

# 空间光通信发展历程及趋势

白帅<sup>1,2</sup> 王建宇<sup>1</sup> 张亮<sup>1</sup> 杨明冬<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中国科学院上海技术物理研究所空间主动光电技术重点实验室, 上海 200083

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 空间光通信经历了几十年的发展,已经演变出两代光通信终端,并完成多次在轨实验。概述了空间光通信的整体发展历史,详细介绍了欧洲、日本和美国的空光通信的发展历程,并对其中较为典型的终端或实验及其关键技术进行着重阐释。简要介绍了国内的发展现状,分析了空光通信的发展趋势,并指出技术上面临的挑战。

**关键词** 光通信; 空间激光通信; 捕获跟踪瞄准系统; 深空光通信; 量子通信

中图分类号 TN929.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.070001

## Development Progress and Trends of Space Optical Communications

Bai Shuai<sup>1,2</sup> Wang Jianyu<sup>1</sup> Zhang Liang<sup>1</sup> Yang Mingdong<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Space Active Opto-Electronic Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** The space optical communications have gone through decades of development, evolving two generations of optical communication terminals, and accomplishing several on-orbit experiments. The overall development history of space optical communications is summarized, the development progress of Europe, Japan and the USA is introduced in detail, and then some of the typical terminals and experiments are stressed, as well as the key technologies. The development status in China is briefly introduced. The development trends of space optical communication are analyzed, and the technical challenges are pointed out.

**Key words** optical communications; space laser communications; acquisition, tracking and pointing (ATP) systems; deep space optical communications; quantum communications

**OCIS codes** 060.2605; 060.4510; 270.5565

## 1 引言

2014年6月,美国宇航局(NASA)利用激光链路从国际空间站向地面下传了一段命名为“Hello, World!”的高清视频<sup>[1]</sup>。对此, NASA的工程师以“从拨号上网升级到宽带上网”来类比激光通信相比微波通信的意义。的确,作为一种非常有前景的通信技术,空间光通信在未来很可能促成人类“太空宽带时代”的到来。正如宽带上网背后的需求是网络传输数据的剧增一样,“太空宽带时代”背后的需求是空间传输数据量的提升。随着人类空间活动逐渐增多及遥感技术的发展,星地及星间的通信数据量越来越大。目前的航天器主要采用微波方式进行通信,由于载波频率的限制,其传输速率最多只能达到百 Mb/s 量级,已经显得有些捉襟见肘<sup>[2]</sup>。相比之下,空间激光通信由于其工作频率高,方向性强,具有传输码率高、天线尺寸小、保密性强等优点,是进行空间高速率通信的绝佳选择。

然而,空间光通信也具有一些缺点:1) 由于激光的发散角小,方向性强,空间光通信依赖捕获、跟踪、瞄准(ATP)子系统实现并保持高精度的光路对准;2) 激光在大气中传播时受到大气衰减、大气湍流等效应的干

收稿日期: 2015-01-15; 收到修改稿日期: 2015-03-19; 网络出版日期: 2015-06-12

基金项目: 国家自然科学基金(61302181)

作者简介: 白帅(1987—),男,博士研究生,主要从事空间捕获跟踪技术方面的研究。E-mail: baishuaikk@163.com

导师简介: 王建宇(1959—),男,博士,研究员,主要从事空间光电系统和信息获取与处理技术等方面的研究。

E-mail: jywang@mail.sitp.ac.cn(通信联系人)

扰,并容易受到天气影响;3)点对点的传输特性增强了空间光通信的安全性,但也使组网应用时难以大面积覆盖;4)远距离通信时对弱光跟踪和探测提出挑战。

从20世纪60年代开始,对于空间光通信的研究已经有了几十年的历史,取得诸多成果。本文整体回顾了它的发展历史,并分别介绍了不同国家的发展历程和最新进展,预测了发展趋势,对把握研究领域的发展脉络和未来方向有一定帮助。

## 2 空间光通信发展历史概述

马可尼和波波夫发明的无线电技术为微波通信奠定了基础,类似的,激光通信技术的开端也可以追溯到20世纪60年代激光器的发明。但是在之后的若干年,一方面由于低损耗光纤的发明,使得激光技术的研究和应用更多的集中在地面光纤通信领域,另一方面由于当时人类的航天活动还处于初步发展阶段,对空间数据通信的速率和容量尚未提出更高的要求,所以在六七十年代的空間光通信研究更多处于早期的理论研究层面<sup>[9]</sup>。到了20世纪七八十年代,随着技术的进步和需求的提升,开始出现更为系统性的研究,并且研究内容也更多地倾向于具体的光通信器件、终端及系统设计<sup>[4]</sup>上。从彼时起,空间光通信进入了快速发展的阶段,各种地面实验以及测试平台的研究得到广泛开展<sup>[6]</sup>,并从20世纪90年代中期到21世纪初期进行了多次在轨实验。

纵观空间光通信的整个发展历史,可以将其划分为两个发展阶段:

第一阶段,地面技术积累阶段,从20世纪60年代到90年代。

回溯1960年激光器刚刚发明时的历史,尽管当时人类的太空活动也才诞生不久,但科学家们立刻敏锐地意识到空间激光通信的应用潜力。如Lindgren<sup>[6]</sup>在1970年就提出光纤通信存在的损耗问题,并指出NASA将在1973年和1974年发射两颗用于星间和星地光通信实验的同步卫星。后来的历史证明了Lindgren的想法有些过于乐观,人类直到90年代才开始光通信的在轨实验。这一方面归咎于航天活动本身的高成本、高复杂度和高风险性,另一方面也是由于相应的理论和技术研究还需要一个发展过程。在第一阶段,光通信的相关研究主要包含以下几个方面:

1) 激光器和探测器件的发明。从20世纪60年代开始,激光器和电荷耦合设备(CCD)等发明,为空间光通信提供了最基本的技术保障。

2) 空间光通信基础理论和技术的进展。美、欧、日相继开展了空间光通信相关理论和技术的研究,包括数学模型的建立和大气信道影响研究等。

3) 光通信终端研制以及地面检测技术研究。到20世纪八九十年代时,各国开始制定并实施自己的空间光通信计划。除了研制光通信终端,还开发了相应的地面测试平台,比如日本的OICETS计划采用的GOAL(Ground Optical Assistance for LUCE)测试系统<sup>[7]</sup>,以及欧空局(ESA)的SILEX计划采用的STB(System Test Bed)测试平台<sup>[8]</sup>。

4) 光学地面站的研究与建设。光学地面站的建设一方面为星地光通信提供了地面终端,另一方面也为星载终端提供了地面验证的机会。其中最为典型的是ESA位于西班牙加那利群岛的光学地面站(OGS)。它建立的最初目的是作为SILEX计划中高轨卫星ARTEMIS的地面测试终端,但在后来被广泛用于各种空间光通信终端的地面验证,并参与了多项国际合作计划<sup>[9]</sup>。

第二阶段,在轨实验验证阶段,从20世纪90年代到本世纪初期,直至今天。

到了20世纪90年代中期,经过第一阶段的发展,空间光通信理论和技术都逐渐完备,并且完成了大量的地面验证实验。1995年前后,日本的高轨卫星ETS-VI携带的光通信终端(LCE)和美国喷气推进实验室(JPL)的地面站建立双向激光链路,完成世界首次星地激光通信,从此拉开了光通信在轨实验的序幕。空间光通信发展进入第二阶段,多个国家的研究机构在此后进行了众多的在轨实验。表1汇总了迄今为止典型的在轨光通信实验。

从表1中可以看出,欧洲、日本和美国基本包揽了所有的世界第一,毫无疑问是空间光通信领域的领导者。下面分别对这三个不同地区和国家的光通信发展历程及最新的进展进行详细介绍。

表1 典型的在轨光通信实验汇总

Table 1 Summary of all the typical on-orbit optical communication experiments

Year	Name	Terminals	Countries	Communication rate and system	Distance	Significance
1994	GOLD	GEO: ETS-VI ground station: JPL	Japan USA	1.024 Mb/s (bidirectional) IM/DD	>37,400 km	first satellite-ground optical communication
2001	SILEX-SPOT4	GEO: ARTEMIS LEO: SPOT-4	ESA	50 Mb/s (LEO to GEO) IM/DD	45,000 km (max)	first inter-satellite optical communication
2005	SILEX/OICETS	GEO: ARTEMIS LEO: OICETS	ESA Japan	50 Mb/s (LEO to GEO) 2 Mb/s (GEO to LEO) IM/DD	45,000 km (max)	first inter-satellite bidirectional optical communication
2006	OICETS	LEO: OICETS ground stations: NICT (Japan), OGS-OP (Germany)	Japan Germany	50 Mb/s (downlink) 2 Mb/s (uplink) IM/DD	600~ 1,500 km	first LEO-ground optical communication
2006	SILEX-LOLA	GEO: ARTEMIS airborne: LOLA	ESA France	50 Mb/s (downlink) 2 Mb/s (uplink) IM/DD	>40,000 km	first satellite-airplane optical communication
2008	TerraSAR-X/NFIRE	LEO: TerraSAR-X LEO: NFIRE	Germany USA	5.625 Gb/s (bidirectional) BPSK/homodyne coherent detection	5,100 km (max)	first space coherent optical communication
2013	LLCD	lunar satellite: LADEE ground stations: LLGT, OCTL, OGS (ESA)	USA ESA	622 Mb/s (downlink) 20 Mb/s (uplink) PPM/DD/single photon detection	400,000 km (max)	first lunar-ground optical communication
2014	OPALS	space platform: ISS ground station: OCTL	USA	50 Mb/s (downlink) OOK/DD	700 km (max)	first space station-ground optical communication

### 3 国外空间光通信发展历程

#### 3.1 欧洲——长期的领跑者

如果把世界各国在光通信领域的研究比作一场赛跑的话,那么以 ESA 研究力量为代表的欧洲无疑是一个令人尊敬的选手,一个长期的领跑者——他们在长达几十年的研究中保持了领先地位,并且始终能够引领最新的发展趋势。

##### 3.1.1 SILEX 计划

20 世纪 80 年代中期,ESA 开始着手 SILEX 计划,即 Semiconductor Laser Intersatellite Link Experiment,目的在于建立空间中的星间光学链路<sup>[10]</sup>。SILEX 项目的光学终端有两个,分别安装于 ESA 的地球同步卫星 ARTEMIS 和法国的近地对地观测卫星 SPOT-4 上<sup>[11]</sup>。

2001 年 11 月下旬,ARTEMIS 与 SPOT-4 成功建立了激光通信链路:SPOT-4 利用激光把图像信号传给 ARTEMIS,后者利用 Ka 波段将其传回地面站。此时,SPOT-4 位于 832 km 高的 LEO 轨道上,而 ARTEMIS 由于火箭推进器故障,位于比 GEO 轨道略低的  $3.1 \times 10^4$  km 高的过渡轨道上。这次实验在空间光通信的历史

上具有里程碑意义,标志着世界上首次建立卫星间的光学通信链路。

除了 SILEX-SPOT-4 实验之外,SILEX 计划还包含其他一系列实验<sup>[12]</sup>。

2005 年 12 月,ARTEMIS 与日本的光通信实验低轨卫星 OICETS 建立了双向光学数据链路,完成世界上首次星间的双向激光通信(SILEX/OICETS)<sup>[13]</sup>。

2006 年 12 月,ARTEMIS 与法国的机载终端 LOLA 建立世界首个卫星与飞机之间的光学链路(SILEX-LOLA)<sup>[14]</sup>,通信距离超过  $4 \times 10^4$  km。和卫星平台相比,机载平台面临更加恶劣的振动条件和大气干扰效应。此次实验验证了飞机与卫星之间光通信的可行性,为光通信在无人机预警等领域的潜在应用提供了示范。

整个 SILEX 计划的成功具有划时代的意义,它不仅创造了诸多世界第一,展示出欧洲在光通信研究领域极高的技术水平,也标志着人类的空间激光通信事业获得了阶段性的巨大成功,为后来世界各国更多的在轨实验提供了借鉴和信心。直到 2013 年,ARTEMIS 卫星仍然在超出计划寿命的情况下在轨运行,提供数据转发服务,并被当作欧洲新一代数据中继项目 EDRS 的先导卫星<sup>[15]</sup>。

作为最早期的空间光通信项目之一,SILEX 计划最重要的技术特点是其通信终端的 ATP 子系统采用了粗跟踪-精跟踪的复合轴结构<sup>[16]</sup>,解决了激光通信的高精度捕获跟瞄问题,跟瞄精度达到  $2 \mu\text{rad}$ ,并且复合轴跟踪技术后来成为空间光通信中广泛使用的基本技术。但是 SILEX 实验也存在一些亟待改进的地方:

1) 捕获时间较长。在轨实验表明其平均扫描时间达到  $68 \text{ s}$ <sup>[14]</sup>,这与 GEO 终端较小的捕获视场及较低的定姿精度有关,另外 ARTEMIS 起初位于过渡轨道而非预期的同步轨道上,这也一定程度上影响了它的轨道预测精度。

2) 天线尺寸和质量较大。比如,GEO 终端接收主镜口径为  $250 \text{ mm}$ ,这与当时的激光器发展水平有关,激光器发射功率仅为  $60 \text{ mW}$ 。

3) 通信速率较低。这也是最为关键的一点,SILEX 计划的通信速率仅为  $50 \text{ Mb/s}$ ,完全没有体现出光通信相比于微波通信的速率优势。

因此,在 SILEX 计划成功之后,欧洲将研究的重点放在发展轻小型、高速率的第二代光通信终端上。

### 3.1.2 欧洲第二代高性能终端

SILEX 计划中采用的是强度调制和直接探测(IM/DD)的光通信体制,相比之下,如果采用相干探测体制,由于本振光在相干检测中实现了光放大的作用<sup>[17]</sup>,可以得到更高的探测灵敏度,从而实现更高的通信速率和更小的天线尺寸。

2008 年,德国宇航局(DLR)研制的基于二进制相移键控(BPSK)调制和相干探测的光通信终端 LCT 实现了世界首次空间相干激光通信<sup>[18]</sup>。两个通信终端分别搭载于德国的 LEO 卫星 TerraSAR-X 和美国的 LEO 卫星 NFIRE 上,通信速率达到  $5.625 \text{ Gb/s}$ ,通信距离为  $5.1 \times 10^3 \text{ km}$ ,误码率为  $10^{-11}$ 。终端采用的激光器功率为  $0.7 \text{ W}$ ,望远镜口径为  $125 \text{ mm}$ ,重量为  $35 \text{ kg}$ (作为对比,SILEX 计划中的高轨和低轨卫星终端分别重达  $160 \text{ kg}$  和  $80 \text{ kg}$ )。另外,这次实验还进行了星地的双向相干激光通信。尽管在大气的干扰下,误码率相比于星间链路有所上升(达到  $10^{-5}$ ),但也初步证实了星地相干光通信的可行性<sup>[18]</sup>。

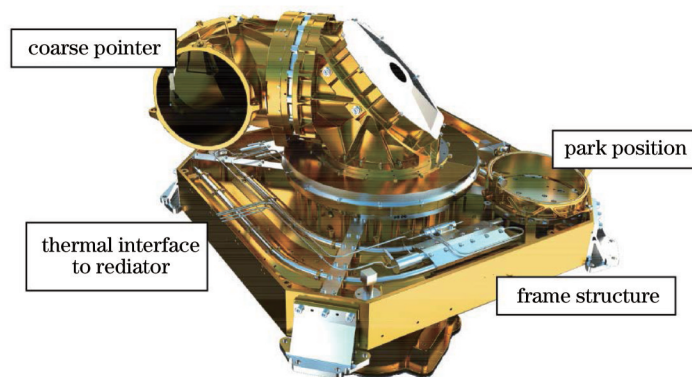


图 1 TerraSAR-X 上搭载的 LCT 终端

Fig.1 LCT terminal on satellite TerraSAR-X

值得指出的是,在 TerraSAR-X/NFIRE 完成空间在轨实验时,相干光通信在地面光纤网络中尚未运作,

可见空间光通信发展之迅速<sup>[19]</sup>。可以说,此次实验是空间光通信终端性能全面提升的重要标志,在通信速率和终端小型化上都取得突破,其主要的技术特点为:1) LCT终端采用了激光锁相技术和相干体制等技术,大幅度提升了通信速率;2) 采用了无信标捕获的新技术,利用螺旋扫描方式直接捕获信号光,大大简化了ATP子系统的结构,捕获时间小于1 min<sup>[20]</sup>;3) 收发均采用相同的1064 nm波长,而通过光的偏振技术实现收发隔离,简化了通信子系统光路结构<sup>[21]</sup>。

欧洲另外一个高性能终端的代表是瑞士在2002年左右开始并持续开发的OPTEL系列。在与ESA的卫星星座链路(SROIL)等合作计划的技术基础上,瑞士的研究机构瞄准工业化应用的目标,设计了OPTEL系列高性能光通信终端。OPTEL系列也采用了高码率零差相干技术,并具有一些其他的鲜明特点,比如针对不同距离的应用设计了不同参数的系列产品,并且在一些产品中采用了微波通信-光通信混合的设计方法以提高产品的适应性<sup>[22-23]</sup>。瑞士OPTEL这种清晰的商业化和产品化定位值得其他研发机构借鉴。

### 3.1.3 EDRS计划

前期一系列成功的实验令高速率空间激光通信的商业前景变得十分光明。随着空间信息技术的不断发展,低轨卫星和飞机等飞行器携带的数据量会越来越大,将这些数据及时快速地传回地面是一个亟待解决的问题。如果采用传统的微波方式直接向地面下传数据,一方面其数据速率较低,另一方面每次过轨只有很短的时间能够和地面站通信。而如果采用LEO-GEO-GROUND的光通信中继方式,就能够实现Gb/s通信速率,并且保证每一轨有50%的可通信时间。在这样的背景下,ESA富有远见地提出了EDRS计划(European Data Relay System),旨在利用GEO卫星作为中继,在LEO卫星和地面站之间建立光学链路<sup>[24]</sup>。

ESA的EDRS计划继承了德国DLR的LCT终端的相干光通信技术,但由于LEO-GEO以及GEO-GROUND的链路距离更长,并且后者还受到大气的干扰,所以EDRS计划在LCT的基础上采取了一系列措施来保证在长距离和大气干扰下的光通信质量。这些措施主要包括:适当降低对通信数据速率的要求,从LEO-LEO实验时的5.62 Gb/s降低到1.8 Gb/s;增加发射功率;将望远镜结构由卡塞格伦式改为离轴式,减小光路损耗;增大地面站望远镜口径;在地面站采用自适应光学技术来补偿大气干扰等。

EDRS计划包括ESA的光学地面站OGS,两颗LEO卫星,一个机载终端,以及三颗GEO卫星。其中的一颗GEO卫星ALPHASAT作为EDRS计划的先驱者,已经在2013年发射入轨,并在2014年8月和地面站初次建立了光链路<sup>[25]</sup>。目前EDRS的最新进展是,一颗LEO卫星Sentinel-1A也已经在2014年下半年发射,并且整个光学中继链路有望在2015年开始运营<sup>[26]</sup>。如果届时能够顺利运营,EDRS的高速数据中继服务也将提供给第三方使用,这将是历史上首次实现空间光通信的商业化运营,对于整个光通信行业的发展具有莫大的意义。

纵观欧洲的空间光通信发展历程,它经历了SILEX时期的第一代终端到LCT/OPTEL系列的第二代终端,都展示出极高的水平,并开始迈向商业化,引领了发展趋势。在可以预见的未来,欧洲仍将在该领域保持领先地位。

## 3.2 日本——实力强大,积极合作

日本在光通信的研究中也展现出了强大的实力,并且能够积极开展国际合作,取得了许多辉煌的成绩。

### 3.2.1 ETS-VI实验

日本早在1985年就启动了有关空间光通信的研究工作。在1994年,由日本通信研究所(CRL)和NASA合作开展的GOLD(Ground/Orbiter Lasercomm Demonstration)项目进行了在轨实验。这次实验在日本的高轨卫星ETS-VI搭载的LCE终端和JPL的地面站之间建立了双工光通信链路,传输速率为1.024 Mb/s,是世界上首次星地激光通信实验。

GOLD项目是一个典型的国际合作的案例。当1994年8月份ETS-VI卫星升空后,原计划运行在日本上空的地球同步轨道,由于动力出现问题,卫星运行在过渡GEO轨道上。为了能够在这样的轨道下充分利用卫星进行实验,日本CRL呼吁NASA和ESA的地面站合作进行光通信实验。最终NASA的JPL和日本进行了合作,日本CRL还专门为JPL的地面站优化了卫星轨道。为了完成星地光路对准,卫星的测控数据由深空网络(DSN)测控中心传给日本,日本方面经过处理后再传给美国的地面终端。最终在两国的多个研究机构的密切合作下,实验得以完成<sup>[27]</sup>。

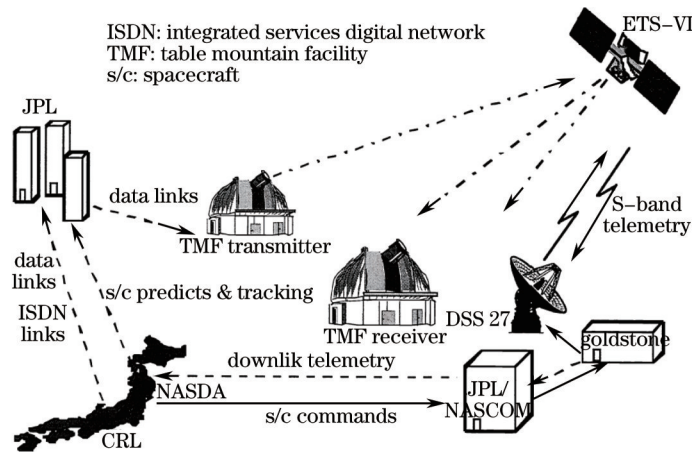


图2 GOLD 实验中实时通信链路示意图

Fig.2 Schematic diagram of real-time communication in GOLD experiment

### 3.2.2 OICETS 系列实验

日本另外一个影响力更为深远的光通信实验是“光学轨道间通信工程试验卫星”(OICETS)系列实验<sup>[13, 28]</sup>, 这一实验也是由日本和多个不同国家的研究机构合作完成的。

2005年12月,低轨卫星 OICETS 与 SILEX 计划的高轨卫星 ARTEMIS 进行了星间光学通信。与之前 SPOT-4 卫星的单向发送不同,这次通信是双向的光学链路,实验结果表明链路质量非常优良。

2006年3月和6月,OICETS 与日本信息通信研究机构(NICT)光学地面站以及德国 DLR 的地面站成功地进行了通信。这次星地实验标志着世界上首次建立低轨卫星和地面站之间的光学链路。

2009年4月到9月,OICETS 与日本 NICT、美国 JPL、德国 DLR 和欧洲 ESA 的光学地面站分别进行了星地光通信实验。结果表明,OICETS 每一小时都至少能与这4个光学地面站中的一个进行通信,并且当某个地面站受到天气影响而无法通信时,可以选择和其他的地面站进行通信。这次实验初步证明了星地连续光通信的可行性<sup>[29]</sup>。

可以看出,整个 OICETS 系列实验的成功离不开日本和国际多个研究机构的积极合作,这种合作的成功也为今后光通信的组网化和全球化提供了示范。另外,日本自身在 OICETS 实验中也体现出很高的技术水平。其捕获跟瞄系统也采用了复合轴结构,设计跟瞄误差达到  $1.85 \mu\text{rad}$  的水平。OICETS 在轨实验的精度甚至超出设计预期。2006年进行的 80 余次星间通信常规实验的结果表明,OICETS 跟踪误差最大不超过  $0.4 \mu\text{rad}$ ,跟踪性能十分优异。

### 3.2.3 日本第二代光通信终端

2008年,日本宇航探索局(JAXA)开始研制用于数据中继的小型化高码率第二代光通信终端。事实上,日本早在 2002 年就发射了他们的第一颗数据中继实验卫星(DRTS)“Kodama”,但是当时 Kodama 采用的还是微波方式,传输速率为数百兆 b/s。第二代光通信终端的目的就是将数据中继系统的微波链路替换为光学链路,从而将传输速率提高到 Gb/s 量级<sup>[30]</sup>。日本 JAXA 的第二代终端也采用了相干体制,码率可以达到 2.5 Gb/s。

表2 JAXA 研制的第二代光通信终端的主要指标

Table 2 Main parameters of the second generation optical communication terminals developed by JAXA

Parameter	LEO terminal	GEO terminal
Telescope aperture /mm	100	200
Weight /kg	<35	<50
Power /W	150 (peak)/100 (average)	130 (peak)/100 (average)
Wavelength / $\mu\text{m}$		1.06
Modulation/demodulation	DPSK/ homodyne coherent	
Data rate/(Gb/s)	2.5	
Transmit power /dBm	36.0	

在 2011 年,日本 NICT 也研制出卫星光通信双波段相干接收机,能够解调 6 Gb/s 的 BPSK 信号<sup>[31]</sup>。另

外,日本还准备研制码率高达 40 Gb/s 的卫星/飞机-地面站的光通信终端<sup>[32]</sup>。

日本凭借自身的技术和积极的国际合作参与了 SILEX 计划并实现了 OICETS 系列的巨大成功,并且也开始研发第二代光通信终端,但是其整体发展速度比欧洲略微滞后。

### 3.3 美国——从落后到领先

美国早在 20 世纪六七十年代就开展了空间光通信的研究。但在 20 世纪末各国纷纷开展在轨实验的时期,由于技术方案存在问题,美国暂时丧失了领先地位。不过凭借长期的技术积累,美国在近年的深空光通信实验中取得领先,证明了自己在该领域的强大实力。

#### 3.3.1 光通信终端 OCD

20 世纪 60 年代中期,美国的研究机构就开始对空间光通信开展早期研究,其中最为著名的几个机构包括 NASA 的 JPL 实验室、麻省理工学院(MIT)的林肯实验室、美国弹道导弹防御组织 BMDO、BALL 公司以及美国空军研究实验室(AFRL)等。其中 JPL 被认为是最早涉足该领域的研究机构,它开展了多项关键技术研究,比如 ATP 算法和测试平台、高效率组件等<sup>[33]</sup>。

JPL 在 1994 年成功研制的光通信终端 OCD(Optical Communications Demonstrator),是一种用于低轨卫星和地面站之间的激光通信终端<sup>[34]</sup>。OCD 的 ATP 控制结构如图 3 所示。

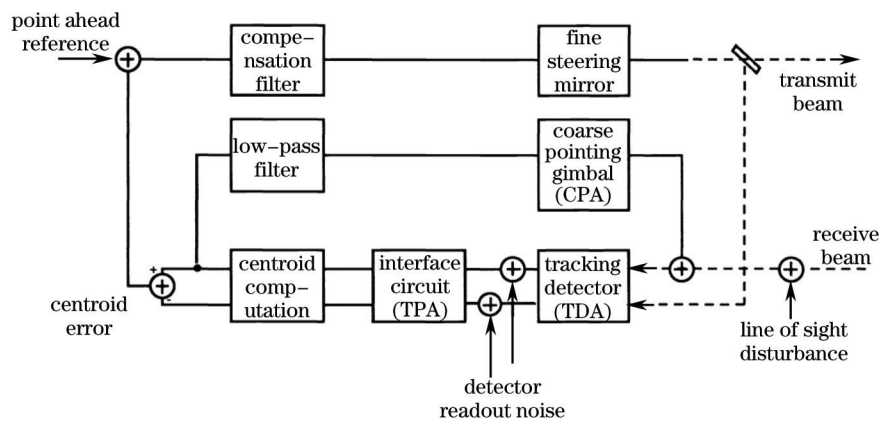


图 3 OCD 跟踪指向系统结构

Fig.3 OCD tracking and pointing system structure

OCD 终端的指向控制系统和一般的复合轴略有不同。其激光发射光束经过精密反射镜、望远镜和扩束镜后出射指向对方终端,同时,分束镜采集出射光的一部分并聚焦到探测器上,代表出射光束的方向。对方终端发射的光束通过望远镜和反射镜后也聚焦到探测器上,代表入射光束的方向。探测器测量入射光束和出射光束的差别,对精密反射镜进行控制,使得出射光束跟踪入射光束。可以看出,这种方式仅令出射光束方向跟踪入射光束,而缺乏整个自身视轴对对方的跟踪。OCD 的控制方式被认为实质上是一种开环控制<sup>[2]</sup>。

后来 JPL 在 OCD 结构的基础上进行了改进,开发出 OCD 的后续型号,并在 2000 年进行了距离 45 km 的地面光学链路实验<sup>[35]</sup>。

#### 3.3.2 STRV-2 计划

1995 年,美国弹道导弹防御组织 BMDO 开始了星地光通信计划 STRV-2 的研究,主要目的是在低轨卫星 TSX-5 和地面站之间建立上下行激光通信链路<sup>[36-37]</sup>。在该计划中,其星载终端 LCT 采用幅度调制和直接探测的方式,利用两个偏振复用的 600 Mb/s 信道实现 1.2 Gb/s 的星地通信码率。LCT 通信终端的设计思路非常独特,下面进行详细说明。

终端的光学结构包括主光学望远镜、信号光接收和信标光跟踪三个部分。其中光学望远镜采用了主镜口径为 13.7 cm 的施密特-卡塞格伦结构,通信光波长为 810 nm,信标光波长为 852 nm。该终端并未采取典型的复合轴结构,而是直接在主望远镜部分接收信号光和跟踪信标光。其中,信号光接收器位于次镜后方,利用分光镜和两个雪崩光电二极管实现两路光学信号的探测。信标光跟踪部分则位于主镜的后方,光束经过一个干涉滤波器和一个带宽极窄的原子线滤波器后进入 CCD 探测器。

作为捕获跟踪阶段的光斑位置传感器,CCD 探测器的像素分辨率约为 70  $\mu\text{rad}$ ,质心计算精度为

14  $\mu$  rad。在捕获阶段, CCD以 100 Hz 的速率被整帧读出, 实现较大的捕获视场; 而在跟踪阶段, 只包含光斑图样的 CCD 中心部分, 12 行左右的像素数据被读出, 从而使得读出速率达到 2 kHz。这种串行读出设计再加上整个光机紧凑的结构设计和较高的谐振频率(达到 150 Hz), 使得该系统在只使用一个跟踪探测器且未使用快反镜的情况下, 同时实现了较大范围的捕获和较高精度及带宽的跟踪。

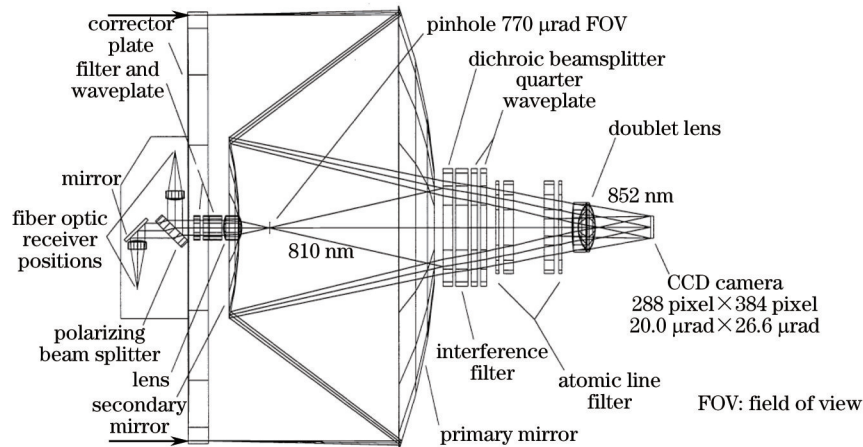


图4 STRV-2计划中星载光通信终端的光学结构

Fig.4 Optical structure of the satellite-borne optical communication terminal in STRV-2

另外, LCT采用了多个激光器的设计。八个信号光激光器、两个信标光激光器以及一个辅助探测器等设备被安放在主望远镜孔径的圆周上。

2000年6月, 搭载了该终端的TSX-5卫星发射成功, 轨道高度403/1686 km, 轨道倾角69°。在入轨后, 卫星光通信终端和光学地面站进行了十几次光通信连接的尝试, 但由于轨道预报精度和卫星姿控精度都没有达到预定要求, 星上终端始终无法捕获地面的信标光, STRV-2在轨实验宣告失败<sup>[38]</sup>。

尽管STRV-2计划的在轨实验没有取得成功, 但是从它的设计思路还是可以得到一些启发, 诸如其紧凑的结构设计, 利用单探测器实现捕获跟踪, 采用多路激光器等。另外, 从它的失败中也可以总结一些经验教训<sup>[38]</sup>, 以供光通信终端设计参考:

1) 保证高精度的卫星定姿定轨。在STRV-2计划中, 预期的轨道精度为沿轨500 m, 穿轨100 m, 而实际的星历表误差半径达到3 km; 预期的卫星姿态精度为1°, 实际上达到6°。可以用星载GPS信号提供更高精度的轨道数据, 而陀螺仪和星敏感器结合则能够保证较高的姿态测量精度。

2) 增加捕获系统的冗余设计。在STRV-2计划中, 仅有一个捕获跟踪共用的CCD探测器, 视场约为1.5°。在捕获不确定区域超出预期的情况下它始终无法完成捕获。一个较好的解决办法是增加一个大视场探测器, 在初始捕获阶段保证对方信标光位于视场中, 之后再切换到小视场探测器。另外, 可靠的扫描功能也是捕获系统应该具备的。

3) 对地面站提出更高的设计要求。将设计压力更多的放在地面站是星地光通信链路设计的普遍思路。尤其为了应对星历表误差较大的情况, 应该在地面站采取更多的措施, 比如采用更宽发散角的信标光, 甚至超大功率的点光源。

### 3.3.3 LLCD、OPALS及LCRD计划

STRV-2的失败让美国在空间光通信领域丧失了领先地位, 直到2006年, 美国仍然被认为完全落后于欧洲<sup>[2]</sup>。尽管如此, 美国在光通信领域还是有着非常深厚的技术积累, 并且最近几年的几项光通信实验都取得了成功。

2013年9月6日, NASA发射了月球大气与尘埃环境探测器(LADEE)飞船。飞船上搭载了美国的月地激光通信演示验证(LLCD)终端, 其主要目的是实现月地之间的双向激光通信<sup>[39-40]</sup>。

2013年10月, LADEE飞船到达距离月球235~250 km的轨道, 进入轨道调试阶段, 并在此期间执行了LLCD任务。在当月17日, LLCD任务进行了首次尝试, 并几乎在飞船上激光开启的同时立即锁定了信号, 完成了重要的捕获步骤。后来的几天, 实验非常成功, 飞船和地面之间利用脉冲位置调制(PPM)方式完成了



622 Mb/s 的下行光通信和 20 Mb/s 的上行光通信。

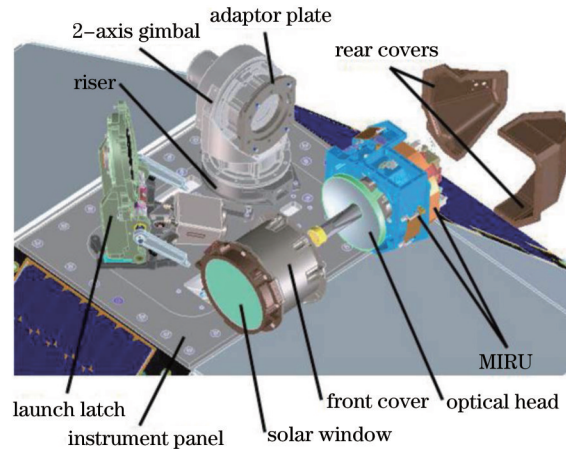


图5 LLCD 星载终端光学模块

Fig.5 Optical module of LLCD satellite-borne terminal

在月地光通信中,由于通信距离非常长,且上行链路还受到较强的大气影响,星载终端很难接收到足够的能量进行高带宽的光学跟踪。为了解决这一问题,LLCD 采取了独特的技术措施:星载终端在光学头部和两轴万向节之间使用了磁流体动力稳定惯性参考单元(MIRU)平台,它依靠磁流体动力学原理提供角度变化信号,利用音圈电机作为驱动机构,对平台的高频抖动进行抑制,保证光路稳定,降低对光学跟踪的带宽需求。得益于角度传感器的低噪声高带宽,以及系统较高的结构刚度,MIRU 平台可以实现超过 300 Hz 的闭环带宽。按照 LLCD 的设计,高于 5 Hz 的扰动由 MIRU 进行抑制,低于 5 Hz 的扰动则依靠光学跟踪来抑制。这种本地稳定平台技术不仅解决了弱光跟踪的问题,还带来另外一个好处,即更低的光学跟踪带宽使得星载终端对大气干扰的敏感性也降低了。LLCD 的光学跟踪依靠林肯实验室开发的一种叫做“光纤章动跟踪”的技术来实现,该技术直接驱动接收光纤来跟踪信号光,还可以用来驱动出射光纤实现超前瞄准。这种光纤耦合方式减少了光学模块中的主动式光电设备,降低了其对振动的敏感性,增强了系统的可靠性。LLCD 终端的捕获功能则是利用步进电机驱动的两轴万向节和四象限探测器来实现的<sup>[41-43]</sup>。

另外,超远距离造成的功率受限还带来了弱光信号探测的问题。LLCD 也采用了一系列的措施来应对这一问题,比如:1) 在星载和地面终端使用了 1550 nm 波长和掺铒光纤放大器(EDFA)技术,实现高速率调制、高功率输出和高灵敏度接收;2) 在地面使用单光子计数探测器和阵列式望远镜,进一步提高接收灵敏度;3) 采用 PPM 调制方式,减弱多普勒效应和大气的不利影响。LLCD 所采用的技术基本反映了目前空间光通信领域的最高技术水平,对深空光通信未来的发展具有极其重要的意义<sup>[44]</sup>。

除 LLCD 之外,美国在近地空间光通信方面也取得了进展。2014 年 6 月,JPL 成功实施了激光通信科学光学载荷(OPALS)项目。该项目利用国际空间站(ISS)作为平台,和地面站之间进行了 50 Mb/s 的中等速率激光通信,其目的是为低轨卫星和地面的光通信实验做准备<sup>[1,45]</sup>。

在 LLCD 和 OPALS 项目的基础上,NASA 联合 JPL 和林肯实验室,在 2011 年启动了激光通信中继演示验证计划(LCRD)。LCRD 计划是美国的一项长期的光通信计划,将于 2017 年发射一颗 GEO 卫星,用来演示 GEO 光通信中继、基于光子计数和 PPM 调制的长距离光通信、基于差分相移键控(DPSK)的高速率近地光通信等。LCRD 将继承 LLCD 的多项技术,包括 MIRU 平台和光子计数探测等<sup>[39]</sup>。

LLCD 和 OPALS 的成功,以及正在实施的 LCRD 计划,不仅展示出技术上的诸多特色,也表明美国在空间光通信领域已经走出低谷,再次来到世界领先的地位。

从上述发展历程可以看出:SILEX/OICETS 计划、TerraSAR-X/NFIRE 实验、以及 LLCD 计划是空间光通信发展历程中的三座里程碑,他们依靠一系列技术措施,分别解决了高精度捕获跟瞄问题、光通信终端性能全面提升问题,以及深空光通信中的弱光跟踪和弱光信号探测问题。表 3 汇总了不同项目中的典型光通信系统,给出系统的主要特点及其解决的相应技术问题。

表3 典型的光通信系统及其技术特点

Table 3 Typical optical communication systems and their technical characteristics

Name	Main feature	Technical problem solved
SILEX/OICETS system	Compound axis ATP structure	High-precision acquisition, tracking and pointing
TerraSAR-X/NFIRE system	Coherent communication system	Greatly enhanced the data rate
	Beacon-less acquisition	Simplified the ATP subsystem structure
	Optical polarization isolation	Simplified the communication subsystem structure
OPTEL series	Mix design with microwave-optical communications	Improved the system adaptability
EDRS system	Adaptive optics in the ground station	Compensated for the atmospheric disturbance
	Off-axis telescope	Reduced the optical path loss
STRV-2 system	Non-orthogonal two-axis gimbal with carbon-composite, CCD with selected rows readout	Achieved high resonance frequency, high readout rate, and single axis tracking
	Two polarization multiplexed channels	Doubled the communication rate
	MIRU platform	Realized low light tracking over long distances
LLCD system	Fiber nutation tracking	Reduced the optical module sensitivity to vibration
	Telescope array in the ground station	Improved receiver sensitivity, and mitigated the atmosphere's adverse effects
	EDFA, single photon detection	Improved the ability to detect weak light signals over long distances

## 4 国内空间光通信发展现状

相比于欧洲、日本和美国,我国在空间光通信领域起步较晚,在20世纪90年代才开始有比较多的研究。但我国在该领域发展迅速,多家单位开展了深入研究,主要的机构有哈尔滨工业大学和长春理工大学等高校,中国科学院上海光学精密研究所和中国科学院光电技术研究所(成都)等中国科学院研究单位,以及中国电子科技集团公司第34所和27所等<sup>[46]</sup>。值得一提的是,国内不同研究机构的研究方向各有不同,呈现出比较鲜明的特点。具体的研究机构及其研究方向可参考文献[46]。

2011年11月,哈尔滨工业大学自行研制的光通信终端搭载于LEO卫星海洋二号上,和地面站之间建立了光通信链路<sup>[47]</sup>,上行传输速率为20 Mb/s,下行传输速率为504 Mb/s,平均捕获时间小于5 s。这次实验是我国首次星地激光通信实验,标志着我国在空间光通信领域也进入在轨实验阶段,具有重要意义。

由中国科学技术大学、中国科学院上海技术物理研究所、中国科学院上海光学精密机械研究所以及中国科学院光电技术研究所(成都)等多家单位联合研制的星地量子通信系统目前也取得了一定进展。其星载终端的跟瞄系统采用了经典激光通信常用的复合轴结构,跟瞄精度达到微弧度量级。基于量子通信需求,星载及地面光机系统均进行了高保偏设计,并采用了星地偏振基矢校正技术。经过地面远距离实验和机载飞行实验<sup>[48-50]</sup>,已经验证了空间尺度量子通信的可行性,并有望在2016年前后发射一颗用于量子科学实验的低轨卫星。

我国目前在空间光通信领域发展势头良好,下一步应该结合各个单位的研究特点,加强交流与合作,并争取在基础器件研制和最新理论研究上取得突破。

## 5 空间光通信发展趋势分析

### 5.1 新一代高性能终端

从国外终端的发展历程来看,在经历了SILEX和OICETS等第一代终端之后,各国都开展了第二代高性能终端的研制,其目标是轻量化、小型化和高码率。终端性能由第一代的(50 Mb/s)/150 kg发展到第二代的(5.6 Gb/s)/30 kg<sup>[51]</sup>。

通信码率提升的一个重要途径是探测体制由幅度调制/直接探测到相干探测的转变。除了探测灵敏度更高之外,相干探测还因为具有极强的波长选择性,能够非常好地抵抗背景光干扰,同时有利于频域的多信道复用。因此相干探测体制必将成为近地空间高性能光通信终端的基本技术手段。但在深空光通信领域,由于多普勒效应等原因,应该慎用相干探测<sup>[52]</sup>。

除了探测体制之外,还可以通过其他一系列技术来提升下一代终端的性能,比如利用掺铒光纤放大器(EDFA)功放和前放技术实现高功率输出和高灵敏度探测,利用偏振复用或波分复用实现光学信道复用等<sup>[17]</sup>。已有的通信系统中已经存在诸多应用案例,比如 LLCD 项目即采用了 EDFA 技术<sup>[52]</sup>;在 STRV-2 计划中,采用双通道偏振复用技术来实现 1.2 Gb/s 的通信速率。

从整个链路的角度来考虑,要实现最终的高性能通信,需要地面站终端也采取一些强有力的措施来提升性能。比如,EDRS 计划中,地面站利用自适应光学技术来补偿大气干扰;LLCD 项目中,地面站采用了望远镜阵列的方式来增大等效孔径,并且提供空间分集,缓解大气湍流对链路的影响<sup>[40,53]</sup>。另外,LLCD 的地面站还采用了基于光子计数的超导纳米线阵列。在将来,随着技术的进一步发展,纳米器件和单光子探测也可能被用于星载终端。

## 5.2 数据中继与空间组网

经历了两代光通信终端的发展,解决了 ATP 跟瞄和通信速率提升的问题,空间光通信技术逐渐演变成成熟,距离实际的商业应用越来越远。其中,利用 GEO 卫星进行数据中继是一个非常重要的应用。欧洲的 EDRS 计划就是一个典型的光学中继系统,而日本和美国也都提出了自己的基于光通信的数据中继计划。

为了提高光通信的可用时间和覆盖范围,一个发展趋势是利用众多不同轨道的卫星,以及地面站和近地飞行器构建空间光网络。EDRS 计划是一个空间光网络的雏形,但要想推动整个产业的崛起,需要更大规模的组网。比如美国提出的转型卫星通信计划(TSAT),该计划投资超过 200 亿美元,联合众多企业和研发单位,旨在构建一个空间激光网络,实现微波通信向激光通信的转型<sup>[21]</sup>。但由于技术风险和经费问题,TSAT 项目曾在 2009 年被暂停<sup>[54]</sup>,后又于 2011 年重启,目标是在 2015 年发射卫星<sup>[46]</sup>。

在空间光网络的构建过程中面临许多问题。比如,整个产业需要尽快制定行业标准,而其中一个最直接的问题就是通信波长的选择。目前空间激光通信系统的主要波长有 800、1064、1550 nm 等。800 nm 由于波长更短,具有较高的光学增益和更小的衍射极限角,是早期空间光通信的常见波长。但随着码率需求和器件水平提升,目前的系统多采用 1064 nm 和 1550 nm 波长。其中 1550 nm 波长由于可以使用光纤网络成熟的波分复用及 EDFA 技术,便于构建全光网络,可能成为未来的发展趋势<sup>[31]</sup>。从目前来看,由于各个系统的差异,未来长时间内将是多波长共存、激光与微波共存的局面。

另外,空间组网和商业应用也对光通信相关技术提出了更多的挑战。比如,对于 ATP 系统来说,为了保证光通信的持续性,捕获子系统必须具有尽量短的捕获时间,能够在终端切换时快速建立链路,并应具有更强的稳健性,以便从链路意外中断中快速恢复。这对快速捕获、功率控制和隔振平台等技术都提出了更高的要求。

## 5.3 迈向深空

空间光通信的另一个发展趋势是从近地向深空迈进。在深空这样的超长通信距离和资源受限的条件下,激光通信的高速率大容量特点能够充分发挥优势。美国在深空光通信的研究中一直处于领先地位,早在 1981 年,JPL 就首次建立了深空光通信的实体模型并制定一系列计划<sup>[31]</sup>。在 2013 年,LLCD 项目的成功更是充分验证了深空光通信的可行性。2004 年,ESA 也利用光学地面站和飞往月球的探测器 SMART-1 建立了光学链路。ESA 还安排了 2025~2040 的 13 项空间计划,其中 5 项关于月球的将普遍采用激光通信<sup>[55]</sup>。可以预见,在 NASA 和 ESA 的引领下,深空光通信将成为日后人类深空活动的常规通信方式。

深空光通信面临距离超长、相对速度大、多普勒效应等问题,LLCD 项目为深空光通信铺平了最初的道路,但更远距离的通信还需要进一步的研究,甚至是全新的技术方案,比如 JPL 的 Chen 等<sup>[56]</sup>提出的地球热红外成像跟踪技术。

## 5.4 量子通信

量子通信可以认为是一种特殊形式的光通信,它以光子的偏振态等形式作为信息载体。基于量子力学的一些基本原理,诸如海森堡不确定性原理和量子不可克隆定律等,量子通信可以实现理论上绝对安全的

保密通信。量子通信可分为量子密钥分发和量子隐形传态两类,具有重大的科学意义和实用价值。为此,科学家们进行了大量的研究工作,并借助经典光通信的技术手段,打算构建星地及星间的量子通信网络。

2011年,中国科学家潘建伟团队在青海湖实现百公里量级自由空间量子隐形传态和纠缠分发<sup>[49]</sup>。2012年,维也纳大学和奥地利科学院的物理学家实现 143 km 距离的量子隐形传态,创造新的世界纪录<sup>[57]</sup>。这些地面实验证明了空间尺度量子通信的可行性。

在前期研究的基础上,欧洲和日本纷纷提出和星地量子通信相关的 SPACE-QUEST 和 SOCRATES 等计划<sup>[31]</sup>。我国也由中国科学技术大学潘建伟教授牵头,联合多家单位开展了量子科学实验卫星的研制,旨在实现星地之间的高速量子密钥分发,进行广域量子通信网络演示,并进行一系列相关科学实验。这些实验的进展将有力推动量子通信朝实用化的方向发展。

## 6 结 论

在空间光通信领域,欧洲、日本和美国走在世界的前列。经过几十年的研究,已经经历了两代终端的发展,并开展了一系列的在轨光通信实验,取得了辉煌的成绩。今后空间光通信会朝着高性能终端、空间组网、深空光通信以及量子通信等方向发展。光通信行业将孕育出巨大的价值和商机,也在技术上不断带来新的挑战。我国的空间光通信研究应该多借鉴先进国家的经验教训,并结合不同研究单位的特点,加强合作,把握机遇,争取在新的发展浪潮中取得领先。

### 参 考 文 献

- 1 NASA. 'Hello, World!' NASA Beams Video from Space Station via Laser[EB/OL]. (2014-06-06). [2015-03-19]. [http://www.nasa.gov/mission\\_pages/station/research/news/opals\\_beams\\_video](http://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/news/opals_beams_video).
- 2 Liu Liren. Laser communications in space I optical link and terminal technology[J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(1): 3-20.  
刘立人. 卫星激光通信 I 链路和终端技术[J]. 中国激光, 2007, 34(1): 3-20.
- 3 Karp S, O'neill E L, Gagliardi R M. Communication theory for the free-space optical channel[J]. Proceedings of the IEEE, 1970, 58(10): 1611-1626.
- 4 Barry J D, Mecherle G S. Beam pointing error as a significant design parameter for satellite-borne, free-space optical communication-systems[J]. Opt Eng, 1985, 24(6): 1049-1054.
- 5 Ebben T H, Marshalek R G, Smith R J, *et al.*. Experimental performance of an acquisition subsystem for free-space laser communication[C]. SPIE, 1989, 1059: 120-136.
- 6 Lindgren N. Optical communications - A decade of preparations[J]. Proceedings of the IEEE, 1970, 58(10): 1410-1418.
- 7 Nakagawa K, Yamamoto A, Toyoda M. Performance test result of LUCE (laser utilizing communications equipment) engineering model[C]. SPIE, 2000, 3932: 68-76.
- 8 Cosson F, Doubrere P, Perez E. Simulation-model and on-ground performances validation of the pat system for SILEX program[C]. SPIE, 1991, 1417: 262-276.
- 9 Sodnik Z, Furch B, Lutz H. The ESA optical ground station - ten years since first light[J]. ESA Bulletin-European Space Agency, 2007, (132): 34-40.
- 10 Oppenhauser G. SILEX program status - A major milestone is reached[C]. SPIE, 1997, 2990: 2-9.
- 11 Tolker-Nielsen T, Oppenhauser G. In orbit test result of an operational optical intersatellite link between ARTEMIS and SPOT4, SILEX[C]. SPIE, 2002, 4635: 1-15.
- 12 Sodnik Z, Furch B, Lutz H. Free-space laser communication activities in europe: SILEX and beyond[C]. IEEE Lasers and Electro-Optics Society (LEOS), 2006: 78-79.
- 13 Jono T, Takayama Y, Kura N, *et al.*. OICETS on-orbit laser communication experiments[C]. SPIE, 2006, 6105: 610503.
- 14 Cazaubiel V, Planche G, Chorvalli V, *et al.*. LOLA: A 40000 km optical link between an aircraft and a geostationary satellite[C]. 6th International Conference on Space Optics, 2006: 27-30.
- 15 Gunter's Space Page. Artemis[EB/OL]. (2014-05-04). [2015-03-19]. [http://space.skyrocket.de/doc\\_sdat/artemis.htm](http://space.skyrocket.de/doc_sdat/artemis.htm).
- 16 Nielsen T T. Pointing, Acquisition and tracking system for the free space laser communication system, SILEX[C]. SPIE, 1995, 2381: 194-205.
- 17 Tong Shoufeng, Jiang Huilin, Zhang Lizhong. High data-rate space laser communication system and its application[J].

- Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(4): 649-654.  
佟首峰, 姜会林, 张立中. 高速率空间激光通信系统及其应用[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(4): 649-654.
- 18 Gregory M, Heine F, Kampfner H, *et al.*. Coherent inter-satellite and satellite-ground laser links[C]. SPIE, 2011, 7923: 792303.
- 19 Karafolas N, Sodnik Z, Armengol J M P, *et al.*. Optical communications in space[C]. International Conference on Optical Network Design and Modeling, 2009: 19-24.
- 20 Smutny B, Lange R, Kampfner H, *et al.*. In-orbit verification of optical inter-satellite communication links based on homodyne BPSK[C]. SPIE, 2008, 6877: 687702.
- 21 Wu Congjun, Yan Changxiang, Gao Zhiliang. Overview of space laser communications[J]. Chinese Optics, 2013, 6(5): 670-680.  
吴从均, 颜昌翔, 高志良. 空间激光通信发展概述[J]. 中国光学, 2013, 6(5): 670-680.
- 22 Baister G, Dreischer T, Fischer E. OPTEL family of optical terminals for space based and airborne platform communications links[C]. SPIE, 2005, 5986: 59860Z.
- 23 Baister G, Kudielka K, Dreischer T, *et al.*. Results from the DOLCE (deep space optical link communications experiment) project[C]. SPIE, 2009, 7199: 71990B.
- 24 Heine F, Muhlnikel G, Zech H, *et al.*. The European Data Relay System, high speed laser based data links[C]. Advanced Satellite Multimedia Systems Conference and the 13th Signal Processing for Space Communications Workshop (ASMS/SPSC), 2014: 284-286.
- 25 Bohmer K, Gregory M, Heine F, *et al.*. Laser communication terminals for the European data relay system[C]. SPIE, 2012, 8246: 82460D.
- 26 Seel S, Troendle D, Heine F, *et al.*. Alphasat laser terminal commissioning status aiming to demonstrate GEO-relay for sentinel SAR and optical sensor data[C]. 2014 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2014: 100-101.
- 27 Wilson K E, Lesh J R, Araki K, *et al.*. Preliminary results of the ground/orbiter lasercom demonstration experiment between table mountain and the ETS-VI satellite[C]. SPIE, 1996, 2699: 121-132.
- 28 Jono T, Toyoda M, Nakagawa K, *et al.*. Acquisition, tracking and pointing system of OICETS for free space laser communications[C]. SPIE, 1999, 3692: 41-50.
- 29 Takayama Y, Toyoshima M, Kura N. Estimation of accessible probability in a low earth orbit satellite to ground laser communications[J]. Radio Engineering, 2010, 19(2): 249-253.
- 30 Yamakawa S, Hanada T, Kohata H. R & D status of the next generation optical communication terminals in JAXA[C]. International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS), 2011: 389-393.
- 31 Zhang Liang, Guo Lihong, Liu Xiangnan, *et al.*. Latest progress and trends of development of space laser communication [J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2013, 32(4): 286-293.  
张 靛, 郭丽红, 刘向南, 等. 空间激光通信技术最新进展与趋势[J]. 飞行器测控学报, 2013, 32(4): 286-293.
- 32 Koishi Y, Suzuki Y, Takahashi T, *et al.*. Research and development of 40 Gbps optical free space communication from satellite/airplane[C]. International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS), 2011: 88-92.
- 33 Hemmati H. Status of free-space optical communications program at JPL[C]. IEEE Aerospace Conference, 2000, 3: 101-105.
- 34 Chen C, Lesh J R. Overview of the Optical Communications Demonstrator[C]. SPIE, 1994, 2123: 85-95.
- 35 Biswas A, Wright M W, Sanii B, *et al.*. 45-km horizontal path optical link demonstration[C]. SPIE, 2001, 4272: 60-71.
- 36 Korevaar E J, Hofmeister R J, Schuster J J, *et al.*. Design of satellite terminal for ballistic missile defense organization (BMDO) lasercom technology demonstration[C]. SPIE, 1995, 2381: 60-71.
- 37 Kim I I, Hakakha H, Riley B, *et al.*. Preliminary results of the STRV-2 satellite-to-ground lasercom experiment[C]. SPIE, 2000, 3932: 21-34.
- 38 Kim I I, Riley B, Wong N M, *et al.*. Lessons learned for STRV-2 satellite-to-ground lasercom experiment[C]. SPIE, 2001, 4272: 1-15.
- 39 Song Tingting, Ma Jing, Tan Liying, *et al.*. Experiment design and development of the lunar laser communication demonstration in USA[J]. Lasers & Optoelectronics Progress, 2014, 51(4): 040004.  
宋婷婷, 马 晶, 谭立英, 等. 美国月球激光通信演示验证——实验设计和后续发展[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(4):

040004.

- 40 Song Tingting, Ma Jing, Tan Liying, *et al.*. Lunar laser communication demonstration in USA: Terminal design[J]. *Lasers & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(5): 050003.  
宋婷婷, 马晶, 谭立英, 等. 美国月球激光通信演示验证——终端设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(5): 050003.
- 41 Boroson D M, Scozzafava J J, Murphy D V, *et al.*. The lunar laser communications demonstration (LLCD)[C]. *Third IEEE International Conference on Space Mission Challenges for Information Technology*, 2009: 23–28.
- 42 Burnside J W, Conrad S D, Pillsbury A D, *et al.*. Design of an inertially stabilized telescope for the LLCD[C]. *SPIE*, 2011, 7923: 79230L.
- 43 Nevin K E, Doyle K B, Pillsbury A D. Optomechanical design and analysis for the LLCD space terminal telescope[C]. *SPIE*, 2011, 8127: 81270G.
- 44 Boroson D M, Robinson B S, Murphy D V, *et al.*. Overview and results of the lunar laser communication demonstration[C]. *SPIE*, 2014, 8971: 89710S.
- 45 Oaida B V, Wu W, Erkmén B I, *et al.*. Optical link design and validation testing of the optical payload for lasercomm science (OPALS) system[C]. *SPIE*, 2014, 8971: 89710U.
- 46 Fu Qiang, Jiang Huilin, Wang Xiaoman, *et al.*. Research status and development trend of space laser communication[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(2): 116–125.  
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(2): 116–125.
- 47 Wu Feng, Yu Siyuan, Ma Zhongtian, *et al.*. Correction of pointing angle deviation and in-orbit validation in satellite-ground laser communication links[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(6): 0605008.  
武凤, 于思源, 马仲甜, 等. 星地激光通信链路瞄准角度偏差修正及在轨验证[J]. *中国激光*, 2014, 41(6): 0605008.
- 48 Zhang M, Zhang L, Wu J C, *et al.*. Detection and compensation of basis deviation in satellite-to-ground quantum communications[J]. *Opt Express*, 2014, 22(8): 9871–9886.
- 49 Yin J, Ren J G, Lu H, *et al.*. Quantum teleportation and entanglement distribution over 100-kilometre free-space channels[J]. *Nature*, 2012, 488(7410): 185–188.
- 50 Wang J Y, Yang B, Liao S K, *et al.*. Direct and full-scale experimental verifications towards ground-satellite quantum key distribution[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(5): 387–393.
- 51 Zhao Shanghong, Wu Jili, Li Yongjun, *et al.*. Present status and developing trends of satellite laser communication[J]. *Lasers & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(9): 092801.  
赵尚弘, 吴继礼, 李勇军, 等. 卫星激光通信现状与发展趋势[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, 48(9): 092801.
- 52 Lü Chunlei, Tong Shoufeng, Jiang Huilin, *et al.*. Key technology and recent advances of deep-space laser communication [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2012, 35(1): 1–5.  
吕春雷, 佟首峰, 姜会林, 等. 深空激光通信的研究现状及关键技术[J]. *长春理工大学学报(自然科学版)*, 2012, 35(1): 1–5.
- 53 Ke Xizheng, Liu Mei. Diversity reception technology over atmospheric turbulence channels in wireless optical communication [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(1): 0106005.  
柯熙政, 刘妹. 湍流信道无线光通信中的分集接收技术[J]. *光学学报*, 2015, 35(1): 0106005.
- 54 Defense Industry Daily. Special Report: The USA's Transformational Communications Satellite System (TSAT)[EB/OL]. (2009–06–08). [2015–03–19]. <http://www.defenseindustrydaily.com/special-report-the-usas-transformational-communications-satellite-system-tsat-0866/>.
- 55 Brandl P, Plank T, Leitgeb E. Optical wireless links in future space communications with high data rate demands[C]. *IEEE International Workshop on Satellite and Space Communications*, 2009: 305–309.
- 56 Chen Y J, Hemmati H, Ortiz G G. Feasibility of infrared earth tracking for deep-space optical communications[J]. *Opt Lett*, 2012, 37(1): 73–75.
- 57 Ma X S, Herbst T, Scheidl T, *et al.*. Quantum teleportation over 143 kilometres using active feed-forward[J]. *Nature*, 2012, 489(7415): 269–273.

栏目编辑: 王晓球