

卫星激光通信现状与发展趋势

赵尚弘 吴继礼 李勇军* 王翔 马丽华 韩仲祥

(空军工程大学电讯工程学院, 陕西 西安 710077)

摘要 对卫星激光通信近 10 年来的发展状况进行综合阐述,重点介绍了卫星激光通信的在轨实验现状和未来发展趋势。通过对已经取得成功的在轨激光通信实验进行综合分析,指出当前卫星之间的激光通信已发展到接近成熟的第二代,即将进入推广应用阶段。定性分析了大气对上下行激光链路影响的差异,指出上行激光链路稳定性差的原因,明确今后星地激光通信的发展方向是自适应光学天线与多光束通信的结合。总结出卫星光网络演化进程,介绍了对卫星光网络体系结构的研究成果。分析指出卫星光网络在经历近 10 年低谷期之后,伴随着第二代卫星激光通信终端的成熟,已经初步具备了硬件基础。系统介绍一种中低轨卫星联合构建的双层卫星光网络的结构和网络性能,进而指出其扩展应用,为我国在空间光网络领域的发展提供思路和参考。

关键词 光通信;大气闪烁;自适应光学;多光束激光通信;卫星光网络;卫星覆盖;网络性能

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP48.092801

Present Status and Developing Trends of Satellite Laser Communication

Zhao Shanghong Wu Jili Li Yongjun Wang Xiang Ma Lihua Han Zhongxiang

(Telecommunication Engineering Institute of Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710077, China)

Abstract Status of space optical communication over the past decade has been summarized. The successful in-orbits experiments are depicted with the developing trends of future space optical communications. According to the analysis on the state-of-the-art technologies, the inter-satellite laser communication is maturing on its second generation, which will transfer from scientific test into extended applications. The different impact of atmosphere turbulence on the down-links and the up-links is analyzed respectively, which demands for the adaptive optics and multi-beam transmitting to cope with the scintillations in the ground-to-satellite links. The outlooks were provided on the architectures of satellite optical networks from the research in recent years. It is pointed out that after the 10 years' downturn, satellite optical networks will meet a booming period with the maturing of the second generation of inter-satellites laser communication. The hardware and experimental foundations are shaped up. A method on the double layered satellite optical networking is presented, which will be a designation reference on the constructing of future space optical networks.

Key words optical communication; atmospheric scintillations; adaptive optics; multi-beam laser communication; satellite optical networks; coverage by satellite; network performance

OCIS codes 280.1310; 280.4788; 280.3420; 010.0280

1 引言

当前以卫星(包括航天器)之间以及卫星同地面之间的信息传输最主要是借助微波通信。受载波频率的限制,微波通信单通道传输速率在每秒百兆比特量级,基本能够满足存储/转发方式的图像传输需求。然而随着空间探索范围扩大和对地观测手段增加,微波频率资源已经相当紧张。特别是高精度对地观测迅速发展,对数据传输速率和实时性要求提高,单通道速率达到每秒千兆比特量级,超出了当前微波传输的能力极限。通信频

收稿日期: 2010-10-21; 收到修改稿日期: 2011-03-24; 网络出版日期: 2011-07-25

基金项目: 国家 863 计划(2007AA01Z294)资助课题。

作者简介: 赵尚弘(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事激光空间信息技术方面的研究。

E-mail: zhaoshangh@yahoo.com.cn

* 通信联系人。E-mail: tz_228@163.com

谱严重挤压迫使人们向更高频率方向发展,激光成了空间高速数据传输的新兴载体。卫星激光通信将大容量的激光同灵活的空间无线通信相结合,为构建安全高效的天地信息网络、实现高速全球无缝连接提供了新的手段^[1~3]。按传输环境不同,卫星激光通信可分两类:一是真空中激光通信,即星间激光通信,用于卫星同卫星(飞船、航天飞机)之间通信;二是包含大气传输的激光通信,常见于建立卫星同地面、海上用户及空中飞行器的连接,文中统称为星地激光通信。卫星激光通信研究始于20世纪70年代。到90年代后期,美国、欧洲和日本先后进行了地面验证实验^[4]。在21世纪的前10年卫星激光通信取得了长足的进步,以欧洲航空航天局(ESA),德国航天局(DLR),宇宙航空开发机构(JAXA)和国家信息与通信技术协会(NICT)以及美国喷气推进实验室(JPL)为代表的空间光通信先驱进行了一系列成功的实验,展示了卫星激光通信的巨大潜力。本文在总结这些实验进展的基础上,对卫星激光通信的发展趋势和网络化进程进行了探讨。

2 星间激光通信进展

2.1 第一代星间激光通信

星载激光通信实验中,首先取得突破的是ESA的半导体星间激光链路实验(SILEX)^[5]。该计划始于1985年,之所以冠以“半导体”的名称,是因为ESA刚刚完成了在激光器选型方面的重大抉择。在此之前ESA一直致力于CO₂激光器的无线激光通信研究,对相关的技术进行了详尽的论证,1.25 Gb/s相干激光通信终端甚至已经接近工程样品试制。直到后来半导体激光器成熟,经过综合分析比较之后,发现CO₂激光器在体积、重量、可靠性和寿命等多方面都不如半导体激光器适于星载。与此同时,法国正在进行半导体激光器进行数据中继的论证,同ESA一拍即合,从而催生了SILEX计划。2001年ESA地球同步卫星ARTEMIS发射,SILEX梦想终于升空。作为SILEX计划重要组成部分,ARTEMIS搭载的激光通信终端成功同近40000 km远的法国低轨道卫星SPOT-4之间建立激光链路,回传了SPOT-4的侦察图片,成为人类历史上首次在太空建立的激光通信链路,时间是2001年11月。SILEX系统指标如表1所示。此后ARTEMIS进入了一年多的轨道调整期,由于卫星姿态已经不合同低轨卫星进行激光连接,因此中断了同SPOT-4的激光通信,直到2003年再次恢复。此后两颗卫星之间保持每天两次常规激光通信,到2005年总共进行了1100多次激光传输,累计时间超过230 h,大量低轨卫星的成像探测数据通过激光链路经同步卫星中转到地面。2005年末,ARTEMIS又同日本轨道间光通信工程实验卫星(OICETS)成功进行了通信实验^[6]。与SPOT-4单工发送不同,OICETS的激光通信终端LUCE具有收、发双工通信的功能,其中发送信号为开关键控(OOK)调制,速率50 Mb/s;接收信号2-PPM调制(脉冲位置调制),速率2 Mb/s。凭借这新增的2 Mb/s上行链路,ARTEMIS和OICETS首次实现了卫星间双向激光通信。从2005年12月到2006年2月,OICETS同ARTEMIS之间成功进行了多次激光通信,随后OICETS转向星地激光通信实验。半年之后,OICETS再次重复了同ARTEMIS之间的激光通信,从7月到8月总共进行了100多次成功的双向轨道间激光通信,充分验证了不同轨道卫星之间激光通信的可行性。作者将ARTEMIS进行的星间激光通信实验统一归为第一代星间激光通信。

表1 SILEX系统指标

Table 1 System indicators of SILEX

Distance	48000 km
Rate	SPOT4→ARTEMIS: 50 Mb/s(backward) ARTEMIS→SPOT4: 2 Mb/s(forward)
Performance	Search time less than 4 min, BER less than 10 ⁻⁶ , connect rate better than 95%
Positioning accuracy	Less than 2 μrad
Source	Signal light: the average output power is 60 W; Beacon light: the average output power is 700 mW; the wavelength range 797~853nm; the wavelength of LEO and GEO is 847 nm and 819 nm, the wavelength of GEO beacon light 801 nm
Detector	sensitivity: -59 dBm; seeker: 384×288 CCD; tracker: 14×14 CCD
Divergence angle	Signal light: 10 μrad(LEO), 16 μrad(GEO); Beacon light: 750 μrad
Antenna aperture	LEO: 180 mm; GEO: 250 mm
Power	LEO: 180 W;GEO:230 W
Weight	157 kg

2.2 第二代星间激光通信

作为 SILEX 的后续计划的产物,ESA 合约单位 Tesat 公司研制了相干激光通信终端 LCT/LCTSX^[7,8],其性能参数如表 2 所示。采用 1064 nm 的 Nd:YAG 激光器,二进制相移键控(BPSK)调制/零差检测,最大调制速率可达 8 Gb/s。2008 年 2 月,搭载激光通信终端的德国低地球轨道(LEO)遥感成像卫星 Terra-SAR-X 和美国国防部红外侦察卫星 NFIRE 之间成功进行了通信实验。首次通信距离介于 3800~4900 km 之间,从开环捕获到光路闭环跟踪用时 43 s,再到相位锁定又用时 30 s,随后进入 133 s 的无误码通信,速率高达 5.625 Gb/s。这是世界上首次实现长距离相干解调的激光通信,也是空间激光通信首次超越微波体现出大带宽、高速率的优势。此外,LCTSX 重量不足 30 kg,同 150 kg 以上的第一代卫星激光通信终端相比,朝小型化迈出了一大步。

表 2 LCT 和 LCTSX 性能参数

Table 2 Performance parameters of LCT and LCTSX

Name	LCT	LCTSX
Rate	2.5 Gb/s/300 Mb/s	5.5 Gb/s
Distance /km	6000/20000	8000
BER	10^{-9}	10^{-9}
Antenna aperture /mm	125	125
Weight /kg	30	<30
Power /W	130	130

Tesat 与 DLR 成功的意义远远超越了这次实验本身的价值,它在技术上的突破被广泛地认可,LCTSX 曾为名噪一时的 Celestri、Teledesic 以及日本下一代低轨道卫星系统(NeLS)的采购对象。后来受到地面蜂窝系统和光纤传输网的冲击,Celestri 和 Teledesic 系统相继下马,让 LCTSX 失去了大笔订单。但这并没有造成研究计划的终止,LCTSX 下面几项最主要的技术突破,代表着一种体制的成长趋势,逐渐成为星间激光通信的参考标准。

1) 标准化机/电接口。

所有光电/电光转换都在激光通信终端内部完成,终端采用统一标准的机、电和热接口与搭载平台对接,二者之间没有任何的光接口。这样设计一方面能够简化平台设计,因为平台不需要光学组件,减少光学面保护、光轴校准等复杂的加工设计工作。另一方面标准接口设计可以增加终端的兼容性,凡能够搭载微波或者射频终端的平台,都将能够无缝升级到激光通信终端。

2) 相位调制/零差检测方案。

空间光通信中信号放大只能在收发两端完成,中途不可能实施。因此在功率预算有限时,提高接收灵敏度成为增大发送功率的最有效途径。零差 BPSK 具有最高检测灵敏度,能够显著放宽链路功率预算,特别适合超长距离的高速传输。

同直接强度检测相比,相干检测系统增加一套本振光路,涉及到频率锁定、极化校准、空间模式匹配等一系列的问题,因此单纯看检测环节会复杂很多。但是如果综合考虑背景光滤除、多普勒频移补偿、接收信号放大等环节,情况就是完全两样。首先相干检测严格的空模匹配具有天然的抗干扰和噪声抑制能力。为了提高接收信噪比,直接检测系统需要借助原子滤光片抑制带外噪声;而在相干检测中,由于背景光是自然杂散光,能与本振光实现模式匹配进入检测电路的能量可以忽略不计,因此系统可不借助滤光片直接工作在近太阳视场。其次,相干检测系统的光锁相环可实现本振光与接收信号光的频率同步,补偿因卫星高速运动带来的多普勒频移。而在直接检测系统中,这一工作通常需要复杂的可调谐原子滤光器件来完成。再次,本振信号在同接收信号相干时,对有用信号具有显著放大作用,不必采用直接检测系统中前置光放大器。综合来看,相干检测系统用一套本振光路替换了直接检测系统的光滤波器、接收窗口调谐装置和前置放大器,反而降低了系统复杂度,增强了可靠性。

3) 信号光直接捕获。

LCTSX 没有专门的信标激光器,也没有采用多像素的焦平面阵列进行光束捕获。可调谐 Nd:YAG 激光器发出的 1064 nm 激光兼具信号光与信标光的作用,在捕获阶段适当提高输出功率以降低捕获难度。通信双方采用大视场(2.5 mrad)的四象限探测器(QD)直接捕获光束,交替进行螺旋扫描不断提高对准精度,

最终实现闭环跟踪。这种策略的好处是显而易见的。首先,零信标系统节省的远不止是一套光源,同时减少的还有终端内光学表面、镀膜、光轴调校、光束分合等设备,而且收发光束能够最大程度地共轴传输,光路自校准也相对容易。其次,传统 CCD 等捕获阵列由众多高灵敏度的探测像素组成,在太空辐射环境中非常脆弱,需要特殊的屏蔽措施和复杂的接口设计。信号光 QD 直接捕获降低了系统的复杂度和设计难度,降低了系统故障率。

鉴于上述优点,欧洲下一代数据卫星中继系统(EDRS)将会采用 Tesat 的终端方案构建骨干网;日本宇宙航空开发机构和国家信息与通信技术协会宣称他们下一步也将采用类似的技术方案^[9]。因此,可以说 LCTSX 标志着卫星激光通信由工程实验向实际应用的初步转变,笔者将其归为第二代星间激光通信。

3 星-地激光通信进展

当前的星地接入仍然以微波为主导,微波网络的带宽始终成为制约卫星通信发展的瓶颈,尤其在星间激光通信取得成功之后,问题显得更加突出。要突破星地接入的带宽和容量限制,不得不再次将目光投向激光通信,因此对星地激光通信研究近年异常活跃。

3.1 欧洲

图 1 是 ESA 首次进行卫星同地面站之间激光通信实验的示意图。用于下行链路测量的伪随机码数据由位于西班牙特内里费(Tenerife)岛的光学地面站(OGS)产生,通过地面综合业务数字网(ISDN)传送到比利时 Redu 控制中心,经由高可信度[误码率(BER)优于 10^{-8}]的 Ka 频段微波链路发送到 ARTEMIS 卫星,最后经卫星上光学终端转发回 OGS,形成一个测量回路。OGS 用直径 1 m 的光学望远镜接收信号,工作波段 850 nm,上行链路 50 Mb/s,下行链路 2 Mb/s,在接收到 ARTEMIS 发送的数据后,与发送数据进行比较,获得误码统计。测试开始于 2001 年 11 月 15 日,比 ARTEMIS 同 SPOT-4 通信时间早一周^[5,10]。当时 ARTEMIS 由于发射故障,还没有完全定轨于地球同步轨道,同地面站的通信是为了验证激光通信终端对激光束捕获和跟踪性能,下行链路误码率始终低于 10^{-4} ,平均误码率在 10^{-6} 以上。此后不久,ARTEMIS 就进入了艰难的轨道调整期,从 2002 年 2 月始,经过一年多的调整,ARTEMIS 最终成功定轨在东经 21.5° 的地球同步轨道,并在 2003 年恢复了星地激光通信实验。在接下来的近一年时间里,ARTEMIS 同地面站之间成功建立了 100 多次连接,并完成数据中继任务,期间还进行过 57 次下行链路和 9 次上行链路的误码统计^[10]。其中下行链路获得了令人满意的结果,平均误码率为 10^{-6} 。上行链路采用的不归零码开关键控(NRZ-OOK)调制受大气的影响较为严重,星上终端很难对码元进行成功捕获和判决,9 次成功连接中总计时间约 4 h,最好状况 BER 仅达到 10^{-5} 到 10^{-6} 量级,绝大部分时间 $BER > 10^{-3}$ 。因此,ARTEMIS 与地面站之间的通信不能算是成功双向星地激光通信,但确实是首次星地之间下行链路的重要实验验证。2006 年 12 月,Astrium 公司首次实现了在由位于 Istres 的法国国防采购局的飞行测试中心提供的“Mystère 20”飞机和 Artemis 通信卫星之间的双向激光光学链路。整个实验过程中,“Mystère 20”飞机进行了两次高度分别在 6~10 km 之间的高空飞行。总航程达 4×10^4 km。2007 年年初,Thales Alenia 空间通信链被整合入系统中,利用该系统通过 Artemis 地球同步卫星第一次使得地面上和航空器之间的音频和视频数据通信实现同步。此后,作为飞行测试项目的一部分,成功完成了 50 多次通信实验。该项目将用于阐释传输频道的特性,以及在复杂的天气状况从不同的高度接入系统的性能和可靠性。实验验证,该系统传输速率为 50 Mb/s;捕获时间小于 1 s;指示的精确度优于 $1 \mu\text{rad}$ 。

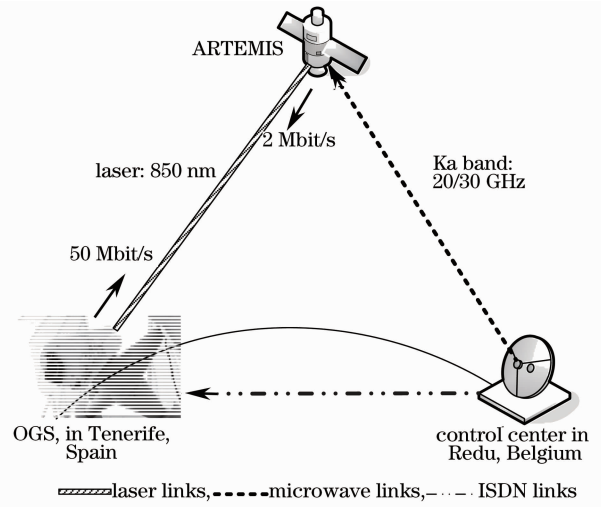


图 1 ESA 首次星地激光通信测试实验

Fig. 1 First satellite-ground laser communication test of ESA

2006 年 12 月,Astrium 公司首次实现了在由位于 Istres 的法国国防采购局的飞行测试中心提供的“Mystère 20”飞机和 Artemis 通信卫星之间的双向激光光学链路。整个实验过程中,“Mystère 20”飞机进行了两次高度分别在 6~10 km 之间的高空飞行。总航程达 4×10^4 km。2007 年年初,Thales Alenia 空间通信链被整合入系统中,利用该系统通过 Artemis 地球同步卫星第一次使得地面上和航空器之间的音频和视频数据通信实现同步。此后,作为飞行测试项目的一部分,成功完成了 50 多次通信实验。该项目将用于阐释传输频道的特性,以及在复杂的天气状况从不同的高度接入系统的性能和可靠性。实验验证,该系统传输速率为 50 Mb/s;捕获时间小于 1 s;指示的精确度优于 $1 \mu\text{rad}$ 。

3.2 日本

日本邮电部的通信研究实验室,从20世纪70年代初开始着手空间光通信技术的相关工作。1987年开始研制空间光通信基础实验系统LCE,先后制作了面包板模型(BBM)、结构动态模型(SDM)、热动态模型(TDM)、系统工程模型(SEM),1990年开始制作工程飞行模型(EFM)。LCE的研制于1993年全部完成,装载于1994年发射的ETS-VI技术试验卫星上,其主要性能指标如表3所示。LCE主要部件包括:双轴万向支架、望远镜、精定位装置(FPA)、光程差校正装置(PAA)、扩束器、通信用激光二极管(LD)、雪崩光电二极管(APD)、调制解调器、数据处理器和一些控制单元。FPA有两个小副镜,受陀螺控制;PAA也有两个小副镜,受压电器件控制,这种结构保证了系统对特殊环境的适应性。LCE装置中,光学部分重13 kg,长60 cm,附在卫星上地球定位仪的一侧(卫星外侧)有一个长的护翼,保证其不受电磁波的干扰和太阳的辐射。电路部分则在卫星内部,分为4个盒子,即LCE—E₁~E₄。E₁包括通信控制电路;E₂包括数据处理器、遥测和控制接口电路;E₃是跟踪控制电路;E₄是电源,包括DC-DC转换器。全系统于1995年成功进行了星地激光通信试验。

表3 LCE主要性能指标

Table 3 Main performance parameters of LCE

Weight /kg	22.4	Acquisition\tracking\pointing	
Power (max) /W	90.4	Acquisition\Coarse tracking	
Antenna aperture /cm	7.5	Sensor	CCD
Gain /dB	11.8	Capture range / (°)	±1.5
Transmitting terminal		View angle /mrad	8
Laser	LD(AlGaAs)	Precision /μrad	32
Wavelength /μm	0.83	Sensitivity /dBm	-63.7
Average power /mW	18.3	Fine tracking	
Divergence angle /μrad	30/60	Sensor	QD
Rate/(Mb/s)	1.024	Tracking range /mrad	±0.4
Modulation mode	Intensity modulation	View angle /mrad	0.4
Receiving terminal		Precision /μrad	2
Wavelength /μm	0.51	Sensitivity	
Detector	Si-APD	Correction	
View angle /mrad	0.2	Range /μrad	>±100
		Resolution /μrad	2

2003年,在OICETS发射之前NICT就将其激光通信终端LUCE运抵Tenerife岛,与ARTEMIS进行激光对连,以降低在轨运行的风险。实验取得了预期效果^[11],为后来OICETS同ARTEMIS之间的成功通信实验奠定了良好的基础。

2005年OICETS升空之后首先进行的是同ARTEMIS的星间激光通信实验。2006年2月,结束了同ARTEMIS为期3个月的实验后,OICETS调整姿态将终端对准地面,准备进行星地激光通信实验。2006年3月到6月,OICETS开始第一阶段实验,同NICT的东京地面站进行通信;随后,OICETS同德国地面站进行了第二阶段通信实验,地面站位于德国上法芬霍芬,由DLR管辖。2006年9月,OICETS完成所有实验,相关计划也暂时告一段落。

此后两年多时间,OICETS处于闲置状态,直到2008年10月,在JAXA许可下,NICT重新开始OICETS同地面激光通信实验^[12,13]。在此之前,NICT从2008年4月就开始筹备,恢复东京OGS在实验中断的两年时间里失能部分。10月21日,恢复实验后的首次通信取得成功,NICT发现OICETS上的激光终端LUCE完好如初,光束开环跟踪精度与2006年测得的数据基本一致。LUCE与东京OGS的实验持续到2009年2月。此后OICETS重新调整,准备与东京NICT、上法芬霍芬DLR、特内里费岛ESA和JPL的地面站进行联合通信实验。在同JPL的地面站实验中下行链路接最高接收功率超过300 nW,BER一度优于10⁻⁶,但是由于LUCE跟踪带宽有限,连接中经常出现对准误差超出跟踪范围的情况。而上行链路情况很不乐观。LUCE很容易捕获和跟踪发射功率高达1.8 W的信标光,但是很难实现与毫瓦量级的信号光同步,这一结果同两年前的情况类似。这一阶段的实验从4月中一直持续到9月末,也是有报道的最早进行的

星地激光链路连接/切换实验。由于地理位置限制,切换都是在中断连接的情况下进行的,在一次连接之后,LUCE 能够有 10 min 左右的调整时间准备进入下一次通信。实验统计结果显示,成功连接的概率只有 58%,连接失败最主要是受云雨天气影响(占 38.3%)^[14],只有 3.7%的概率是其他因素造成的。如果排除天气影响,成功的概率高达 94%。由于 LUCE 设计的初衷并不是要同多个地面站建立连接,因此可以推断,经过优化的终端设计和地面站选址后,LEO 同地面的激光连接和切换将会更加容易。

3.3 美国

虽然美国在卫星激光通信方面实验成果并不多,最近一次在轨实验计划 STRV-2 也因设计缺陷宣告失败^[15],但是美国在深空激光通信方面一直处于领先水平。在 NASA“行星间互联网(IPN)”计划的支持下,JPL 早在 1992 年底就展开了伽利略光学实验计划(GOPEX)。GOPEX 是单向激光束深空探测实验。实验中两个地面站瞄准 Galileo 深空飞行器发射 532 nm 的可见波段激光脉冲,照射其光电探测器——光学照相机,重复频率分别是 10 Hz 和 15 Hz。照相机扫描整个地球,形成 1 frame 画面,地面发射光束会在探测器上形成一系列均匀光斑。由于通信中并没有建立闭环光路跟踪,因此只能算是深空通信可行性的初步验证。尽管如此,实验成功地从 159 frame 画面中识别出 48 frame 明显的地面激光照射画面,实现最远 6×10^6 km 距离上的激光信号检测。

1994 年美国开始了对深空通信方案的详细论证,综合分析了激光同 X 波段/Ka 波段通信的效费比,结果表明激光在大数据量传输方面具有明显优势。随后美国在激光调制/检测方式方面进行了深入研究,最后确定脉冲位置调制及其相关改进调制方式为重点发展方向^[16,17]。美国同时也进行了深空数据的星载中继和地面站直接接收方案比较,结果表明要实现不间断深空激光链路的数据中继,单个星载中继站同多个地面站投资成本相当。而多地面站联网工作的优势是可以通过分散部署减少天气影响,达到与星载中继站相同的效果,并且在天气状况好的时候可以跟踪多个深空探测器。因此美国当前重点发展方向是用于深空通信的多光学地面站。

在 2009 年同 OICETS 的通信中,JPL 为 LUCE 设计了 3 路上行信号光用于通信^[18],最大发射功率超过 20 mW,但是卫星上平均接收功率仍然不到 -70 dBm,信号强度只能达到精跟踪传感器的灵敏度^[19]。因此,上行链路只能维持基本的光束跟踪,并不能保证码元同步,常常会出现信号太弱导致时钟同步失锁的情况发生,造成通信中断。

4 卫星激光通信发展的难点

制约当前卫星通信最严重的环节是星地之间数据传输,因为今后相当长的时间内,空间数据的最终用户都将集中在地面,只有当卫星同地面之间实现了高速的激光通信,才真正突破微波卫星系统带宽和容量限制。实现星地激光通信,最大的障碍是大气的影响。大气对激光传输的影响主要表面为三种。一是对流层中的雨雪云雾都将严重影响激光传输,恶劣的天气状况甚至可造成通信中断;二是大气密度变化引起光路弯折,造成光线观察角度与实际入射角不一致,即蒙气差影响;三是大气湍流导致光束漂移、扩散、像点抖动、强度起伏等效应,影响光信号的检测接收。第一种影响无法通过技术手段直接消除,但是可以通过地面站的巧妙选址实施通道分集,也可以采用位于平流层之上的平台进行中继,降低恶劣天气阻断激光通信的概率。蒙气差影响只作用于光束捕获阶段,跟踪阶段能够根据光路可逆原理进行校准,从已有的实验来看其影响可以不用过多考虑。而大气湍流的影响在任何时候都存在,属于不得不克服的影响因素。

4.1 大气湍流对上下行链路影响

综合几次在轨星地激光通信实验,不难发现星地激光通信中最难实现的是上行链路(地面到卫星)。实验中与卫星进行通信的地面站都是大型光学地面站,拥有 1 m 以上的超大孔径天线,具备完善的光机电一体化配套设施,辅以精密测控系统,仍然难以保证卫星上接收到信号的稳定性。究其原因,上行激光链路受大气湍流影响远比下行链路要严重。下行链路中,激光束在前 90% 以上的路径是接近真空的理想传输环境,直到接近地面一小段才会有大气衰减和相位畸变。也就是上行链路激光到达地球大气之前还保持完好的光斑,在大气边缘是近乎理想的平面波,受影响的只有一小段路径,且还有大口径天线孔径平滑效应,所以只有相对较小的闪烁和像点抖动。反观上行链路,激光束一出瞳即受到对流层稠密大气的影响,除了受大气衰减

和闪烁影响,下行链路还受到严重的光束漂移影响^[20],相当于增大对准误差。图2为星地激光通信中,典型的上、下行激光链路接收信号强度对比。不难看出受湍流影响,上行链路光强起伏比下行链路大得多。相同的大气状况,上行链路总共的闪烁强度可能达到下行链路的10倍以上。

而卫星接收天线孔径相对较小,又缺乏相位补偿措施,从而导致上行链路性能始终不尽如人意。截止目前,所有星地激光通信的上行链路只能说勉强建立通信,甚至不能保证持续的码元跟踪与时钟同步,常常存在通信中断的现象。对固定大型光学地面站尚且如此,如果不采取更有效的补偿措施,移动用户的小型光学终端接入卫星也就无从谈起。然而不容乐观的是对强湍流大气环境激光传输,当前还没有可供参考的理论模型,更不用说有效的补偿措施。

鉴于此,ESA、NASA等机构近两年都将重心转向了大气激光通信,研究克服大气湍流的策略,采取的措施主要集中在自适应相位补偿和多路收发两方面。

4.2 大气闪烁的自适应相位补偿

自适应补偿最主要有两方面技术。其一是相位畸变的测量,通常可借助测量波前斜率进行相位重构。其二是利用变形镜实施波前相位校正。ESA近期完成了紧凑型自适应光学天线测试^[21],准备将它用于小型光学地面站,接收成像遥感卫星的观测数据。为了同第二、三代星间激光通信终端兼容,EAS的自适应光学天线工作波长仍然是1064 nm,经校正后光束质量足以实现零差相干检测。

JPL自适应光通信实验^[22,23]受到NASA行星间互联网计划支持,他们开发的自适应光学试验床包含一个由97个形变单元构成的变形镜,总直径1 m,对1064 nm激光束波前校正后残留误差在220 nm左右,Strehl比约20%。JPL实验表明,自适应光学天线对100 Mb/s的OOK激光链路性能改善在5 dB以上,能够很好地抑制湍流影响。

4.3 多光束上行激光通信

自适应光学天线并不是对所有星地激光通信都适合。受空间相干性的限制,自适应光学天线校正范围必须在等晕角以内。这对相对横向速度较小的天文观测和GEO地面站之间通信都容易满足。但是对高速运行的LEO卫星同地面站之间链路,对准过程中必须要考虑超前指向角。这一超前量不同于蒙气差,无法借助可逆光路进行自动校准,一旦超前指向角超出等晕角范围,自适应光学系统难以对上行链路进行超前补偿。

图3是LEO卫星对地通信的一次典型连接中激光束等晕角、超前指向角随俯仰角变化关系比较。从图中可以看到,等晕角会随着俯仰角增大迅速增大,变化范围自7 μrad 直到80 μrad ,而对准角度超前量随俯仰角变化率则小得多。在俯仰角小于28°时,由于对准超前量越过等晕角范围,自适应光学天线将难以对上行链路实施有效补偿,极大降低了上行链路的稳定性。此时更为可行的方案是采用多路收发。多束激光受大气湍流影响各异,可以实现接收功率迭加。随着发送光束数量增加,上行链路接收光强会由对数正态趋向正态分布,光强方差近似反比于光路数,从而可以抑制大气湍流造成的闪烁。

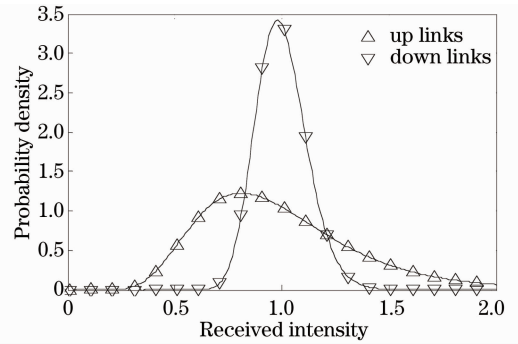


图2 上、下行激光链路接收光强分布对比
Fig. 2 Received light intensity distribution of uplinks in contrast with the down link

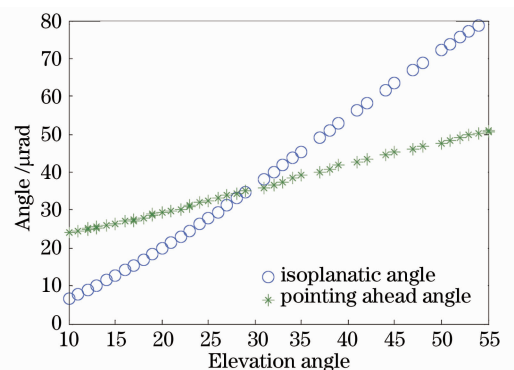


图3 OICETS对地接入等晕角同超前对准量对比
Fig. 3 Comparison of isoplanatic angles and pointing ahead angles in the links between OICETS and OGS

5 卫星光通信的网络化演化进程

经过近 40 年的发展,星间激光通信从理论探索到实验研究,从地面验证到星载实验,通信速率从 50 Mb/s/150 kg 发展到 5.6 Gb/s/30 kg,已经步入接近成熟的第二代,距离实际应用越来越近。借助卫星激光链路组建空间骨干网具备了初步的硬件条件,空间组网是卫星激光通信下一步发展趋势。但单纯终端技术的成熟并不能支撑起整个空间光网络,因为激光链路的带宽、容量、接入与组网同微波链路之间存在巨大差异,不断增加的光学节点将会打破当前空间信息网络格局。只有提前研究空间光通信的网络构架,开发适于空间光网络的组网协议,并进行充分的地面模拟和验证,才会最终迎来空间光网络的时代^[24,25]。瞄准国家在空间技术领域的中长期发展需求,空军工程大学从 2001 年开始关注卫星激光通信关键技术。在近 10 年的研究工作中,对卫星激光通信中的捕获、对准和跟踪(ATP)关键技术进行了研究^[26],先后建立了卫星平台振动模型,研究振动对激光通信的影响及其抑制办法^[27,28];建立光束传输模型,研究了光束发散角、对准误差对激光链路性能的影响及束散角优化设计^[29]以及大气湍流对星地激光通信链路的性能影响^[30,31]。在掌握了卫星光通信系统基本结构和链路特性之后,空军工程大学开始对卫星光通信组网理论和技术展开研究,初步提出在卫星中采用波分复用(WDM)组网的思路,将波长路由引入卫星光网络^[32,33],研究了编队卫星网络的多址接入性能^[34,35]。随后对卫星光网络的系统框架和逻辑结构进行了探讨^[36,37]。2007 年,在国家 863 计划支持下,空军工程大学成立了卫星光网络实验室,初步确立了双层卫星光网络的基本框架^[38],深入研究了网络的系统结构^[39]和覆盖性能^[40]。

5.1 卫星光网络的初期探索

最早提出卫星光网络概念的是美国麻省理工大学信息与决策系统实验室^[2],主要针对卫星光网络的特点提出了初步网络架构,开展了包括卫星光网络同地面网络的互联,低可靠、大时延-带宽积的传输协议,用户接入访问控制等方面研究工作。从 20 世纪 90 年代到 21 世纪初,卫星光网络曾辉煌一时,包括 Celestri, Teledesic 和日本下一代卫星通信系统等采用激光通信的卫星网络相继出台,表 4 给出了它们的设计参数。其中 Teledesic 轨道倾角为 84.7°,接近于极地轨道,而它设计的目标是要能够对全球提供 40°仰角的连续覆盖,以达到为城市用户和山区用户都能提供移动通信服务的目的。该目标使得 Teledesic 系统设计卫星数量一度达到空前的 840 颗,即使后来降低覆盖要求并提高轨道高度,卫星总数仍然多达 288 颗。如果全部建成,系统中同时工作的激光链路数量有 1152 条之多,相应的终端数目为 2304 个。如此复杂的系统结构导致建设难度和维护费用都远超预算,而本身的定位偏差使其在同地面移动通信系统竞争中毫无优势可言,由此 Teledesic 从一开始就注定夭折。与 Teledesic 过于激进的设计相比,Celestri 是在提升卫星轨道高度基础上再牺牲系统对两极地区覆盖,以求最大程度减少卫星数量。NeLS 的卫星数量介于 Teledesic 和 Celestri 之间,采用 Walker- δ 构形星座,设计之初本为 1200 km:55°:120/10/1,后来经过优化轨道倾角定为 60.68°,轨道数目和每个轨道卫星数均为 11,高度下降到 1110 km。该系统率先引入了星载 WDM 的思想,并进行了 4 波道无线 WDM 的实验,初步展示了掺铒光纤放大器(EDFA)在星载 WDM 中的应用前景。

表 4 典型的卫星光网络结构

Table 4 Typical optical satellite network structure

	Teledesic	Celestri	NeLS
Satellite number	288	63	120
Orbit number	12	7	10
Orbit altitude /km	1375	1400	1200
Orbit inclination /($^{\circ}$)	84.7	48	55
Links between orbits	4	2	2
Total links	1152	189	240
Rate /(Gb/s)	6.75	4.5	2.5

上述三个系统都是全部采用新发射的 LEO 卫星来构建单层卫星光网络,为了实现全球覆盖,卫星数量和终端数量巨大,从而导致预算超额,Teledesic 破产之后卫星光网络就陷入低谷。2001 年美国国防部规划的转型卫星通信系统(TSAT)属于一个相对保守的过渡系统。TSAT 是网络中心战基础信息设施 GIG 的重要组成部分,它以激光链路为骨干,整合静止轨道卫星系统、光学中继卫星通信系统(ORCA)、高级极轨卫

星通信系统(APS)以及数据中继系统(TDRSS-C)为一体,能对南北纬 65° 地区提供连续覆盖。系统利用星载处理技术、星载IPv6路由和星间激光链路等技术,骨干网激光链路速率为 $10\sim 40$ Gb/s,用户接入速率高达 2 Gb/s。由于充分利用的现有的卫星通信系统,TSAT的风险和成本都要远小于上面三个全新的系统。受经济危机影响,2009年TSAT计划也暂时搁置。

5.2 卫星光网络的前奏:星间激光通信的推广应用

经过近10年的低迷,LCTSX星载高速通信实验的成功让卫星光网络找到了基本的硬件条件。接下来,欧空局与国际海事卫星公司联合推出的Alpha星计划(Alpha SAT)^[3]将会给星间激光通信的推广应用带来新的机会。Alpha SAT是一颗地球同步轨道(GEO)通信卫星,计划于2012年左右发射,拟定轨在东经 25° ,为欧、非、亚用户提供数据转发业务。根据双方协定,ESA将为Alpha SAT加载一个LCTSX的升级终端,将提供LEO-GEO高速数据中转服务。同此前的SILEX计划类似,LEO对地观测数据可借助激光链路传到GEO卫星,GEO卫星采用Ka频段微波链路将数据传回地面,最大下行速率达 600 Mb/s。为了让卫星激光通信满足推广实验要求,欧空局正以当前第二代激光通信终端为蓝本,进行终端升级和扩展。改进后的终端同样使用 1064 nm的Nd:YAG固体激光器,采用BPSK调制/零差检测技术,在相同系统功耗下最高发射功率提高到 5 W,支持 45000 km距离上 2.5 Gb/s的数据传输,具备了在GEO同LEO之间通信的能力。终端种类也进一步扩充,能够满足不同轨道、不同距离的通信需求,甚至可以实现卫星同飞机及临近空间平台(HAP)的激光通信^[41]。参照当初SILEX计划的发展思路,如果Alpha SAT激光通信实验取得成功,激光通信将会进行例行数据中继^[42,43],且通信速率能够匹配高分辨率对地观测数据实时数据速率,因此这既是卫星激光通信中一次重要的技术验证,同时也有可能成为一次推广应用,卫星光网络将会变得更加有章可循。

5.3 卫星光网络的雏形:欧洲数据中继卫星系统

截止目前,已经成功的星间激光通信中,由于激光通信终端并不是主要载荷,卫星没有控制在最有利于激光通信的飞行姿态,常因通信实验同其他任务冲突而人为中断,因此整个实验中科学验证的成分居多。ESA正在规划的欧洲数据中继卫星系统(EDRS)中,星间激光通信将会把它的带宽和频率优势真正展现到卫星通信领域,并且首次实现组网通信。

EDRS是直接面向应用的数据中继系统,用以缓解日益明显的微波数据中继压力。尽管现在的空间微波信息网络能够提供相当可观的数据吞吐量,并且还在逐年增长,但是同与日俱增的空间信息量相比缺口仍在扩张。据统计,欧盟委员会和ESA全球环境与安全监测计划(GMES)的实施,将会带来超过 6000 Gb/d的数据传输。类似的海量数据对微波网络不能不算是巨大挑战。为缓解这一问题,欧盟决定建立以3个GEO为骨干的信息网络,相互之间采用激光进行互联,提供全球覆盖。按其最新意向,极大可能是采用ESA的相干激光通信终端。这是目前最现实的空间光骨干网。同此前的LEO星座不同,GEO卫星中继是目前效费比最高的卫星通信方式。3颗GEO实现全球覆盖,相对于动辄数十颗甚至上百颗LEO卫星构成的星座,初期投资和维护成本大大缩减。受长距离及大衰减的制约,GEO卫星不能支持手持微型终端通信,因而并不适合全球移动通信。但是GEO卫星可以充分发挥它对地覆盖能力强的优势,满足气象、电台、监测等特殊部门需求,为少数用户提供大量远程的数据服务。由于在同一轨道的GEO之间建立激光链路相对容易,并且GEO卫星到地面站也可以采用激光连接,实现宽带数据下行,因此EDRS计划的实施将会给欧洲的空间信息系统带来质的飞跃。激光通信终端进一步小型化,再辅以优化的组播、多播策略,构成微波上行+激光组播/多播下行的非对称方式,即将为空间信息网络提供一种全新的数据传输通道。

6 卫星光网络体系结构

6.1 卫星光网络的双层结构设计

2007年,空军工程大学获得国家863计划项目基金资助,展开对卫星光网络体系结构的探索性研究。经过两年多的时间,逐步设计和完善了一种双层卫星光网络系统结构。由于我国卫星光通信技术落后于欧美,组建卫星光网络面向中长期发展和应用,届时同步轨道和相应频率资源都已匮乏,所以设计中并没有采用相对简单的静止轨道卫星,而是采用中轨和低轨卫星组成一种双层结构。双层轨道配置是为了增加网络的组网灵活性和系统鲁棒性。低轨卫星主要完成普通移动用户接入和路由,以充分发挥低轨道对地传播路

径短的优势,支持小型和微型终端用户高速通信。中轨卫星主要起网络管理的作用,辅助承担特定用户接入和超长路由距离的数据分流任务。

1) 低轨卫星星座设计

远距离激光链路的建立和对准是卫星光通信组网的一大难点,尤其是通信建立阶段光束捕获时间长,对网络性能影响较大。因此在设计中首先要考虑网络的稳定性,特别要降低链路切换频率。通过分析比较,综合考虑星座覆盖能力、相邻轨道连接的角度和距离变化,零相位因子的 walker- δ 星座是较为理想的方案。该方案适当牺牲了星座的单星覆盖性能,换来了几大优势。

① 相邻轨道之间的连接角度变化率小,有利于通信光束的对准和跟踪。图 4 为不同相位配置的 walker- δ 星座中,相邻轨道相邻卫星连接的斜角变化率对比。图中横坐标为格林尼治标准时间(GMT),纵坐标是角速率。其中实线表示的是相邻轨道相对相位偏置 $F=0$ 的情况,三角形和圆形标记分别对应 $F=1$ 和 $F=3$ 。由图可知,零相位配置的星座轨道间连接角速率最大为 $5(^{\circ})/\text{min}$,而 $F=1$ (Teledesic 采用)时最大为 $6.3(^{\circ})/\text{min}$, $F=3$ (NeLS 采用)时最大角速率达到 $9.7(^{\circ})/\text{min}$,几乎是 $F=0$ 的 2 倍。因此零相位因子的 walker- δ 星座对保持轨道之间激光链路的稳定提供了更有利的条件,降低了对终端伺服平台在跟踪速率方面的要求。

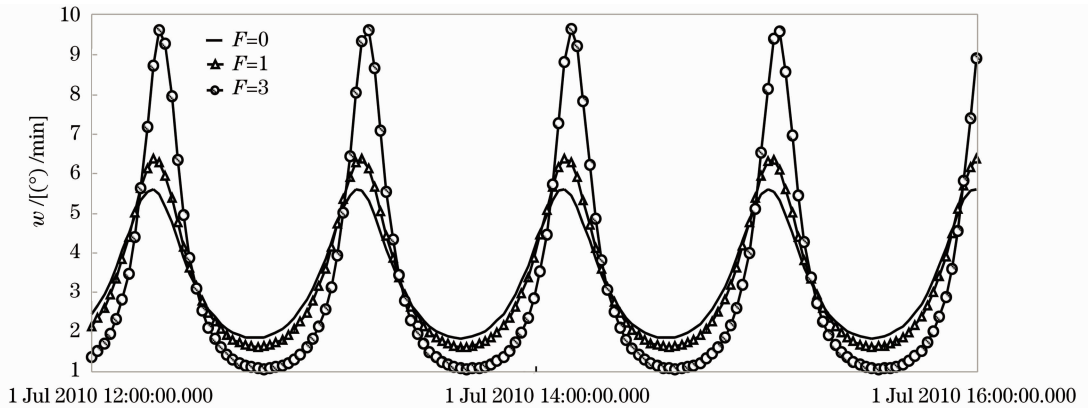


图 4 不同相位配置的轨道间连接角度变化率

Fig. 4 Angle rate of inter-orbit links for different phased constellations

② 高度对称的空间结构。每颗低轨卫星同时与前后两颗同轨道卫星和左右两颗相邻轨道卫星连接。具有相同初始相位角的不同轨道卫星首尾相连,能够结成一个与纬线平行的环路,加上各个轨道平面内的环形网络连接,在卫星运行高度的球面形成了一个同构网,节点可以统一设计和批量制造,同时高度的空间对称性为上层快速路由和交换提供了可能。

③ 准静态的网络拓扑。零相位因子 Walker- δ 星座轨道内的链路本身具有永久连接的特性;轨道间链路角速率相对较小且变化相对平稳,即使卫星通过高纬度地区时,也在伺服平台能够响应的范围内,不会造成通信中断,因而同样能够保持永久连接。因此不论卫星的实际位置如何改变,卫星节点之间相对的逻辑位

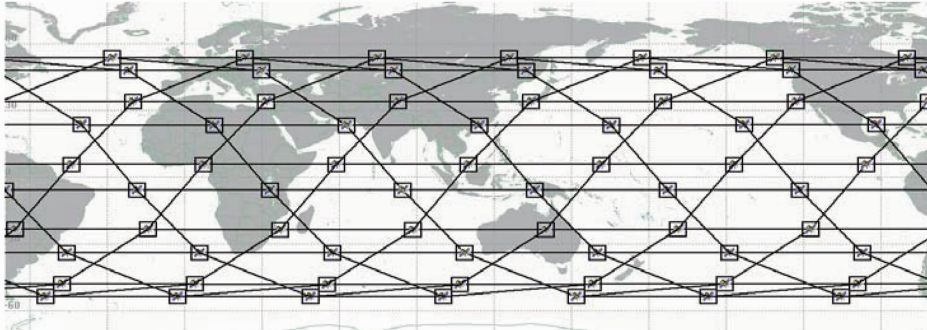


图 5 低轨卫星的空间拓扑结构

Fig. 5 LEO satellite space topology structure

置关系不会改变。图 5 是零相位因子 Walker- δ 星座空间拓扑在地球表面的投影,如果排除空间距离的变化,单纯从数学角度看,拓扑是完全静态的。从网络和路由的角度,对于仅采用跳数作为度量的选路算法[如路由信息协议(RIP)],网络是完全静态的。对于考虑链路传播时延和传输速率的算法,网络拓扑只具有准静态特性。总体来看,高度的对称性和拓扑的准静态特性为网络上层设计带来极大的简化。

从以上分析可以看出低轨卫星星座中,零相位 Walker- δ 星座非常适合于组建卫星光网络。在星座具体参数配置中,轨道高度选取需要综合考虑卫星数量和空间辐射的影响。轨道高度过低将导致全球覆盖所需卫星数量剧增,如果进一步考虑到星地激光传输对仰角的要求,情况会更加严重,因此 1000 km 以下的轨道不予考虑。在 1000~1500 km 高的轨道中,图 6 给出了不同高度对应的年辐射剂量。受范·艾伦辐射带的影响,1500 km 以下,轨道高度越高,卫星所受辐射强度越大。在这一系列轨道高度中,1300 km 是一个重要转折点。高度超过 1300 km,辐射强度会随着轨道增高陡然增大,当轨道高度达到 1400 km,年辐射剂量比 1300 km 时高出 60% 还多。而计算结果表明,1400 km 高度比 1300 km 高度单星连续覆盖所需的卫星数量只少 10%。综合考虑之后认为 1300 km 高度是一个很好的折衷。最终低轨卫星配置为 $50^\circ:70/7/0$,轨道高度 1300 km。

2) 中轨卫星星座设计

为了弥补单层低轨道卫星星座在覆盖能力、网络管理和长距离路由方面的不足,同时也为增大持续高速对地数据传输能力,引入赤道-极轨两个正交轨道平面的中轨卫星。在综合分析了卫星的覆盖能力和轨道辐射强度之后,选取 10354 km 高的回归轨道构建中轨星座,将 6 颗中轨卫星均匀分布在两个轨道,初始相位差为 60° 。由于覆盖区域相对较大,中轨卫星能够对网络中异常状况及时做出反应并将异常信息迅速扩散,因此双层设计增强了网络鲁棒性。同时,中轨卫星能够以较大仰角长时间的保持对地连接,同 10 min 左右的低轨卫星单次接入时间相比,显著提高了通信链路的效率,为数据的高速下行提供了有利条件。此外,中轨卫星也能分流逻辑距离较大的数据包,提高整个网络吞吐量。由于中轨卫星高度除了能够保证卫星与相同轨道两颗卫星连接,还能够同另一轨道的两颗卫星建立不间断连接,因此中轨卫星层也具有图 7 所给的准静态结构。

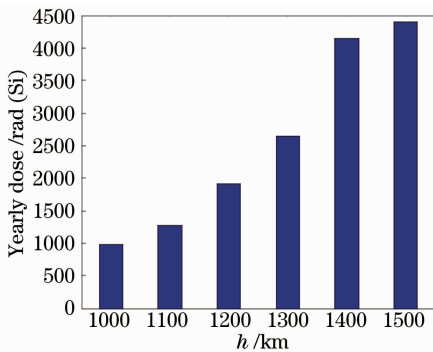


图 6 不同高度低轨道卫星年辐射剂量
Fig. 6 Radiation dose of LEO satellites

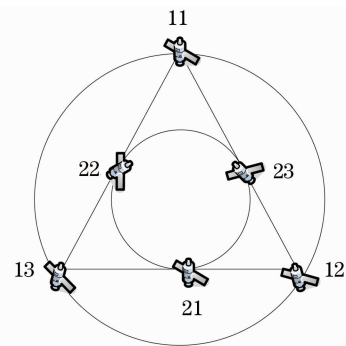


图 7 中轨卫星的拓扑结构
Fig. 7 Topology of MEO satellites

6.2 双层卫星光网络性能

1) 覆盖性能

首先看单重覆盖特性。图 8 为低轨星座覆盖性能仿真,横坐标表示纬度,纵坐标为单星连续覆盖的最低仰角。图中所给的是北半球 65° 纬度以下区域的统计特性。南半球与北半球关于赤道对称,在此略去。由图可知,相位不同的倾斜轨道星座覆盖特性随纬度变化趋势基本相同:从赤道往北看,首先是在 $5^\circ\sim 15^\circ$ 的低纬度区域出现一个覆盖性能的谷点;随后性能迅速好转,从 $25^\circ\sim 50^\circ$ 区域,最低仰角均超过了 20° ;再往高纬度区域最低仰角急剧减小,但都能在北纬 65° 以下区域保持高于 10° 的最小仰角。相比之下 $F=3$ 的配置具有最优的覆盖性能,对纬度在 60° 以下的区域,最低覆盖仰角均不低于 15° ;最佳覆盖区域出现在北纬 40° 附近,连续覆盖的最低仰角接近 40° ;最差出现在北纬 65° 处,对应于最小仰角 12° 。 $F=1$ 和 $F=0$ 较为接近。 $F=0$ 时,最差覆盖出现在北纬 10° 附近,连续覆盖的最低仰角为 11° ,与设计之初选取的最差覆盖区域相一致。综合来看,虽然 $F=0$ 对应

的最低仰角并不是最高,但是在中高纬度区域覆盖稳定,是唯一能满足北纬 $20^{\circ}\sim 58^{\circ}$ 范围内最低仰角高于 20° 的配置,尤其是在北纬 $17^{\circ}\sim 29^{\circ}$ 及 53° 以上的较为关键的仰角过渡区域, $F=0$ 都表现出了最优的覆盖性能。因此零相位因子的配置并没有在对地覆盖方面损失太多,完全满足了覆盖要求。

在连续覆盖设计中只应用了上升轨道,如果同时考虑对下降轨道的应用,将会实现多数区域内双星覆盖。图 9 为低轨卫星星座在北半球最低覆盖重数统计,三种配置多重覆盖性能基本一致,均可实现北纬 $10^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 范围内的双重覆盖,在 $30^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 范围内能够实现最低三重覆盖,这样的多重覆盖特性为地面和空中用户越区切换和通道分集提供了必要条件。

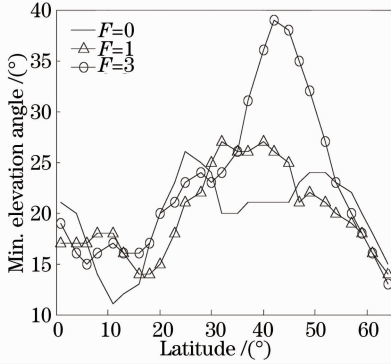


图 8 低轨卫星星座单星覆盖最低仰角分布
Fig. 8 Minimum elevation angles for single satellite coverage

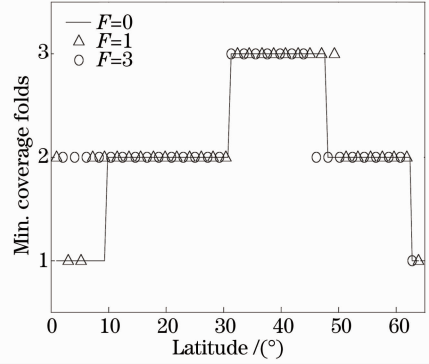


图 9 低轨卫星星座最低覆盖重数分布
Fig. 9 Fold numbers of multi-satellite coverage for different phases

由于对地覆盖主要由 LEO 层完成,中轨卫星主要完成网络管理和远距离数据分流作用,对地覆盖只针对特殊用户大容量接入,因此这里不再对中轨覆盖特性做过多分析,可以参考文献[29~31]。

2) 网络性能

在卫星光网络中,影响网络性能的重要因素是激光链路的建立和切换。通过以上优化设计,双层卫星光网络的低轨层和中轨层分别都可以保持稳定的准静态拓扑,因此问题的关键集中在两层之间的连接和切换。为了分析系统的网络性能,搭建了双层卫星光网络的半实物仿真模型,重点考察中轨卫星和低轨卫星之间的连接和切换对网络性能的影响,结构如图 10 所示。图中实物部分由 2 个运动终端和 4 个固定终端组成,系统运行中移动终端分别跟不同的固定终端建立激光通信链路,模拟两层卫星之间的链路切换过程。以 Opnet 的系统在环路(SITL)模块为网关连接虚拟网络和两条实物激光链路,由于 SITL 外部为标准以太网接口,内部也是虚拟标准接口,因此可以把两条激光链路灵活配置到不同节点,通过虚拟总线共享到整个网络,模拟切换对性能的影响。图 11 是系统的时延统计,上下两条曲线分别对应单使用低轨层和同时使用中低轨双层网络的时延。从双层网络的仿真中可以看出切换对网络全局时延的影响,在每个切换点,切换导致拓扑变化造成全网平均时延

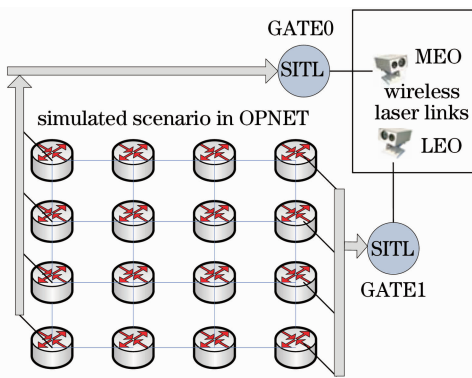


图 10 双层卫星光网络半实物仿真系统
Fig. 10 Double layer optical satellite network simulation system

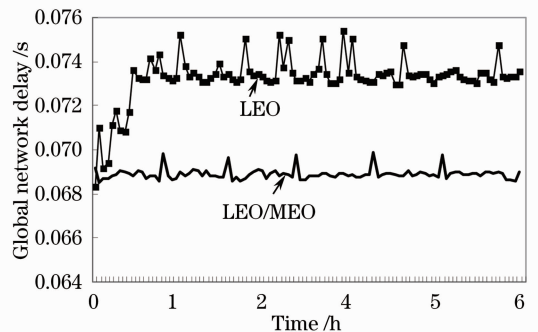


图 11 双层卫星光网络时延统计
Fig. 11 Statistics of optical satellite network delay

增大 1 ms 以上。由于仿真中应用了自适应的路由度量统计,双层网络平均时延和时延抖动较单层网络均有显著下降。考虑到中轨卫星数量不足低轨卫星 1/10,中轨卫星的分流作用不容小视,从另一侧面说明稀疏中轨卫星配置的必要性。

6.3 卫星光网络的扩展应用

1) 空间量子保密通信

安全问题始终是困扰信息网络尤其是无线网络的一个大问题。量子隐形传态和不可复制特性为信息传输的绝对安全提供了理论基础。受介质的影响,光纤中无中继量子保密通信距离有限。而在自由空间,由于没有色散和吸收,量子密钥的远程分发成为可能。空间光网络的组建成量子保密通信提供了天然通道,理论上可以实现远大于光纤传输极限的量子密钥分发,为空间信息安全提供了全新的策略。

2) 对地观测/数据中继一体化

高速的数据传输是对地观测卫星与数据中继卫星共同的需求基础。目前高分辨率对地观测需要借助低轨卫星,而通信则主要集中在同步轨道卫星(铱除外)。卫星功能分化的原因之一是卫星载荷有限,特别是工作于微波频段的天线和处理系统体积、重量、功耗都相当大,通信卫星在搭载大孔径天线之后没有更多的剩余空间和能量留给观测设备;低轨侦察卫星也面临同样的问题。小型化、低功耗激光通信终端的出现可以化解这一矛盾。低轨成像侦察卫星能够携带用于高速数据中继的激光通信终端,如 ESA 的 Terra-SAR-X 和即将发射的 TanDEM-X 都属于这种情况。伴随星载激光通信终端进一步小型化,再加上星载激光合成孔径雷达的应用,卫星能够同时搭载多个不同类型的通信和成像终端,届时组网运行的低轨卫星就能够兼具对地观测和数据中继的功能。

3) 空间处理能力共享

得益于高速发展的现代微电子技术,星载处理系统进步的速度要高于其他系统。卫星在轨道上工作几年之后就会出现由于处理能力短缺而限制任务升级的问题。卫星光网络组建后可以用高速激光链路将卫星互联,共享星载处理资源,实现星载处理器与其他载荷的非同步升级,以相对小的代价提升系统的效能。

7 结 论

1977 年 ESA 一纸合同揭开了卫星光通信的序幕。30 多年后,卫星光通信已经完成了两代更替,正在酝酿第三代试行方案。卫星光网络也已经有了相对成熟的硬件条件和实验基础,在 Alpha SAT 和 EDRS 计划中初现端倪。瞄准未来网络的发展趋势,对卫星光网络体系结构进行探索,针对激光链路的特点,进行分级分层的优化设计,明确其中的难点,能够对风险进行分解和有效规避。需要说明的是,文中所提的双层卫星光网络只是代表一种设计思路,并不是一成不变的教条。在今后的发展中,需要根据实际的技术进步和需求索引不断调整优化,才能避免重蹈 Teledesic 和 Celestri 的覆辙。

参 考 文 献

- 1 Zhao Shanghong. Introduction to Laser Satellite Communication[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2005
赵尚弘. 卫星光通信导论[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2005
- 2 V. W. S. Chan. Optical space communication[J]. *IEEE. J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2000, **6**(6): 959~975
- 3 Zoran Sodnik, Hanspeter Lutz, Bernhard Furch *et al.*. Optical satellite communications in Europe[C]. *SPIE*, 2010, **7587**: 758705
- 4 Liu Liren. Laser communications in space II test and verification techniques on the ground[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(2): 1~9
刘立人. 卫星激光通信 II-地面检测和验证技术[J]. *中国激光*, 2007, **34**(2): 1~9
- 5 Toni Tölker-Nielsen, Gotthard Oppenhaeuser. In orbit test result of an operational optical intersatellite link between ARTEMIS and SPOT4, SILEX[C]. *SPIE*, 2002, **4635**: 1~15
- 6 Takashi Jono, Yoshihisa Takayama, Nobuhire Kura *et al.*. OICETS on-orbit laser communication experiments[C]. *SPIE*, 2006, **6105**: 610503
- 7 B. Smutny, H. Kaempfer, G. Muehlnikel *et al.*. 5.6 Gbps optical intersatellite communication link[C]. *SPIE*, 2009, **7199**: 719906
- 8 D. Giggenbach, J. Horwath, M. Knapek. Optical data downlinks from earth observation platforms[C]. *SPIE*, 2009, **7199**:

719903

- 9 Shiro Yamakawa, Tatsuyuki Hanada, Hiroki Kohat. JAXA's efforts toward next generation space data-relay satellite using optical inter-orbit communication technology[C]. *SPIE*, 2010, **7587**: 75870P
- 10 Angle Alonso, Marcos Reyes, Zoran Sodnik. Performance of satellite-to-ground communications link between ARTEMIS and the optical ground station[C]. *SPIE*, 2004, **5572**: 372~383
- 11 Mori Toyoshima, Shiro Yamakawa, Toshihiko Yamawaki *et al.*. Long-term statistics of laser beam propagation in an optical ground-to-geostationary satellite communications link[J]. *IEEE. Trans. Antennas & Propag.*, 2005, **53**(2): 842~850
- 12 Keith E. Wilson, Joseph Kovalik, Abhijit Biswas. Preliminary results of the OCTL to OICETS optical link experiment. [C] *SPIE*, 2010, **7587**: 758703
- 13 Mori Toyoshima, Yoshihisa Takayama, Hiroo Kunimori *et al.*. Data analysis results from the KODEN experiments[C]. *SPIE*, 2007, **6709**: 67091C
- 14 Yoshihisa Takayama, Morio Toyoshima, Yozo Shoji *et al.*. Expanded laser communications demonstrations with OICETS and ground stations[C]. *SPIE*, 2010, **7587**: 75870D
- 15 Isaac. Kim, Brian Riley, Nicholas M. Wong *et al.*. Lessons learned from the STRV2 satellite-to-ground lasercom experiment[C]. *SPIE*, 2001, **4272**: 1~15
- 16 Jon Hamkins, Samuel Dolinar, Dariush Divsalar *et al.*. Capacity and capacity sensitivity of soft output optical channels[C]. *SPIE*, 2001, **3932**: 170~180
- 17 Wu Jili, Zhao Shanghong, Xu Jie *et al.*. Study of capacity of coherent pulse-position modulation channel and maximization of information transmitting rate[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4): 643~647
吴继礼, 赵尚弘, 胥杰等. 相干光脉冲位置调制信道容量及传信率最大化研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(4): 643~647
- 18 W. Thomas Roberts, Malcolm, W. Wright *et al.*. OCTL to OICETS optical link experiment electro-optical systems[C]. *SPIE*, 2010, **7587**: 75870Y
- 19 J. Kovalik, A. Biswas, K. Wilson. Data Products for the OCTL to OICETS optical link experiment[C]. *SPIE*, 2010, **7587**: 75870C
- 20 Yuan Hongwu, Mei Haiping, Huang Yinbo *et al.*. Time delay of atmospheric aerosol particles and its effect on the path difference of laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(7): 1945~1949
袁宏武, 梅海平, 黄印博等. 大气气溶胶粒子的时延效应及其对激光程差的影响分析[J]. *光学学报*, 2010, **30**(7): 1945~1949
- 21 Zoran Sodnik, Josep Perdigues, Armengol *et al.*. Adaptive optics and ESA's optical ground station[C]. *SPIE*, 2009, **7464**: 746406
- 22 M. Troy, J. Roberts, S. Guiwits *et al.*. Performance of the optical communication adaptive optics test-bed[R]. IPN Progress Report, 2005
- 23 M. W. Wright, M. Srinivasan, K. Wilson. Improved optical communications performance using adaptive optics with an avalanche photodiode detector[R]. IPN Progress Report, 2005
- 24 Zhao Shanghong. Optical Satellite Network Technologies[M]. Beijing: Science Press, 2010
赵尚弘. 卫星光网络技术[M]. 北京: 科学出版社, 2010
- 25 Vincent W. S. Chan. Optical satellite networks[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2003, **21**(11): 2811~2827
- 26 Chen Yabin, Zhao Shanghong, Zhu Ruiye *et al.*. Satellite optical communication in free-space[J]. *Systems Engineering and Electronics*. 2003, **25**(9): 1173~1175
陈娅冰, 赵尚弘, 朱蕊彦等. 自由空间中卫星激光通信[J]. *系统工程与电子技术*, 2003, **25**(9): 1173~1175
- 27 Liu Tao, Zhuang Maolu, Zhao Shanghong. The study of anti-vibration technique in free-space optical communication[J]. *Optical Communication Technology*, 2004, **28**(1): 46~48
刘涛, 庄茂录, 赵尚弘. 自由空间光通信中的振动抑制研究[J]. *光通信技术*, 2004, **28**(1): 46~48
- 28 Li Yongjun, Zhao Shanghong, Xu Jie. Research on BER of laser satellite communication system under Rayleigh vibration[J]. *J. Air Force Engineering University*, 2006, **7**(5): 48~50
李勇军, 赵尚弘, 胥杰. 瑞利振动下空间光通信误码率研究[J]. *空军工程大学学报*, 2006, **7**(5): 48~50
- 29 Zhao Shanghong, Liu Tao. Error analysis of laser beam pointing in satellite optical communication [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2005, **26**(1): 44~46
赵尚弘, 刘涛. 卫星光通信光束对准误差分析[J]. *半导体光电*, 2005, **26**(1): 44~46
- 30 Liu Tao, Zhao Shanghong, Fang Shaoqiang *et al.*. Analysis of the effects of vibration and atmospheric turbulence on satellite-ground links[J]. *J. Air Force Engineering University*, 2005, **6**(2): 55~58

- 刘涛, 赵尚弘, 方绍强等. 振动和大气湍流对星地光通信链路性能的影响[J]. 空军工程大学学报, 2005, **6**(2): 55~58
- 31 Xu Jie, Zhao Shanghong, Li Zhen *et al.*. Improving atmospheric optical communication with adaptive inverse simulation[J]. *Optical and control*, 2006, **13**(4): 69~71
- 胥杰, 赵尚弘, 李真等. 利用自适应逆模拟提高大气光通信性能[J]. 电光与控制, 2006, **13**(4): 69~71
- 32 Liang Ping, Zhao Shanghong, Li yongjun. Study on optical satellite networks based on WDM[J]. *Optical Communication Technology*, 2006, **30**(9): 44~46
- 梁平, 赵尚弘, 李勇军. 基于波长路由的卫星光网络研究[J]. 光通信技术, 2006, **30**(9): 44~46
- 33 Li Yongjun, Zhao Shanghong, Zhang Dongmei *et al.*. Networking technology of laser communication in the platform of formation flight satellite[J]. *Optical Communication Technology*, 2006, **30**(10): 47~49
- 李勇军, 赵尚弘, 张冬梅等. 空间编队卫星平台激光通信链路组网技术[J]. 光通信技术, 2006, **30**(10): 47~49
- 34 Li Yongjun, Zhao Shanghong, Wu Jili *et al.*. Performance research of multiple access in optical communication of satellite formation flying based on Mach-Zehnder[J]. *Ordnance Technology*, 2008, **29**(6): 759~763
- 李勇军, 赵尚弘, 吴继礼等. 基于 Mach-Zehnder 干涉仪的编队卫星光通信多址接入性能研究[J]. 兵工学报, 2008, **29**(6): 759~763
- 35 Li Yongjun, Zhao Shanghong, Wu Jili. Performance research of multiple access of satellite formation flying laser communication in atmospheric turbulence[C]. *SPIE*, 2007, **6795**: 679507
- 36 Li Yongjun, Zhao Shanghong, Li Xiaoliang. Researching on dimensioning of optical satellite network based on layered protocol[J]. *Optical Communication Technology*, 2006, **30**(4): 43~44
- 李勇军, 赵尚弘, 李晓亮. 基于分层协议的卫星光网络组网研究[J]. 光通信技术, 2006, **30**(4): 43~44
- 37 Dai Guoliang, Zhao Shanghong, Li Yongjun *et al.*. Analysis on link performance in the three-layer optical satellite networks[J]. *Communication Technology*, 2007, **40**(12): 375~378
- 戴国梁, 赵尚弘, 李勇军等. 三层卫星光网络链路性能分析[J]. 通信技术, 2007, **40**(12): 375~378
- 38 Li YongJun, Zhao Shanghong, Wu Jili. A novel two-layered optical satellite network of LEO/MEO with zero phase factor[J]. *Science China Information Sciences*, 2010, **3**(7): 1261~1276
- 李勇军, 赵尚弘, 吴继礼. 零相位因子 LEO/MEO 双层卫星光网络设计[J]. 中国科学 F 辑, 2010, **3**(7): 1261~1276
- 39 Li Yongjun, Zhao Shanghong, Wu Jili *et al.*. Designing of a novel optical two-layered satellite network[C]. Wuhan: Computer Science and Software Engineering, 2008. 976~979
- 40 Li YongJun, Zhao Shanghong, Wu Jili *et al.*. Designing of optical two-layered satellite network of LEO/MEO with global coverage [J]. *J. Optoelectronics Laser*, 2009, **20**(3): 324~328
- 李勇军, 赵尚弘, 吴继礼等. 全球覆盖稳定拓扑 LEO/MEO 双层卫星光网络设计[J]. 光电子·激光, 2009, **20**(3): 324~328
- 41 Otakar Wilfert, Hennes Henniger, Zdenek Kolk. Optical communication in free space[C]. *SPIE*, 2008, **7141**: 714102
- 42 Li Tiansong, Yuan Weichao, Yi Miao *et al.*. Time jitter effects on bit error probability in multi-pulse positon modulation satellite optical communication[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 26~30
- 李天松, 袁伟超, 易森等. 多脉冲位置调制卫星光通信中时钟抖动对比特错误概率影响[J]. 光学学报, 2010, **30**(1): 26~30
- 43 Chen Xinglin, Zheng Yanhong, Wang Yan. Influence of spot noise in inter-satellite optical communications and suppression algorithm[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(3): 743~747
- 陈兴林, 郑燕红, 王岩. 光斑噪声对星间光通信的影响及抑制算法[J]. 中国激光, 2010, **37**(3): 743~747