴APT分系统的最终跟踪精度主要取决于精跟踪伺服单元性能。

3.4 发射接收光学系统及基台技术

光端机发射接收光学系统和基台是实现通信的重要装置,是空间激光通信的核心部分,需要对光学系统多功能、集成化设计,光学基台小型化、轻量化设计,消杂光设计,高精密装调设计等技术问题进行研究。

3.5 大气信道对激光通信影响的抑制技术

大气对激光传输产生光强闪烁、波前畸变等影响,从而影响激光通信距离、误码率等工作性能。它对通信子系统、APT子系统、光子子系统等所有子系统设计方案的确定都产生非常大的影响。因此,采用合适的地面站选址、多点布站、增加接收天线面积、多孔径发射、自适应光学技术等抑制大气信道对激光通信的影响,对实现大气信道激光通信具有非常重要的意义。

4 空间激光通信发展趋势

通过近30年的理论研究、仿真模拟、关键技术攻关、原理样机研制、地面演示验证和多个链路的在轨试验,空间激光通信领域呈现出以下两个技术发展趋势:

(1)通信速率越来越高。20 世纪 90 年代末在空间激光通信发展初期,主要以快速捕获和高精度跟踪(APT)等关键技术的研究为主,所以初期成功演示验证的激光通信系统的速率仅有 2、50 和 622 Mbps;随着 APT 技术的突破,人们将研究的重心放在提高通信性能指标上。为了克服高速率与灵敏度、发射功率、远通信距离等参数的矛盾,先后研制成功 1 550 nm 波段的通信分系统(它可同时实现高速率调制和高功率发射,主要

通过提高发射功率来补偿高速率所带来的灵敏度下降)和空间相干激光通信分系统(利用相干通信的灵敏度比传统 IM/DD 探测方式高 10 ~ 20 dB 的特点),使空间激光通信的传输速率达到 Gbps 量级(见表 3)。国外制定的未来 5 ~ 10 年空间激光通信计划中,其通信速率须达到 5 ~ 40 Gbps,根据链路不同,可满足高分辨率、海量数据的实时传输要求。

表 3 激光通信系统传输速率的验证

Tab. 3 Demonstration of transmission rates for laser communication systems

终端名称	ARTEMIS	SPOT OICETS	OCS LOLA	TerraSAR-X NFIRE
接收速率	50 Mbps	2 Mbps	2 Mbps	5.6 Gbps
发射速率	2 Mbps	50 Mbps	50 Mbps	5.6 Gbps
链路距离/km	< 45 000	< 45 000	< 45 000	< 6 000
终端重量/kg	160	150	18 000	35
		170	50	35
发射时间	2001. 7	1998. 3	2000. 9	2007. 6
		2005. 8	2006. 10	2007. 4

高速率空间激光通信主要的技术难点有两个方面:

①大气信道影响

激光经过复杂大气信道时,由于大气折射率的随机起伏,使接收面上光波的振幅及相位随机起伏,从而使接收到的光强发生随机起伏,使接收信号出现光斑漂移、光束扩展和像点抖动等效应,导致激光通信系统通信性能的降低。所以如何抑制大气信道影响是一个必须突破的技术难点。

②激光发射接收系统

由于技术和器件的限制,窄线宽、高功率、高速率的激光调制发射系统的研制,高速率、低信噪比的微弱信号探测与解调接收系统的研制是另一个技术难点。

(2)从点对点通信向光通信组网迈进。随着空间激光通信系统性能的不提高,空间激光通信逐渐从当前的点对点单一模式,向中继转发和构建空间激光通信网络方向快速发展。考虑天、空、地立体覆盖和信息传输的实时性,迫切需要将由同步静止轨道、中轨道、低轨道(GEO、MEO、LEO)卫星,航天飞机,宇宙飞船,浮空平台,航空平台,

地面平台连接在一起,形成天基信息网络。当前已经成功开展的在轨激光通信演示试验仍然是点对点工作模式,而在美国、日本、欧空局未来的空间激光通信规划中,已将构建空天信息网确立为主要研究内容。例如:美国计划于 2016 年实施 TSAT 计划^[10],向全球部署部队提供具有高带宽的卫星通信能力,类似于因特网的通信系统。该

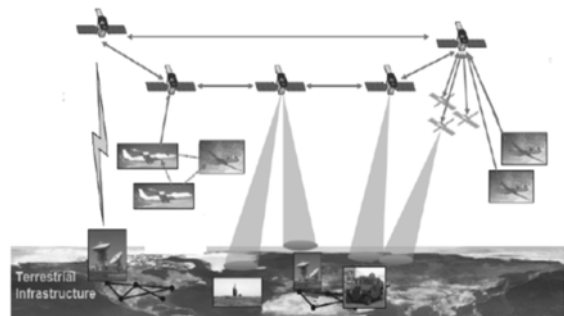


图 14 美国 TSAT 高速信息传输空间激光通信组网示意图

Fig. 14 Diagram of American TSAT network for high-speed information transmission of laser space communication

组网包括星地通信、星星通信、星船通信等,如图14所示。其中高速率的激光通信是重要的通信手段,通信速率预计可达到10~40 Gbps。该计划在2009年因经费问题被暂停,但在2011年又开始启动,目标是在2015年将卫星发射入轨进行一年的演示。

激光通信组网主要的技术难点有三个方面:

①一点对多点通信的光学原理。要实现多颗卫星间激光通信组网,必须首先实现一颗卫星上的通信光端机能够同时与多颗卫星多个光端机同时互联互通,而目前所有的空间激光通信都是一点对一点的,提出新的光学原理是第一个必须突破的技术难点,也是最主要的技术难点。

②多点通信的捕获对准跟踪(APT)技术。对于不同轨道、不同方向的多个通信光端机同时达到ATP精度,这是激光通信的新问题,也是必须

突破的又一个技术难点。

③一点对多点的激光发射接收技术。对于通信接收组件,不仅要继续解决地对比度高、抗干扰背景光等技术问题,而且还要解决多点接收信息的探测处理等方面。

5 我国空间激光通信的发展简况

目前我国已经在空间激光通信领域取得了一定成果,这些研究主要是针对某一特定问题而展开的,从不同的角度研究激光通信。表4是国内各研究单位在激光通信方面的研究方向。

我国空间激光通信事业应该把握住时机,加大力度突破关键技术,深入开展激光通信系统及应用研究,为我国早日实现天、空、地一体化激光通信和信息组网奠定技术基础。

表4 国内在空间激光通信方面的研究单位和研究方向

Tab.4 Research directions of space laser communication for domestic research institutes

研究单位	研究方向
长春理工大学	空地激光通信及组网
哈尔滨工业大学	星际及星地激光通信
成都电子科技大学	激光通信系统理论与系统研究
武汉大学	静态激光通信
华中科技大学	对潜激光通信
航天504所	空间激光通信总体研究及地面检测
中科院安徽光机所	激光大气传输特性
中科院上海光机所	激光通信测试系统
中科院成都光电所	自适应激光通信
中电集团34所	大气静态激光通信
中电集团27所	空间激光通信用激光器及关键技术
兵器集团209研究所	战术激光通信

参考文献:

- [1] 李英超,胡源,赵义武,等.发展空间激光通信,提高对地观测效能[J].长春理工大学学报(自然科学版),2011,34(1):1-4.
LI Y CH, HU Y, ZHAO Y W, et al. . Developing space laser communication improve the earth obervation performance[J]. *J. Changchun University Sci. Technol. (Natural Science Edition)*, 2011, 34(1):1-4. (in Chinese)
- [2] Trends in laser communications in space. Report on International Workshop "GOLCE2010" [R/OL]. (2010-10-10) [2011-11-11]. <http://satcom.jp/70/conferencereportsj.pdf>.
- [3] TOYOSHIMA M. Trends of research and development of optical space communications technology [R/OL]. (2006-09-15) [2011-11-11]. <http://www2.nict.go.jp/g/g560/suzuki/SJR/English/e-44/repote2.pdf>.
- [4] HEMMATI H. Laser communication component technologies; database; status and trends [J]. *SPIE*, 1996, 2699:310-314.

- [5] 张诚,胡薇薇,徐安士. 星地光通信发展状况与趋势[J]. 中兴通讯技术,2006(2):52-56.
ZHANG CH,HU W W,XU A SH. Status and trends of satellite-to-earth optical communications[J]. *ZTE Communications*,2006(2):52-56. (in Chinese)
- [6] 李晓峰. 星地激光通信链路原理与技术[M]. 北京:国防工业出版社,2007.
LI X F. *Theory and Technology on the Satellite-to-ground Laser Communication Links*[M]. Beijing:National Defense Industry Press,2007. (in Chinese)
- [7] 野田艳子,邵毅. 在空间站上进行光通信实验研究[J]. 激光与光电子学进展,2002,39(1):15-19.
YE TIAN Y Z,SHAO Y. Study on optical communication experiment on the space station[J]. *Laser Optoelectronics Progress*,2002,39(1):15-19. (in Chinese)
- [8] 左海成. 大气湍流影响下卫星光通信探测光斑分布与定位算法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010.
ZUO H CH. Study on detection spot distribution and localization algorithm on optical satellite communication[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology,2010.
- [9] 幺周石. 相干激光空间数据传输系统及其多阶波前校正研究[D]. 成都:电子科技大学,2010.
YAO ZH SH. Coherent data transfer system and multi-order wavefront correction[D]. Chengdu:University of Electronic Science and Technology,2010.
- [10] TOYOSHIMA M,YAMAKAWA S,YAMAWAKI T, *et al.* . Ground-to-Satellite optical link test between Japanese laser communications terminal and European geostationary satellite ARTEMIS[J]. *SPIE*,2004,5338:1-15.

作者简介:付 强(1984—),男,吉林长春人,博士,主要从事激光大气传输特性及激光通信方面的研究。

E-mail: strich@sina.com

姜会林(1945—),男,辽宁辽中人,教授,博士生导师,主要从事激光通信、光学仪器设计等方面的研究。

E-mail: HLJiang@cust.edu.cn