

空间激光通信发展概述

吴从均^{1,2}, 颜昌翔^{1*}, 高志良¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:介绍了激光通信的基本过程和链路类型。着重调研了欧洲空间局、美国、德国、日本以及国内激光通信的最新发展概况,给出了一些已成功应用的激光通信终端的详尽技术参数,如通信波长、通信距离、通信速度误码率、应用目的等,突出了每一种仪器的特点和优势,并对其光机结构进行了详细分析和展示。通过分析国内外的研究状况,指出激光通信面临的关键技术问题,以及未来激光通信发展的趋势和方向,为激光通信设备及其相关领域的研究提供了一定的参考。

关键词:激光通信;空间激光通信;通信终端;通信设备

中图分类号:TN929.12 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/CO.20130605.0670

Overview of space laser communications

WU Cong-jun^{1,2}, YAN Chang-xiang^{1*}, GAO Zhi-liang¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

* *Corresponding author, E-mail: yanxcx@ciomp.ac.cn*

Abstract: This paper describes the basic process of laser communications and their link types firstly. Then, it focuses on the latest developments of the laser communications in the European Space Agency (ESA), the United States, Germany, Japan, and domestic laser communication research, and also gives detailed technical parameters of some successful applications for the laser communication terminals in space, such as laser wavelengths, communication distances, communication speeds, bit error rates, and application purposes. It highlights the characteristics and advantages of each instrument in opto-mechanical structure, points out the key technical problems faced by the laser communications, as well as the future development of laser communication trends and directions through the analysis of the research status at home and abroad, which will provide a reference for the study of laser communication equipment and its related fields.

Key words: laser communication; space laser communication; communication terminal; communication equipment

1 引言

随着空间遥感技术的发展,相机的空间分辨率、光谱仪器的空间和光谱分辨率都在大幅度提高,而各项指标提高的同时,大量的空间探测数据需要实时地传到地面,供给技术人员和专家分析、提炼,实现空间仪器的应用价值。目前卫星上常用的微波带宽约为百兆级别,G比特带宽的应用已经接近微波通信的极限^[1]。和微波通讯相比较,由于激光频率约为微波频率的千万倍,例如常用的通信微波 C、Ku、Ka 波段波长都在厘米量级,而激光波长在微米量级(1.55 μm),因此,激光在通信中的带宽还可以大大拓展。激光已成功应用于光纤通信中,如 40 G/s 的光通信已经实用化;采用铒掺杂光纤放大器(Erbium-doped Fiber Amplifier, EDFA)等光放大技术还可实现更高传输速率;地面百兆级别通信系统已经商业化;5.65 G/s 的空间激光通信系统已经演示验证成功;几十吉比特率的空间激光通信系统正处于研究和规划中,但是目前受制于探测器件和技术等因素,其带宽优势还没有充分发挥出来。

激光通信除了具有容量大的特点外,还具有光学增益大,发散角小,强抗干扰和抗截获能力等优势,此外激光通信系统体积小、质量轻、功耗低也是空间应用的巨大优势。然而空间激光通信研究经历了高潮—低谷—高潮的发展过程,其自身通信也存在以下缺点:(1)大气干扰对激光通信影响很大,激光通过大气传播时存在损耗、湍流、激光波前畸变等效应^[2];(2)由于激光的束散角度小、方向性强,适合点与点之间的安全通信,对于组网时需要大面积覆盖比较困难;(3)需要高精度的 APT(捕获、指向、跟踪)分系统,激光的发散角度小,远距离探测困难,这就要求在考虑大气、光学系统等不利因素下精确调整发射和接收的光轴,使两光轴满足通信要求精度;(4)远距离弱光探测技术也是制约其发展的重要原因。

卫星激光通信起源于 20 世纪 70 年代,90 年代一些发达国家进行了众多的地面验证性实验,进入 21 世纪空间激光通信取得了长足的进步,主

要以欧空局(ESA)、美国、德国和日本等发达国家为代表。

2 空间激光通信基本内容

2.1 空间激光通信基本过程

空间激光通信的设计依赖于通信距离、误码率和传输距离等要求,从已经研制出的空间激光通信设备中可以看出,典型的光学结构原理如图 1 所示^[2],空间激光设备根据已知的被通信设备(被动星)在空间中的初步位置,首先通过主动星发射的信标光信息对被动星进行搜索,一旦这个信标光信号进入粗跟踪视场内,即在粗跟踪探测器中发现信标光斑,捕获过程就建立起来,概括起来就是主动星开始对被动星信标光进行搜寻,识别信标光的过程;当信标光进入粗跟踪视场内,信标光光斑在粗跟踪探测器中的位置也随之确定,把信标光斑的初始位置和标准位置(探测器中心位置)进行比较,根据一定的计算方式求出光斑的偏置量,然后利用这个偏置量,通过粗跟踪执行机构调节接收端的视轴,使信标光的光斑处于被动星粗跟踪探测器中心位置,这个过程称为“粗跟踪”;紧接着被动星向主动星发射信号光束作为反馈信号,主动星接收到反馈信号后,扫描过程即刻停止,通过主动方的粗跟踪执行机构调节自身的光轴,使反馈光信号进入自身探测器的中心位置,从而实现主动对被动的跟踪,然后开启自身的信号光,被动星可以再次调节自身的精跟踪单元使信号光位于精跟踪探测器的中心位置,当然主动星也会自动根据被动星的信号光调节自身的精跟踪机构实现更高精度的光轴对准,这个过程称为“精跟踪”。一般的粗跟踪为开环控制,而精跟踪是一个闭环的控制形式,当精跟踪精度达到通信精度后,双方就可以进行通信数据的传输。但是由于在通信建立的过程中卫星之间还存在相对运动等情况,这个过程也会影响跟踪精度;一般采用超前角瞄准单元进行补偿,实现空间的动态瞄准和跟踪,通信过程中必须保证动态跟踪精度满足通信要求,否则会影响通信质量或者直接造成通信失败。

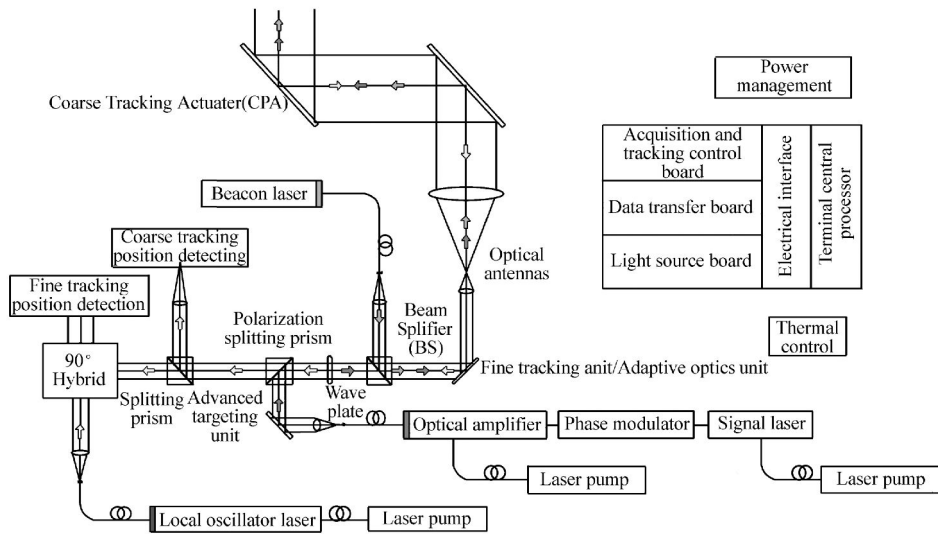


图1 典型的激光通信系统结构

Fig. 1 Typical structure of laser communication

2.2 空间激光链路分类

空间激光通信根据应用的距离和应用的空
间范围可以分为以下几类^[3]:(1)低轨和同步轨道
通信;(2)同步轨道和地面通信;(3)同步轨道和
同步轨道通信;(4)低轨和低轨之间通信;(5)低
轨和地面通信;(6)地面之间站点通信;(7)地面
和飞机、汽艇、舰船等通信。其空间链路的分类如
图2所示^[3-4]。

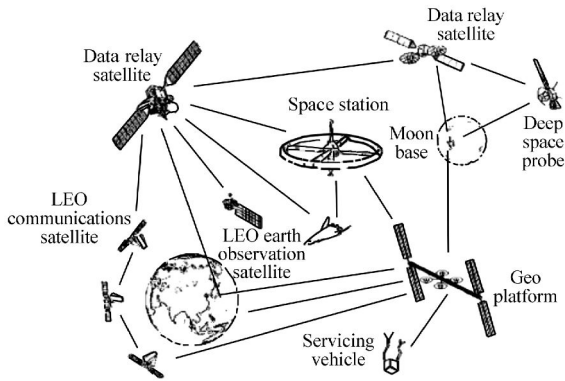


图2 空间链路图示

Fig. 2 Sketch of space communication link

空间激光的调制解调技术可以分为直接探测
解调技术和相干探测解调技术,随着激光高效混
频、光源稳定性、频率压缩技术以及自适应环境等
技术的调高,相干探测由于具有更加灵敏的探测

精度,可以进行频率和相位调制^[3]等突出优势,
正逐步成为现代空间激光通信的主要研究对象。

2.3 空间激光通信性能参数

衡量激光通信性能的参数主要包括通信距
离、通信速度和误码率,此外通信终端还包括激光
波长、激光发散角、仪器重量、体积等一些参数。

3 空间激光通信的发展现状

3.1 国外发展现状

3.1.1 ESA 和日本

ESA 是世界激光空间通信的引领者,半导体
激光器的星际链路实验(Semiconductor-laser In-
tersatellite Link Experiment, SILEX)计划于1985
年实施,其激光通信相关载荷如图3(a)就是为了
对空间激光通信众多关键性技术进行实验性验
证^[5],1998年法国发射的SPOT-4是世界上第一
个搭载激光通信终端(Laser Communication Ter-
minal, LCT)的地面观测卫星,其LCT如图3(b)所
示。2001年11月ESA成立了SILEX地球同步轨
道空间激光通信实验站,发射的高级中继技术任
务(Advanced Relay and Technology Mission, AR-
TEMIS)和SPOT-4之间首次实现了空间单向激光
通信,即SPOT-4可以向ARTEMIS通信,反之不
能,其通信过程和激光通信方式传回的照片分别

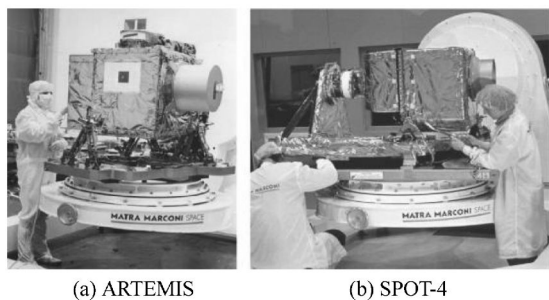


图 3 激光通信设备
Fig. 3 Laser communication terminal

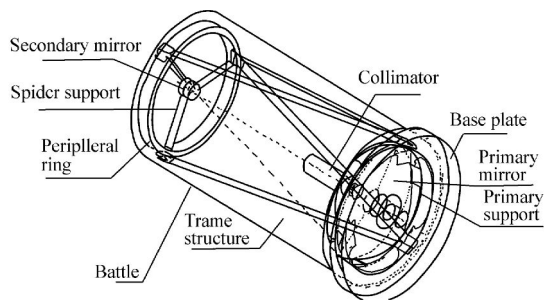
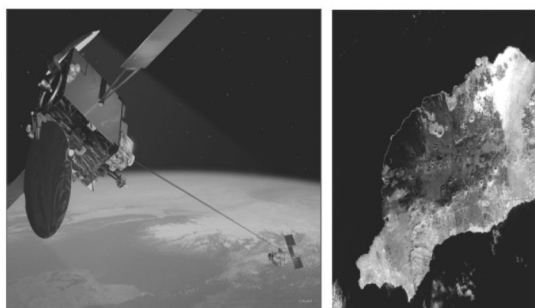


图 5 SILEX 天线光路图
Fig. 5 Layout of SILEX optical antenna



(a) ARTEMIS和SPOT-4 之间通信
(a) Communication between ARTEMIS and SPOT-4
(b) 由ARTEMIS LCT 传回的照片
(b) Image delivered by ARTEMIS LCT

图 4 通信过程和传回的照片
Fig. 4 Communication process and delivered image



图 6 OGS 外形图
Fig. 6 Layout of OGS

如图 4(a) 和 4(b)。

SPOT-4 上的数据通过激光通信传输到 ARTEMIS,通信速率约为 50 Mb/s,误码率为 10^{-6} 。在 ARTEMIS 上,利用 Ka 微波段利用微波通信技术将 SPOT-4 数据传回地面。SILEX 主望远镜采用卡式结构设计,如图 5 所示,质量为 157 kg,采用二进制开关键控调制(IM/DD)方式,ARTEMIS 和 SPOT-4 采用 797 ~ 853 nm 激光波长作为通信波长,激光发散角度约为 $7 \mu\text{rad}$ 。

ESA 于 1994 年开始建立地面激光通信基站 (Optical Ground Station, OGS), 1996 年完成。1997 年首次实现了 OGS 中 Zeiss 望远镜的测试实验。OGS 于 2001 年在 ARTEMIS 发射后开始和地面进行激光通信实验^[6]。图 6 是 OGS Zeiss 1m 望远镜的外形图,望远镜仍采用卡式结构形式。

日本航空局(NASDA)和 ESA 于 1993 年达成协议,共建空间激光通信试验平台,其研制的 LCT

名为利用激光通信设备 (Laser Utilizing Communication Equipment, LUCE) 于 1994 年完成, 2002 JAXA 证实了 LUCE 和 ARTEMIS 以及 OGS 地面和 GEO 轨道通信^[7]实现的可能性。2005 年 8 月 LUCE 搭载通信实验卫星 (Optical Inter-satellite Communication Engineering Test Satellite, OICETS) 卫星被发射到太阳同步轨道 (轨道高 610 km), 实现了空间卫星之间的双向通信, 其上行速率为 2.048 Mb/s, 下行通信为 50 Mb/s。SILEX 计划的星间通信实验于 2006 年 9 月顺利成功完成实验任务, 星际和地面之间的通信直到 2009 年 9 月才

表 1 OGS/SPOT-4/LUCE/ARTEMIS 通信结果
Tab. 1 Results of OGS/SPOT-4/LUCE/ ARTEMIS's communication

Communication name	Times	Duration	Success rate/%	Error rate
SPOT-4/ARTEMIS	1 862	377H	96.1	10^{-6}
ARTEMIS/OICETS	83	14H	97.6	10^{-7}
OGS/ARTEMIS	393	78H	91.3	10^{-7}

停止。OGS/SPOT-4/LUCE/ARTEMIS 之间的通信结果如表 1 所示。此外日本很早就开始了激光通信的研究,目前正准备研制 40 Gb/s 通信速度的空间激光通信系统^[8]。

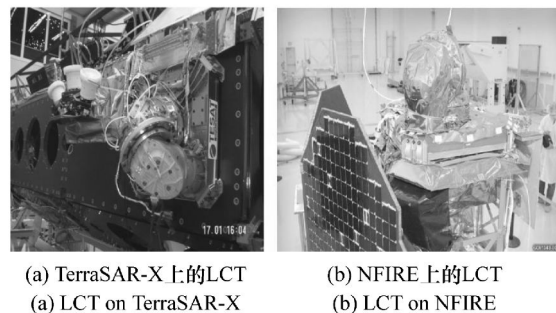
3.1.2 德国

SILEX 是欧洲对于空间激光通信走出的第一步,其 LEO 和 GEO 上主镜的口径均为 250 mm,但由于其重量和体积较大,并没有给空间激光通信带来足够的吸引力,但是它的实验性成功,证实了自由空间激光通信的可能性。SILEX 系统质量大等不便因素主要是由于当时激光器的发展现状所限,采用的激光功率仅为 60 mW。1996 年 ESA 成立了一个由 Ruag Space AG 领导下的相干激光通信研发小组,该小组成功研制出采用 YAG 激光器作为激光光源的短距离相干 LCT (SROLL),系统采用 BPSK 零差解调方式实现了 1.5 Gb/s 的通信速率,该设备口径大小仅为 35 mm,质量不足 20 kg,成功实现轻量化。随着激光器技术的提高,相干激光通信逐渐成为可能,德国是世界上第一个成功将相干激光通信应用于空间星际之间的国家。

1998 年 2 月,欧瑞康空间防卫(Oerlikon-Contraves Space, OCS)和 Motorola 公司宣布成立战略联盟协议(Strategic Alliance Agreement, SAA),研制一套用于 Celestri™ 计划的低轨(LEO) LCT(OISL),签署协议后 Motorola 和美国国家签署技术支持协议(TAA),然而该项协议涉及到美国高级技术,最终美国国家政府拒绝向 OCS 提供技术支持,但欧洲一些其他公司加入到 OISL 研制中,主要有卡尔蔡司(Carl Zeiss)和 TESAT 博什电信(Bosch Telecom)公司。后来博什电信从 OCS 中接管了对 OISL 研发的权利,蔡司和 Ball Aerospace 成为其主要的子合作伙伴,Celestri™ 计划取消,但是德国空间局 GSA(German Space Agency)继续支持该项目的研制,并将它作为 LCTSX 和 TSX-LCT 计划的一部分。

德国一共研制了两套 LCT,其中一台搭载在 TerraSAR-X 卫星上,如图 7(a),另一台搭载在美国 NFIRE 卫星上,如图 7(b)所示。设备结构外形如图 8 所示,均采用 BPSK 相位解调技术。该解调方式涉及到很多关键技术,例如激光锁相技

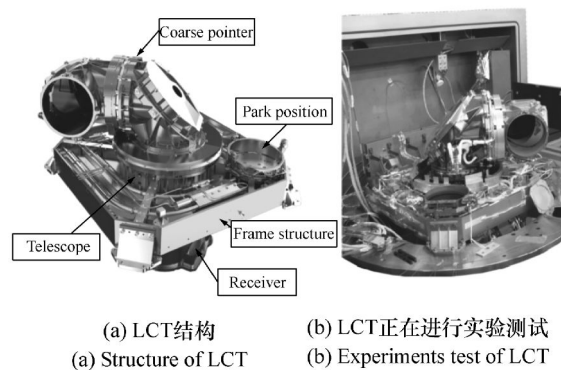
术,高精度的跟踪和指向技术等。而且发射和接收采用相同的激光波长,采用光的偏振技术进行发射和接收隔离^[9-10]。



(a) TerraSAR-X 上的 LCT
(a) LCT on TerraSAR-X
(b) NFIRE 上的 LCT
(b) LCT on NFIRE

图 7 搭载在 TerraSAR-X 侧面的 LCT(左)和搭载在 NFIRE 顶部的 LCT

Fig. 7 LCT on side of TerraSAR-X(Left) and LCT on top of NFIRE(Right)



(a) LCT 结构
(a) Structure of LCT
(b) LCT 正在进行实验测试
(b) Experiments test of LCT

图 8 LCT 外形图和实验测试图(德国)

Fig. 8 Overlook of LCT(left) and its experiment test(right)(German)

该设备的望远镜系统采用卡式结构形式,主镜大小为 125 mm,质量 < 15 kg,最大功耗为 5 W(不包括 CPA 粗指向单元),一阶本征频率 > 180 Hz。2008 年 1 月开始将 LCT 应用在低轨空间通信,通信距离为 5 100 km,通信速率 5.625 Gb/s,误码率为 10^{-11} 。发射功率为 0.7 W,系统总质量为 35 kg,功耗约为 120 W,封装大小为 0.5 cm × 0.5 cm × 0.6 cm。TerraSAR-X 和 NFIRE 的成功通信证实了相干激光通信在低轨卫星之间的通信可行性,对以后相干激光通信有很大的指导意义。

为加快激光通信商业化进展,ESA 采用和 TESAT 相同的技术,发展了“宽带数据低轨中继

传输系统”(LEO-GEO-Ground Link)。仪器总大小为 50 kg,该计划涉及到 Sentinel-a 和 Sentinel-b 2 颗低轨卫星和 3 颗高轨卫星 ALPHASAT、EDRS-A、EDRS-C。LEO 和高轨卫星 EDRS 通信速度约为 1.8 Gb/s, 误码率为 10^{-8} , 通信距离为 45 000 km,发射功率为 2.2W, 仪器总功率为 160 W,主镜口径为135 mm,封装大小为 0.6 cm × 0.6 cm × 0.7 cm。预期从 GEO 到地面的传输速率为 10 Gb/s,在 2013 年进行应用和验证。

3.1.3 法国 (LOLA)

机载光学激光链路 (Liaison Optique Laser Aéroportée, LOLA) 是法国为验证飞机和 GEO 轨道的通信性能而研制的 LCT^[11]。和空间卫星上的 LCT 相比,飞机上的 LCT 必须考虑剧烈振动和大气影响等多种效应。该项目开始于 2003 年底,2006 年夏天 LOLA 和 ARTEMIS 实现通信,其上行速率为 1.64 Mb/s,下行通信速度 29 Mb/s。误码率为 10^{-7} ,典型的工作波长为 848 nm,激光发射功率为 0.104 W,主天线望远镜采用离轴形式设计,采用二进制键控 (OOK) 调制方式,系统的外形如图 9 所示。

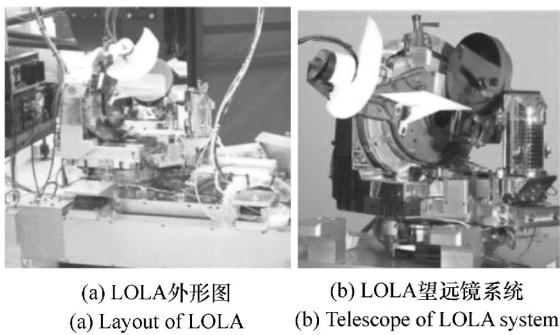


图9 LOLA 外形图 (左), LOLA 望远镜外形图 (右) (法国)

Fig. 9 Overlook of LOLA (Left) and its telescope (Right) (France)

3.1.4 美国

美国也是空间激光通信技术的领导者,其研究机构包括美国宇航局 (NASA), 美国空军研究室 (AFRL), 林肯实验室 (MIT), 加州理工大气喷气实验室 (JPL) 等^[12]。如 STRV2 卫星上的 LCT, 2013 年计划中的 GEO 对地通信卫星 ALPHASAT

和地月通信设备 LLCD, 2016 年用于中继卫星通信的 LCRD 计划。2009 年和 2011 年美国分别对空-地和空-空激光通信进行了验证实验,取得了满意的效果。在此基础上建立 2016 年星间激光通信网络计划,预计通信速率最高可达 40 Gb/s。以下对上述几种 LCT 设备进行详细描述。

(1) STRV-2 计划始于 1994 年,其主要目的是验证和演示低轨卫星 TSX-5 和地面站之间相互通信时的链路情况。安装在 STRV-2 上的 LCT (GOLD),接收和发射的主光学系统采用分别设计的形式,收发不共用,如图 10 所示,发射波长为 810 nm,激光信号的发射由两个信道完成,每个信道包含 4 个固体激光器,激光总输出功率为 62.5 mW × 4,拥有 80 μrad 发散角度,发射主望远镜的口径为 2.54 cm,发射速率为 622 × 2 Mb/s,接收主望远镜口径为 13.7 cm。地面终端发射和接收主望远镜的口径分别为 30.5 和 40.6 cm。LCT 接收主光路采用施密特反射式结构,而接收光路采用相对简单的透射形式。该设备于 2000 年发射,但是发射过程失败,实验中通信距离为 500 ~ 2 000 km,速率为 155 Mb/s ~ 1.24 Gb/s,上行误码率为 10^{-3} ,下行误码率为 10^{-4} ^[13-14]。

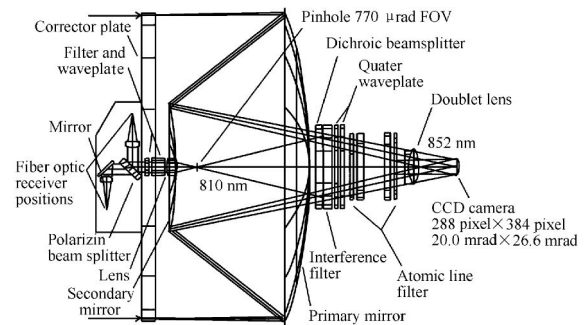


图10 LCT (GOLD) 主光路

Fig. 10 Optical system of LOLD's LCT

(2) 光通信演示^[15-16] (Optical Communication Demonstrator, OCD) 激光通信终端是美国 JPL 实验室和 NASA 共同研制的,系统仅有 3 个后置光路,分别作为发射、接收和光轴校准。它是为了验证结构简化后空间激光通信的可行性,共两套装置 OCD I 和 OCD II。OCD I 是一个原理模型,其跟踪视场和支路复杂程度和 OCD II 相比要简单的多,OCD II 的发射速率 2.48 Gb/s,通信波长为

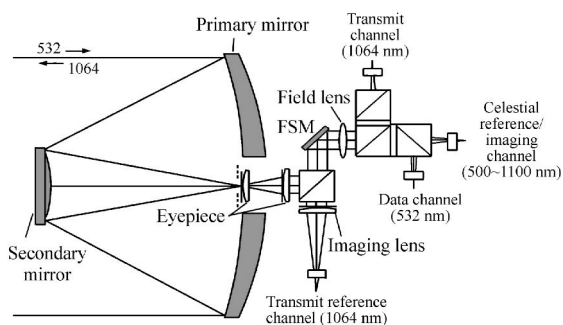
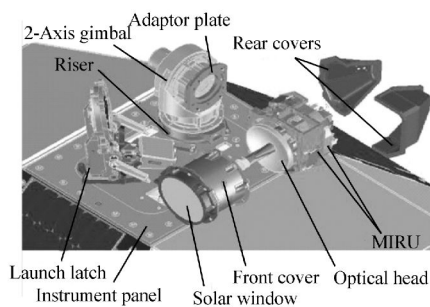
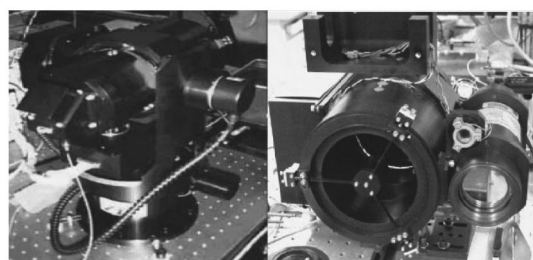


图 11 OCD II 的光路结构

Fig. 11 Optical system of OCD II

1 550 nm, OCD I 通信波长为 830 ~ 860 nm, 其光路结构如图 11 所示, OCD I 和 OCD II 整相结构如图 12 所示。

(3) 月球激光通信终端 (LLST: Lunar Lasercom Space Terminal, LLCD) 是 NASA “月球大气与尘埃探测” 计划的一部分, 由 NASA 和 MIT 共同

(a) LLS 结构
(a) Structure of LLS

(a) OCD I (b) OCD II

图 12 OCD I (左) 和 OCD II (右) 外形图

Fig. 12 Outlook of OCD I (Left) and OCD II (Right)

研制, 预计在 2013 年开始使用, 主要验证月球与地面之间的通信性能^[17]。为达到结构的简单和轻量化, 系统主望远镜大小为 10.75 cm, 激光发射角度 15 μ rad, 功率 0.5 W。上行通信速率为 20 Mb/s, 下行通信速率为 622 Mb/s, 通信距离 40 000 km。主要由 3 部分组成, 分别是电子学控制、光机和调制部分。其光机部分如图 13 所示。

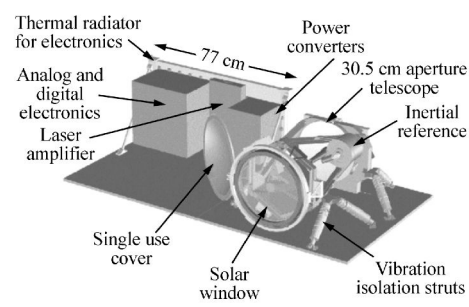
(b) MLCD 结构
(b) Structure of MLCD

图 13 LLS(左) 和 MLCD(右) 光机结构

Fig. 13 Opto-mechanical of LLST(left) and MLCD (right)

(4) 火星激光通信演示系统 (Mars Laser Communications Demonstration System, MLCD) 是 NASA 于 2004 年开始研制, 预计在 2009 年发射, 主要用于火星和地面激光通信验证, 根据天气的不同条件通信速率在 1 ~ 10 Mb/s 之间, 但最终在 2011 年正式使用, 其激光通信距离 4×10^8 km, 是世界上当前通信距离最远的激光终端设备。其主望远镜口径为 305 mm, 通信波长大小为 1.06 μ m。为了增大发射光束的功率, 采用脉冲激光, 利用 PPM 调制技术和光放大处理后, 最大峰值发射功

率约为 300 W^[18]。MLCD 的结构形式如图 13 所示。

美国于 2011 年, 在飞机和飞机之间采用通信的应用中, 成功实现了传输速率为 2.5 Gb/s 的验证; 2009 年由 MIT 研制的应用于飞机和地面的通信设备中, 通信距离为 25 km, 传输速率为 2.66 Gb/s; 在研的应用于中继卫星中的激光通信系统, 预计于 2016 年开始工作, 通信速率高达 10 Gb/s。

美国于 2010 年开始实施“蓄谋已久”的转型

卫星通信计划 (Transform-antional State-Uite, TSAT),该计划主要是为了建立一个激光通信网络,实现已有的微波通信向激光通信的转型,其投资超过 200 亿美元,众多大型企业和研发单位参与了该项目的研制和生产工作。TSAT 仅是美国转型通信计划 (Transformational Communications Architecture, TCA) 的一个部分。该项目预计于 2016 年开始应用,涉及众多卫星之间的通信过程,通信速度为 $10 \sim 40 \text{ Gb/s}^{[19]}$ 。该计划的开始势必影响下一代通信方案的转变,将空间通信推向快速、小型、大容量等方向发展。

3.1.5 瑞士

在诸多的激光通信系统研制国家中,瑞士的目的更侧重于商业化研制,空间防护中心研制的 OPTEL 系列激光通信终端^[20]已经基本实现仪器的小型化和轻量化。其光学平台如图 14 所示,光学平台采用离轴四反系统,可以充分利用进入系统的能量,其主望远镜结构形式如图 15 所示。

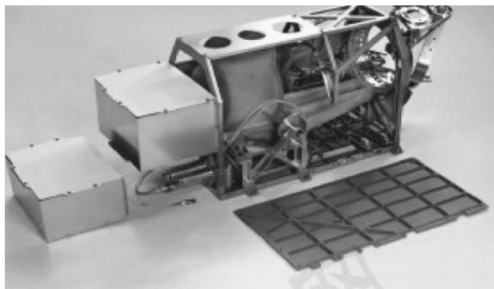


图 14 OPTEL 终端平台

Fig. 14 Optical bench of OPTEL

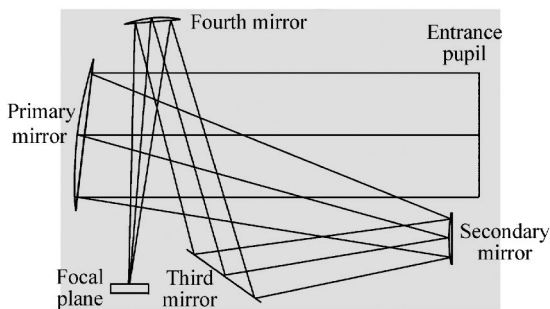


图 15 OPTEL 光学天线光路

Fig. 15 Layout of optical antenna

3.2 国内发展状况

我国空间激光通信研制的起步较晚,主要的研发单位有哈尔滨工业大学、长春理工大学、成都电子科技大学、武汉大学和华中科技大学等。

哈尔滨工业大学注重于星地和星际的激光通信系统研究。2011 年 11 月,由哈工大自行研制成功的空间激光通信终端首次实现和地面的通信,其上行传输速率为 20 Mb/s ,单向传输速率为 504 Mb/s 。天线口径为 150 mm ,跟踪波长为 680 nm ,上行通信波长为 1562 nm ,功率为 1 W ;下行波长为 1552 nm ,功率为 0.4 W ;长春理工大学着重研究机载和地面的激光通信,以及激光通信网络的建立,已经进行过多次地面和飞机通信实验,各个研究单位的详细情况见文献^[13]。

4 空间激光通信关键技术

4.1 高效的激光天线

激光天线是整个激光通信的“眼睛”,眼睛的锐利程度决定信息传输的好坏,激光通信系统光学天线,尤其是主望远镜一般视场不大,因此大多数现有的仪器设备都采用卡式无焦系统作为整个仪器的光学设计思路。但是卡式望远镜存在视场小、中心遮拦和消杂困难等缺陷,因此发展离轴形式的反射式望远镜,增强光能利用率提高信噪比尤为重要。

激光通信终端工作在衍射极限附近,在这种高像质的要求下(系统的波像差 $\text{RMS} < 0.1\lambda$)。设计结果的波像差基本忽略不计,因此系统波像差基本是由加工和装调以及环境引起。高水平的加工可以减小这一影响,采用变形镜也可对像质进行及时矫正^[21]。镜面的高频误差会对系统引入很大的杂光量,因此国外一些发达国家都采用镀膜材料作为镜坯,主要是因为其比重小,而且表面粗糙度可以做得很好,但是镀膜本身有毒,加工危险性大;再者激光的发射功率很强,接收功率又极其微弱,表面的高频误差引入的杂光信号极易降低系统的信噪比,造成跟踪误差下降和通信误码率的提升,因此必须提高光学工作面的加工水平,减低粗糙度等中高频误差。

4.2 高精度 APT 技术

日本学者曾经比喻激光通信的瞄准过程就相当于在日本东京观测富士山上一支移动的绣花针的针尖,对于点对点精确对准要求极其严格。激光通信过程的捕获、跟踪、瞄准(APT)技术都是为了实现点对点的精确对准,保证通信质量。目前采用的 APT 技术中,粗跟踪的带宽很小、精跟踪的带宽很大^[22],国外一般要求动态跟踪误差 $< 2 \mu\text{rad}$ 才能建立正常激光通信。提高系统的空间分辨率和连续可变视场内目标的精确定位观测是发展这个方向的必经之路。

4.3 大气对激光通信影响

对于空间激光通信系统来说,大气通信对于它的影响是一个非常复杂的课题,大气对于激光传输存在湍流、衰减、闪烁以至于大气击穿等诸多问题,这些问题中尤以湍流问题解决难度最大^[23],而且上述的问题会根据天气、地域等不同条件实时变化。其结果会严重影响激光通信终端的跟踪精度,增大通信的误码率,降低通信距离,这些问题在远距离通信时必须进行严格考虑。采用某些先进检测手段和利用某些解调算法,增加天线口径尽可能地采用望远镜的镜面平滑效应,采用自适应光学及时补偿和调整大其影响等措施,都能够有效地抑制大气影响^[24]。

4.4 高速率调制技术、高功率发射激光器

为了保证远距离激光通信的顺利进行,必须在接收端有一定大小的接收功率。激光功率和激光传输距离以及激光发散角都有关系,例如在 1 W 的发射功率下,40 000 km 通信距离处,发射天线口径为 0.15 m,通信光束发散角为 $100 \mu\text{rad}$ 时,接收处的激光功率最大约为 $0.14 \mu\text{W}$ 。激光调制系统是由激光器、调制器、驱动器、温度控制、功率控制、天线放大、编码手段等诸多方面共同完成的,同时采用一定的滤波形式完成整个过程。

参考文献:

- [1] 汪清泉. 部分相干激光通信性能受大气湍流影响的分析[D]. 西安:电子科技大学,2011.
WANG Q Q. Analysis of the influence of atmospheric turbulence on the performance of partially coherent laser communication[D]. Xi'an: Xidian University, 2011. (in Chinese)
- [2] 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. Space coherent laser data transmission system and multi-order correction[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2010. (in Chinese)

早期的调制技术多采用调幅形式,现行下的激光系统更多的是采用调相的形式进行;早期编码方式一般采用二进制键控开关的形式,而现在的调制方式多采用 BPSK 和 DPSK 等先进技术,相干激光通信和非相干激光通信相比较,信噪比可以提高近 20 dB,但同时也对光学系统和调制解调系统提出了更高要求。

4.5 稳定的发射和接收基台

激光通信系统的对准精度一般要求在几个微弧度或者更小,然而空间平台的振动大都高于探测的精度,这突出表现在航空设备上搭载的通信终端,其高频振动尤为剧烈。因此一般空间激光系统和平台之间必须采用隔离安装方式,将振动影响尽量减小,整个系统工作在衍射极限附近,各种辐射以及仪器本身产生的热量(尤其是激光器)必须及时导出体外,以保持仪器和各个连接处温度平衡。因此应选择镜面,机械结构导热效果相同或者相似的材料,从而适应于温度变化要求^[25-26]。

5 结束语

激光通信发展至今已经有三十多年的历史,对于未来高速空间通信来说它是不可或缺的手段,也成为各个国家近年来研究的热点^[27]。和欧美发达国家相比较我国起步较晚,我国当下主要基于试验验证、实验室仿真阶段,而且高性能激光光源主要依靠国外进口。高速通信是未来空间通信的必然要求,当前激光通信整体技术并不成熟,仅仅几个国家掌握激光通信的一些关键技术,而且也仅仅实现了点对点的通信链路过程,未来必须加强国际间的合作,共同构建网络式通信系统,才能充分发挥激光通信的优势,让世界范围内的人们感受激光通信的优越性能。

- [3] 姜会林,佟首峰. 空间激光通信技术与系统[M]. 北京:国防工业出版社,2010.
JIANG H L, TONG SH F. *The Technology and System of Space Laser Communication*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010. (in Chinese)
- [4] TOYOSHIMA M. Optical space communications in Japan[J]. *Function Materials*, 2003, 10(3):428-437.
- [5] GREGORY M, HEINE F, KÄMPFNER H, et al. Commercial optical inter-satellite communication at high data rates[J]. *Opt. Eng.*, 2012, 51(3):031202.
- [6] REYES M, SODNIK Z, LOPEZ P, et al. Preliminary results of the in-orbit tests of ARTEMIS with the Optical Ground Station[J]. *SPIE*, 2002, 4635:38-49.
- [7] SHIKATANI M, TOYODA M, TAKAMI H, et al. Ground system development for the ETS-VI/LCE laser communications experiment[J]. *SPIE*, 1993, 1866:21-29.
- [8] KOISHI Y, SUZUKI Y, TAKAHASHI T, et al. Research and development of 40 Gbps optical free space communication from satellite/airplane[C]//2011 IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications, May 11-13, 2011, Santa Monica, USA, 2011:88-92.
- [9] B HMER K, GREGORY M, HEINE F, et al. Laser communication terminals for the european data relay system[J]. *SPIE*, 2012, 8246:82460D.
- [10] GREGORY M, HEINE F, KÄMPFNER H, et al. Coherent inter-satellite and satellite-ground laser links[J]. *SPIE*, 2011, 7923:792303.
- [11] CAZAUBIEL V, PLANCHE G, CHORVALLI V, et al. LOLA: A 40000 km optical link between an aircraft and a geostationary satellite[C]//6th Internat. Conf. on Space Optics, ESTEC, Jun 27-30, 2006, Noordwijk, The Netherlands, 2006.
- [12] HEMMATI H. Overview of laser communications research at JPL[J]. *SPIE*, 2011, 4273:190-193.
- [13] 付强,姜会林,王晓曼,等. 空间激光通信研究现状及发展趋势[J]. 中国光学, 2012, 5(3):117-125.
FU Q, JIANG H L, WANG X M, et al. Research status and development trend of space laser communication[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(3):117-125. (in Chinese)
- [14] CHEN C C, LESH J R. Overview of the optical communications demonstrator[C]//Free-Space Laser Communications Technology VI, Jan 23-24, 1994, Los Angeles, USA, 1994.
- [15] PAGE N. Design of the optical communication demonstrator instrument optical system[J]. *SPIE*, 1994, 2123:498-504.
- [16] BIASWA A, PAGE N, NEAL J, et al. Airborne optical communications demonstrator design and pre-flight test results[J]. *SPIE*, 2005, 5712:205-216.
- [17] NEVIN K E, DOYLE K B, PILLSBURY A D. Optomechanical design and analysis for the LLCD space terminal telescope[J]. *SPIE*, 2011, 8127:81270G.
- [18] BOROSON D M, BISWAS A, EDWARDS B L. MLCD: overview of nasa's mars laser communications demonstration system[J]. *SPIE*, 2004, 5338:16-28.
- [19] Special report the USA's transformational communications satellite system (TSAT) [EB/OL]. (2009-06-08) [2013-08-12]. <http://www.defenceindustrydaily.com/special-report-the-USAS-transformational-communication-satellite-system-tsat-08>.
- [20] BAISTER G, DREISCHER T, FISCHER E. OPTEL family of optical terminals for space based and airborne platform communications links[J]. *SPIE*, 2005, 5986:59860Z.
- [21] 丁科,黄永梅,马佳光,等. 抑制光束抖动的快速反射镜复合控制[J]. 光学精密工程, 2011, 19(9):1991-1997.
DING K, HUANG Y M, MA J G, et al. Composite control of fast-steering-mirror for beam jitter[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(9):1991-1997. (in Chinese)
- [22] 谭立英,吴世臣,韩琦琦,等. 潜望镜式卫星光通信终端的 CCD 粗跟踪[J]. 光学精密工程, 2012, 20(2):270-276.
TAN L Y, WU SH CH, HAN Q Q, et al. Coarse tracking of periscope-type satellite optical communication terminals[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(2):270~276. (in Chinese)
- [23] 李波,王挺峰,王弟男,等. 激光大气传输湍流扰动仿真技术[J]. 中国光学, 2012, 5(3):289-295.
LI B, WANG T F, WANG D N, et al. Simulation of laser beam propagation through turbulence[J]. *Chinese Optics*,

- 2012,5(3):289-295. (in Chinese)
- [24] 母一宁,刘泉,于林韬,等.]哈特曼技术在序列光斑检测中的应用[J]. 光学精密工程,2011,19(9):2197-2204.
MU Y N, LIU Q, YU L T, *et al.*. Application of Hartmann technique in sequence spot detection[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(9):2197-2204. (in Chinese)
- [25] 王绍举,金光,徐开. 高精度激光通信小卫星星座仿真平台设计[J]. 光学精密工程,2008,16(8):1554-1559.
WANG SH J, JIN G, XU K. Design of simulation platform for high precision laser communication small satellite constellation[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(8):1554-1559. (in Chinese)
- [26] ARNON S, KOPEIKA N S. Performance limitations of free-space optical communication satellite networks due to vibrations-analog case[J]. *Opt. Eng.*, 1997, 36(1):175-181.
- [27] MORIO T. Trends in laser communications in space[J]. *Space Japan Review*, 2011, 11(70):1-6.

作者简介:



吴从均(1986—),男,陕西安康人,博士研究生,2009年于山东大学获得学士学位,主要从事空间光学仪器光学设计和光学系统像质研究。E-mail: wucongjun789@163.com



高志良(1962—),男,山东高密人,工学硕士,高级工程师,硕士研究生导师,主要从事星载相机、星载高光谱仪器及相关机械结构设计研究。E-mail: gaozli@ciomp.ac.cn



颜昌翔(1973—),男,湖北洪湖人,研究员,2001年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事空间光学遥感技术方面的研究。E-mail: yanex@ciomp.ac.cn