



专题：天地一体化信息网络

天地一体化信息网络激光通信系统发展设想

孙建锋

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要: 空间激光通信技术具有通信速率高、保密性好、抗干扰能力强等优点, 成为近年来的研究热点, 并相继在天基信息网络中得到广泛应用。首先对国际激光通信技术的发展态势进行了分析, 然后从我国天地一体化信息网络的需求出发, 对不同的应用场景上的激光通信系统进行了分析, 提出了我国天地一体化信息网络激光通信系统发展的建议。

关键词: 天地一体化信息网络; 空间激光通信; 链路能力; 通信体制

中图分类号: TN929.13

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2017319

Development of laser communication system in space-ground integrated information network

SUN Jianfeng

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

Abstract: The space laser communication technology has the advantages of high communication speed, good confidentiality and strong anti-interference ability, and has become a research hot spot in recent years and has been widely used in the space-based information network one after another. First of all, the development trend of international laser communication technology was analyzed. Then based on the demand of our country's space-ground integrated information network, the laser communication system on different application scenarios was analyzed, and the suggestion of the development of laser communication system in space-ground integrated information network was put forward.

Key words: space-ground integrated information network, space laser communication, link ability, communication system

1 引言

随着空间技术的发展, 人类活动越来越多地从地面向太空发展。截至 2017 年 4 月, 全球在轨卫星 1 000 多颗, 其中美国在轨卫星 549 颗; 中国在轨卫星 139 颗, 超过俄罗斯 8 颗, 仅次于美国。

到 2020 年, 中国在轨卫星数量将超过 200 颗。光学成像卫星、高光谱卫星、SAR 卫星、红外成像卫星等, 每时每刻都在产生巨大数据, 目前基于微波的技术手段已成为数据传输瓶颈, 急需发展新型的信息传输技术手段, 而激光通信技术是未来宽带远距通信的发展趋势。

收稿日期: 2017-11-10; 修回日期: 2017-12-06

2001 年, 欧洲太空局 (ESA) 的 SILEX 计划成功开展了国际上首次星间激光通信技术的在轨演示, 通信速率为 50 Mbit/s, 采用强度调制/直接探测通信体制, 该计划验证了星间激光通信技术的可行性, 具有划时代的意义^[1-12]。随后在 2007 年底, 德国宇航局 (DLR) TerraSAR-X 卫星实现了与美国 NFIRE 卫星之间的相干激光通信在轨试验, 通信速率达到 5.6 Gbit/s, 采用相位调制/相干探测通信体制。随后美国、中国和日本都相继开展了激光通信的在轨试验^[13-22]。

在经历数次试验之后, 各国均推出了自己的空间激光通信计划, 具有代表性的包括 ESA 的 EDRS 计划、美国的 LCRD 计划、日本的 JDRS 计划, 这标志着激光通信从试验阶段正式转入应用阶段。

2 空间激光通信系统的性能评价

空间激光通信系统与地面光纤通信系统既有相通点, 也有很大的差异。主要表现在以下几个方面。

- 链路距离长且无中继。空间激光通信链路距离都在几千千米以上, 甚至可达数万千米, 链路损耗巨大。空间激光通信链路不像光纤通信链路那样可以采用中继放大和信号再生的方法进行远距离传输, 因此不仅对激光终端信号接收的灵敏度要求非常高, 而且对发射信号光功率要求也非常高。
- 通信链路无色散。空间激光通信链路为真

空和大气, 无色散或者色散很小, 相比光纤通信链路, 主要解决的就是光纤的色散、损耗、非线性等问题, 因此为了提升通信速率, 通信体制逐渐从强度调制/直接探测向相位调制/相干探测通信体制转变。

- 体积、重量和功耗资源要求苛刻。卫星平台载荷不同于地面设备, 资源要求苛刻, 需要在有限的资源消耗情况下实现综合性能的最优化设计。
- 背景光噪声影响大。光纤通信链路是封闭系统, 不存在外部背景光噪声的影响。但空间激光通信系统链路是开放的, 不仅存在背景光干扰, 而且还是动态变化的, 这一点在设计时应当给予充分重视。

评价一个空间激光通信系统不能简单地以通信速率进行, 按照国际认可的评价标准, 激光链路的性能可以用通信速率乘以链路距离的平方进行表征:

$$Q = R_b \cdot L^2 \quad (1)$$

其中, Q 为链路性能, 单位为 $\text{Gbit/s} \cdot 10^6 \text{ km}^2$, R_b 为通信速率, 单位为 Gbit/s , L 为链路距离, 单位为 10^3 km 。表 1 列出了几种典型的激光通信链路的性能对比。

从表 1 可以看出, 中继卫星激光通信链路的链路性能指标要求最高, 因此采用相干通信体制是唯一的选择。而对于低轨卫星星座, 由于链路性能指标较低, 需要从成本和资源两个方面决定选择何种通信体制。深空通信系统对灵敏度要求

表 1 几种典型的激光通信链路的性能对比

计划名称	通信速率/ ($\text{Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$)	链路距离/km	通信体制	链路性能/ ($\text{Gbit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^2$)
ESA 的 SILEX 计划	0.050	4.5×10^4	IM/DD	1.0125×10^8
DLR 的 TerraSAR-X	5.6	6×10^3	BPSK/Homodyne	2.016×10^8
ESA 的 EDRS	1.8	4.5×10^4	BPSK/Homodyne	3.645×10^9
美国的 LCRD	2.48	3.8×10^4	DPSK/Self-Homodyne	3.581×10^9
美国的 LLCD	0.6	3.8×10^5	PPM/Single Photon	8.664×10^{10}
中国的 GEO-GEO	40	8×10^5	BPSK/Homodyne	2.56×10^{11}
中国的 LEO-LEO	1	5×10^3	IM/DD 或 DPSK/Self-Homodyne	2.5×10^7



极高，并且接收系统往往在地面，对资源约束相对宽松，此时采用单光子探测技术是最佳选择。

3 空间激光通信系统的“三化”设计

空间激光通信系统是复杂的光机电热一体化载荷，按照传统研制思路，各自为政，很难形成产能和实现组网。因此天地一体化信息网络激光系统需按照标准化、系列化、通用化的要求进行设计。

空间激光通信链路按照不同的应用场景，可以分解为如下几类，见表 2。

在表 2 中的通信链路中，包括了星间和星地激光通信链路，其中 LEO-Ground 的激光链路由于通信距离短，不太适合未来的激光数据传输应用。因此重点分析其他几个应用场景。

根据几类链路类型，涉及几种激光通信系统，见表 3。

表 2 激光通信链路分类

链路类型	典型技术指标	主要应用场景
GEO-GEO	链路距离：8 万千米（最大） 通信速率：5~40 Gbit/s	全球信息中继
LEO-GEO	链路距离：4.5 万千米（最大） 通信速率：5~40 Gbit/s	用户星数据高速接入
LEO-LEO	链路距离：3 000~6 000 km 通信速率：1~10 Gbit/s	用户星星间激光链路
GEO-Ground	链路距离：3.8 万千米（最大） 通信速率：5~40 Gbit/s	GEO 高速激光馈电链路
LEO-Ground	链路距离：500~2 000 km 通信速率：5~40 Gbit/s	LEO 高速星地激光链路

表 3 天基信息网涉及的激光通信系统

链路类型	系统组成及主要指标
G-G LCT	激光 PAT：30°锥角范围，跟踪精度 1 urad，跟踪灵敏度-60 dBm 激光处理机：通信收发速率 1~40 Gbit/s 链路距离：8 万千米（最大） 接收灵敏度：-42 dBm@10 Gbit/s 通信波长：1 550 nm 波段 隔离方式：偏振隔离
G-O LCT	激光 PAT：30°锥角范围，跟踪精度 1 urad，跟踪灵敏度-60 dBm 激光处理机：通信收发速率 1~40 Gbit/s 链路距离：3.8 万千米（最大） 接收灵敏度：-42 dBm@10 Gbit/s 通信波长：1 550 nm 波段 隔离方式：偏振隔离
L-G LCT	激光 PAT：俯仰正负 100°，方位正负 178°，跟踪精度 1 urad 激光处理机：通信发射速率 1~10 Gbit/s 链路距离：30 000~45 000 km 发射激光功率：1~5 W 通信波长：1 550 nm 波段 隔离方式：偏振隔离
L-L LCT	激光 PAT：60°锥角范围，跟踪精度 1 urad 激光处理机：通信收发速率 1~10 Gbit/s 链路距离：1 000~6 000 km 发射激光功率：1~2.5 W
LEO-Ground	激光 PAT：俯仰正负 100°，方位正负 178°，跟踪精度 1 urad 激光处理机：通信发射速率 5~40 Gbit/s 链路距离：500~2 000 km 发射激光功率：1~2.5 W 通信波长：1 550 nm 波段

4 空间激光通信系统的技术发展趋势

4.1 激光通信波长选择

目前,国际上实现在轨验证的激光通信波段有 3 个: 800 nm、1 064 nm 和 1 550 nm。从长远的波长选择上看,激光波长会向短波方向发展,但是实际应用波长需要综合考虑现有的技术现状。制约激光通信波长向短波方向发展的主要因素包括以下两个方面。

- 激光光源水平。空间激光通信要求光源为单模光源,并且实现远距离空间激光通信要求光源的功率需要达到 W 级以上,目前能达到这个量级的光源只有 532 nm、1 064 nm 和 1 550 nm 3 个波段。考虑到 1 550 nm 波段器件商业化更为成熟,短期 1 550 nm 波段更具竞争力。
- 激光终端光跟瞄水平。与光纤通信不同,空间激光通信需要高精度的跟瞄建立通信链路,激光波长越短,激光发散角越小。以 532 nm 波长为例,250 mm 的望远镜的光束发散角约为 5.2 urad 左右,因此要求光跟瞄的精度达到 0.52 urad。目前的光跟瞄精度还很难达到这个水平,与目前光跟瞄水平相匹配的波长是 1 064 nm 和 1 550 nm 两个波段。

综合上面两点因素,目前适合我国天地一体化信息网络的波长为 1 550 nm 波段。

4.2 激光通信技术体制选择

激光通信技术体制分为相干通信体制和

非相干通信体制两大类。对于高速激光通信系统,合适的调制方式有 OOK、BPSK、DPSK、QPSK 等几种。根据表 1 的激光链路性能,当 $Q > 1\,000\text{ Gbit/s} \cdot 10^6\text{ km}^2$ 时,选择相干激光通信体制更为合适;当 $Q < 1\,000\text{ Gbit/s} \cdot 10^6\text{ km}^2$ 时,可以选择相干通信体制,也可以选择非相干通信体制。

对应于天地一体化信息网络,高轨宽带骨干网应采用相干激光通信体制,低轨用户接入网可以采用相干通信体制,也可以采用非相干通信体制。如果要求全天时不间断工作,应采用相干通信体制。

4.3 激光跟瞄技术发展趋势

激光跟瞄技术主要用于克服卫星平台的微振动和轨道相对运动的影响。随着激光跟瞄水平的提升,平台的振动抑制从最早的主被动隔振结合已经发展到目前的主动隔振。激光跟瞄技术的发展现状和趋势见表 4。

4.4 空间组网激光通信系统的发展趋势

目前在轨空间激光通信系统均采用的是单用户激光通信终端,这种激光通信终端对于用户接入非常不利。近年来,以长春理工大学为代表的研究团队开展了多用户激光通信终端的研究。

4.5 激光通信测量一体化技术

天地一体化激光通信系统的速率均在 1 Gbit/s 以上,通过通信码片相关测距和码片相位精密测量,可以在不影响通信性能的前提下实现毫米级激光测距的精度。通过双向单程测量方法,还可以实现不同卫星平台之间的时间同步。通过通信

表 4 激光跟瞄技术的发展现状和趋势

激光跟瞄方式	激光跟瞄指标	振动抑制方法	代表终端
有独立信标非相干跟踪	跟踪精度: 1 urad 跟踪带宽: 100 Hz	主被动振动抑制	SOUT
有独立信标非相干跟踪	跟踪精度: 1 urad 跟踪带宽: 800 Hz	主动振动抑制	SILEX、LUCE
无独立信标相干跟踪	跟踪精度: 1 urad 跟踪带宽: 1 000 Hz	主动振动抑制	TerraSAR-X LCT、EDRS LCT、Sentinel LCT 等
无独立信标无机械跟踪	跟踪精度: 0.1 urad 跟踪带宽: 10 000 Hz	主动振动抑制	下一代空间激光通信终端



表 5 天地一体化信息网络激光通信链路

	组网类型	性能指标	备注
高轨卫星骨干网	可重构双向环形网络 节点数：6	通信体制：WDM 相位调制/相干探测 通信速率：5~40 Gbit/s	通过 WDM 实现军民融合，共享骨干网络
低轨卫星接入网	网状拓扑双向网络 节点数：>100	链路距离：1 000~6 000 km 通信速率：1~10 Gbit/s	
高低轨层间链路	双向非对称激光链路	上行 5~40 Gbit/s 下行 1 Gbit/s	

链路的时钟恢复技术，可以实现卫星平台之间的高精度频率传递。

利用通信测量一体化技术，在实现时间同步和频率传递的基础上，可以借助全球众多的通信卫星，实现全球的高覆盖、高精度导航定位。

5 天地一体化信息网络激光通信系统建议

通过前面的对比和梳理，结合天地一体化信息网络需求，建议空间激光通信链路的终端和性能指标见表 5。

6 结束语

经过近 30 年的发展，空间激光通信技术已经从原理概念验证到实际工程应用阶段，各种通信体制百花齐放，包括 OOK、BPSK、DPSK、QPSK 等，主流通信波长也有 1 550 nm 和 1 064 nm 两个波段。激光通信终端有两个发展趋势：激光终端根据应用场景不同更加细分化和专业化，如宽带骨干网激光终端和低轨用户接入网激光终端；激光终端功能多元化，激光终端具备了调制和解调功能，因此目前激光终端由单一功能向激光通信、激光测距、激光成像等多功能复合。随着我国天地一体化信息网络的逐步实施，空间激光通信技术必将发挥越来越大的作用。

参考文献：

- [1] COCKSHOTT R A, PURLL D J. SILEX acquisition and tracking sensors[J]. Photonics West, 1995(2381): 206-214.
- [2] DAVI P. High-stability coatings for space optics: application to SILEX program[C]//International Society for Optics and Pho-

- tonics, November 4, 1994. [S.l.:s.n.], 1994: 498-505.
- [3] COSSON F, DOUBRERE P, PEREZ E. Simulation model and on-ground performances validation of the PAT system for SILEX program[J]. Proceedings of SPIE, 1991: 1417.
- [4] FLETCHER G D, HICKS T R, LAURENT B. The SILEX optical interorbit link experiment[J]. Electronics & Communication Engineering Journal, 1991, 3(6): 273-279.
- [5] PLANCHE G, LAURENT B, GUILLEN J C, et al. SILEX final ground testing and in-flight performance assessment[J]. Proceedings of SPIE, 1999(3615): 64-77.
- [6] PEREZ E, BAILLY M, PAIROT J M. Pointing acquisition and tracking system for SILEX inter satellite optical link[J]. Proc Spie, 1989(1111): 277-288.
- [7] SODNIK Z. Optical satellite communications in Europe[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7587(6): 4.
- [8] TOLKER-NIELSEN T, GUILLEN J C. SILEX: the first European optical communication terminal in orbit[J]. Esa Bulletin.bulletin Ase.european Space Agency, 1998(96): 42-44.
- [9] OPPENHAUSER G. In-orbit test result of an operational optical intersatellite link between ARTEMIS and SPOT4, SILEX[J]. Proceedings of SPIE, 2002(4635): 1-15.
- [10] NAKAGAWA K, YAMAMOTO A. Preliminary design of laser utilizing communications equipment (LUCE) installed on optical inter-orbit communications engineering test satellite (OICETS)[J]. Proceedings of SPIE, 1995(2381): 14-25.
- [11] NAKAGAWA K, YAMAMOTO A. Engineering model test of LUCE (Laser Utilizing Communications Equipment)[J]. Proceedings of SPIE, 1996: 114-120.
- [12] NAKAGAWA K, YAMAMOTO A, TOYODA M. Performance test result of LUCE (laser utilizing communications equipment) engineering model[J]. Proceedings of SPIE, 2000(3932): 68-76.
- [13] SEEL S, KAMPFNER H, WANDERNOTH B, et al. Space to ground bidirectional optical communication link at 5.6 Gbps and EDRS connectivity outlook[C]//IEEE Aerospace Conference, Mar 5-12, 2011, Big Sky, USA. New Jersey: IEEE Press, 2011: 1-7.
- [14] GREGORY M, HEINE F, LANGE R. Laser communication terminals for the European data relay system[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8246(8): 8.
- [15] HEINE F, SEEL S. LCT for the European data relay system: in

- orbit commissioning of the Alphasat and Sentinel 1A LCTs[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9354(1): 93540G-93540G-6.
- [16] LANGE R, HEINE F, MOTZIGEMBA M, et al. Roadmap to wide band optical GEO relay networks[C]//Military Communications Conference, Oct 29-Nov 1, 2012, Orlando, USA. New Jersey: IEEE Press, 2013: 1-5.
- [17] GIGGENBACH D, MOLL F, SODNIK Z. Transmitter diversity verification on ARTEMIS geostationary satellite[J]. Optical Engineering, 2014, 8971(2015): 450-453.
- [18] ZECH H, HEINE F, TRÖNDLE D, et al. LCT for EDRS: LEO to GEO optical communications at 1.8 Gbit/s between Alphasat and Sentinel 1a[C]//SPIE Security+Defence. [S.l.:s.n.], 2015: 96470J.
- [19] Laser communication relay demonstration (LCRD). (2015-01-23) [2017-11-10]. <http://www.doc88.com/p-3107559461975.html>.
- [20] ROBERTS W T, ANTOS D, CROONQUIST A, et al. Overview of Ground Station 1 of the NASA space communications and navigation program[C]//SPIE LASE International Society for Optics and Photonics. [S.l.:s.n.], 2016: 97390B.
- [21] STEWART J B, MOORES J D, FLETCHER A S. Comparing adaptive optics approaches for NASA LCRD ground station #2[J]. The International Society for Optical Engineering, 2013, 8610(10): 86100M-86100M-11.
- [22] WILSON K E, JR L C R. Recent developments in adaptive optics for LCRD optical ground station at table mountain[C]//International Conference on Space Optics Systems and Applications. [S.l.:s.n.], 2014.

[作者简介]



孙建锋 (1978-), 男, 博士, 中国科学院上海光学精密机械研究所研究员, 主要从事激光通信及相干激光雷达方面的研究工作。