

空间信息网络与激光通信发展现状及趋势

姜会林^{1,2,3}, 付强^{1,2,3}, 赵义武^{1,2,3}, 刘显著^{1,2,3}

- (1. 长春理工大学空间光电技术国家地方联合工程研究中心, 吉林 长春 130022;
2. 长春理工大学光电测控与光信息传输技术教育部重点实验室, 吉林 长春 130022;
3. 长春理工大学空地激光通信技术国防重点学科实验室, 吉林 长春 130022)

摘要: 天地一体化信息网络是科技强国的重要标志, 根据国家整体规划, 到 2030 年将建成全球覆盖、按需服务、随域接入、安全可信的信息网络, 服务国防建设和社会发展。空间激光通信是实现信息高速传输和保密安全的重要手段, 将在构建天地一体化网络中发挥重要作用。首先从概念内涵与系统架构、研究现状与发展趋势、总体目标与主要难点 3 个方面介绍了天地一体化网络, 然后总结了空间激光通信的概念和特点、研究现状和发展趋势, 以期为我国天地一体化信息网络的构建提供有益参考。

关键词: 天地一体化; 空间信息网络; 激光通信; 卫星

中图分类号: TN929.1

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2019.00113

Development status and trend of space information network and laser communication

JIANG Huilin^{1,2,3}, FU Qiang^{1,2,3}, ZHAO Yiwu^{1,2,3}, LIU Xianzhu^{1,2,3}

1. National and Local Joint Engineering Research Center of Space Optoelectronics Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China
2. Fundammmontal Science on Space-Ground Laser Communication Technology Laboratory, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China
3. Key Laboratory of Education Ministry Optoelectronics Measurement & Control and Optical Information Transfer Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China

Abstract: An integrated space-earth information network is an important symbol of a strong country in science and technology. According to China's overall plan, an information network with global coverage, on-demand services, local access and security and credibility will be built by 2030 to serve national defense and social development. Space laser communication is an important means to realize high speed information transmission and security. Firstly, space-earth integration network was introduced from three aspects: concept connotation and system architecture, research status and development trend, overall goal and main difficulties. Then, the concept, characteristics, research status and development trend of space laser communication were summarized in order to provide useful reference for the construction of space-earth integrated information network in China.

Key words: space-earth integration, spatial information network, laser communication, satellite

收稿日期: 2019-06-02; 修回日期: 2019-06-18

通信作者: 付强, cust_fuqiang@163.com

基金项目: 面向 2035 的空间信息网络安全与激光通信组网发展战略研究资助项目 (No.L1824046)

Foundation Item: The Development Strategy Research on Spatial Information Network Security and Laser Communication Network for 2035 (No.L1824046)

1 空间信息网络

1.1 空间信息网络的概念内涵与系统组成

天地一体化信息网络是指以地面网为依托，以天基网为拓展，采用统一的网络架构、技术体制、标准规范，实现天、空、地、海互联互通，其内涵是实现多种功能平台之间的数据融合与信息共享^[1-3]。

天地一体化信息网络系统包括网络架构、网络协议和网络设施，天地一体化网络架构如图 1 所示。

1) 网络架构

网络架构包含骨干网、接入网和子网。

① 骨干网：天基、地基双骨干网络。

② 接入网：卫星、飞机（飞艇）、地面之间的接入网络。

③ 子网：卫星星座、飞机群、地面基站用户等构成的多个节点网络。

2) 网络协议

网络协议采用 TCP/IP、CCSDS 和 DTN 相结合的协议体系，天地一体化信息网络协议体系如图 2 所示。

3) 网络设施

网络设施包括通信基础设施、网络基础设施和应用基础设施，天地一体化网络组成如图 3 所示。

1.2 空间信息网络的研发现状与发展趋势

1) 空间信息网络的国外发展现状

美国空间信息网络研究起步最早，技术也最为成熟^[4-5]，美国提出的主要空间信息网络如表 1 所示。

2) 空间信息网络的国内发展现状

我国空间信息网络发展呈现“天弱地强”特征。目前在轨卫星超过 200 颗，其中，通信卫星有 34 颗，中继卫星有 3 颗，最高通信速率为 622 Mbit/s。地面网络发展情况为互联网普及率达 55.8%。

目前，我国在空间信息网络方面有代表性的规划如下。

中国航天科技集团提出“鸿雁”全球卫星通信系统，由 300 颗低轨道小卫星组成，将实现“沟通连接万物、全球永不失联”。2018 年 12 月 29 日，长征二号丁运载火箭成功将“鸿雁”星座首颗试验星送入预定轨道，“鸿雁”星座组成及首发星如图 4 所示。

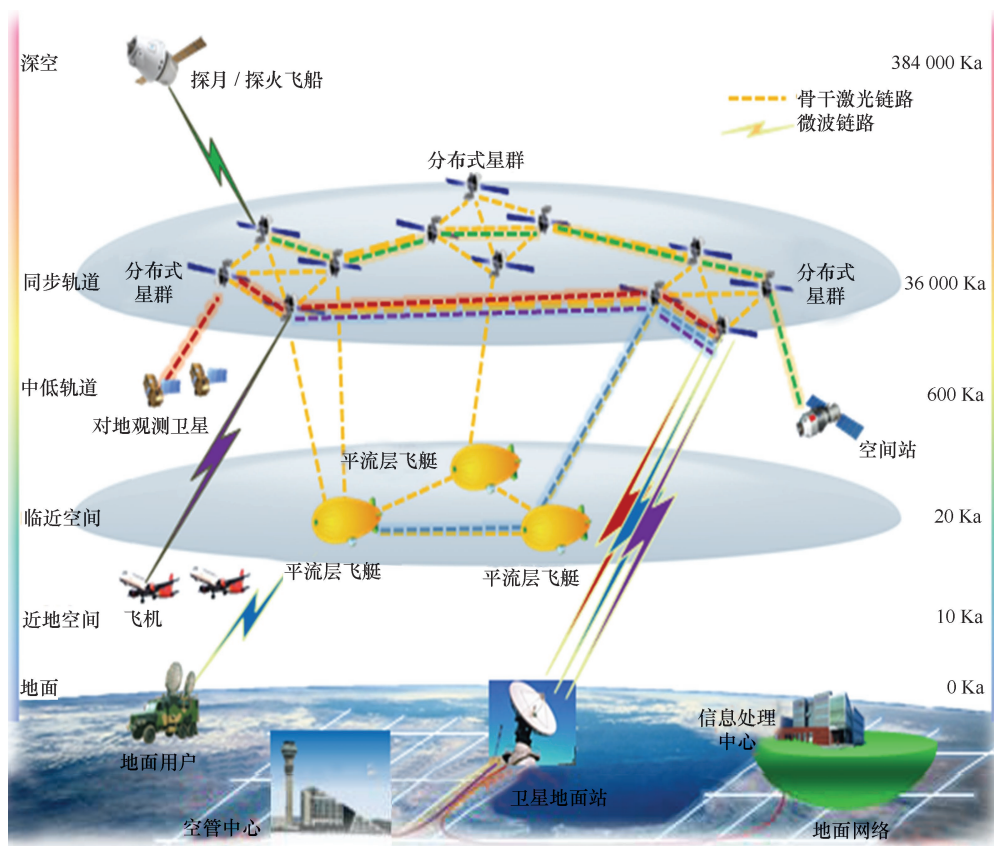


图 1 天地一体化网络架构

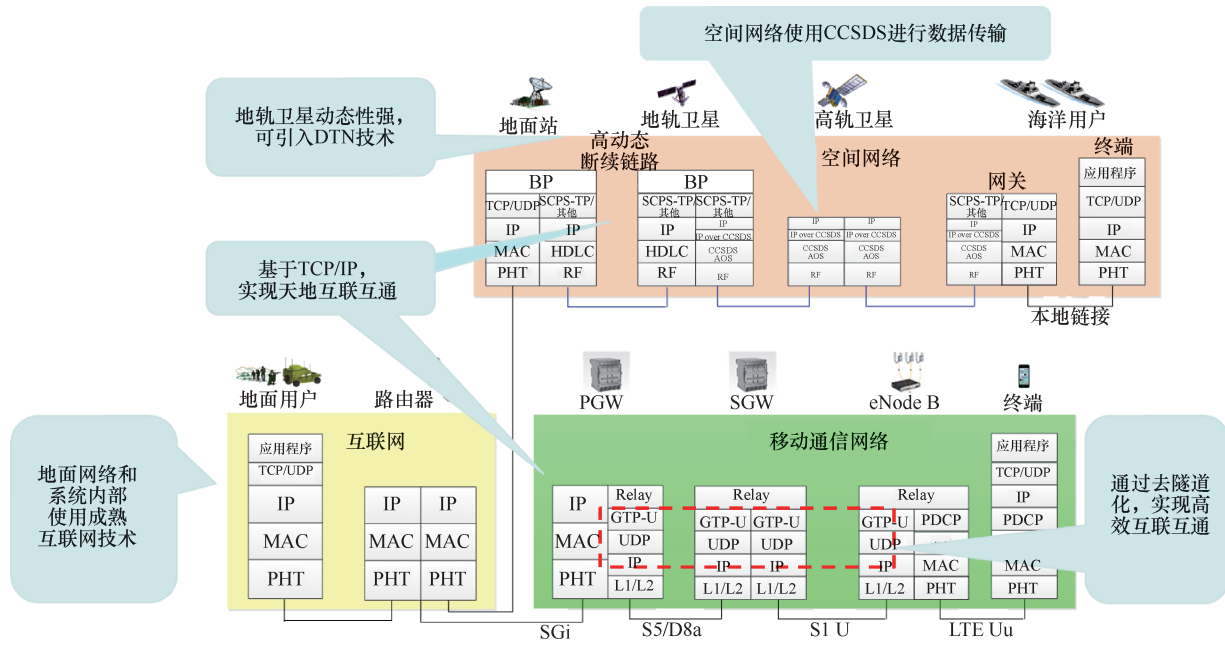


图 2 天地一体化信息网络协议体系

表 1 美国提出的主要空间信息网络

阶段	系统	时间	星座	性能
一	Iridium 铱星系统	1990—2000 年	66 颗 LEO+6 颗极圆轨道	建成低/中轨系统无星上处理能力
二	Teledesic	1994—2004 年	228 颗 LEO+12 颗圆轨道	建成“空间因特网”有星上路由交换能力
三	WGS	2007 年	GEO 卫星（已发射 6 颗）	建成高轨卫星信息系统实现全球覆盖
四	AEHF	2010 年	GEO+LEO+地面	组成星地网初步实现空间网络
五	O3b	2013 年	16 颗微 MEO 星	MEO 微卫星与地面中心组网实现特殊区域组网
六	OneWeb	2015 年	720 颗微 LEO 星	低轨微卫星与地面中心组网实现特殊区域组网
七	Kuiper	2019 年	3 236 颗微 LEO 星	低轨通信互联网接入

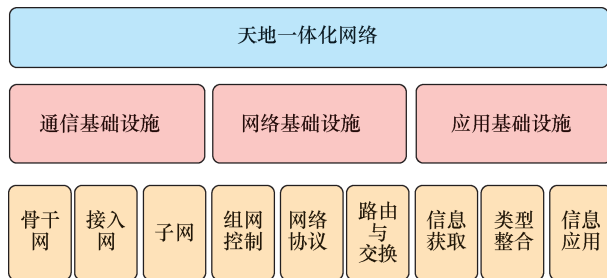


图 3 天地一体化网络组成

中国航天科工集团提出“虹云”星座，是“五云一车”（飞云、快云、行云、虹云、腾云和飞行列车）项目之一，计划发射 156 颗卫星，预计在 2023 年建设完成实现通、导、遥的信息一体化。2018 年 12 月 22 日，“虹云”工程首星在酒泉卫星发射中心成功发射，进入预定轨道，“虹云”低轨卫星示意图及首发星发射如图 5 所示。

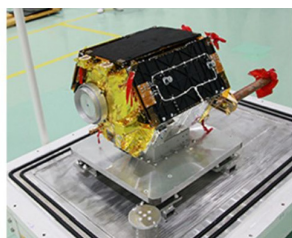


图 4 “鸿雁”星座组成及首发星



图 5 “虹云”低轨卫星示意图及首发星发射

3) 空间信息网络的发展趋势

根据国内外研究现状，可以总结空间信息网络的发展趋势如下。

网络节点：由数量较多的 LEO 与 GEO、MEO、LEO 相结合，进一步向大量微小卫星星座方向发展。

网络架构：由点、线、面向天空地海一体化方向发展。

网络路由：由透明转发向星上处理方向发展。

网络协议：由 PPP 协议向与 TCP/IP、CCSDS、DTN 相结合方向发展。

网络功能：由单一业务向多业务方向发展。

1.3 空间信息网络的总体目标与主要难点

空间信息网络的总体目标是以国家战略需求为牵引，以保障国家信息安全为出发点，按照“天基组网、地网跨代、天地互联”的思路，经过“技术突破、规模建设、扩展提高”3个阶段，建立世界领先水平的天地一体化信息网络技术体系，具备全球覆盖、按需服务、随域接入、安全可信能力，形成与我国新时代战略需求相适应的体系能力，实现“国家利益到哪里，信息网络覆盖到哪里”。

要想实现上述目标，主要面临以下6个方面的难点。

- ① 体系设计难：网络规模庞大，结构立体化；
- ② 星上路由难：网络拓扑时变，动态不规则；
- ③ 保密通信难：无线开放方式，安全性能差；

- ④ 信息获取难：环境影响严重，链路质量差；
- ⑤ 星上处理难：卫星载荷受限，节点功能弱；
- ⑥ 网络管理难：链路时间较长，时延抖动大。

2 空间激光通信

2.1 空间激光通信的概念和特点

空间激光通信是以激光为载波，在空间实现信息无线传输的通信方式，具有以下几个特点。

- ① 远离电磁波谱→抗干扰能力强；
- ② 束散角非常小→抗截获能力强；
- ③ 易于编码（加载量子密钥）→安全性能好；
- ④ 通信速率高（从百 Mbit/s 到十几 Gbit/s）→传输速度快；
- ⑤ 信息容量大（比射频频带宽宽 $10^3 \sim 10^5$ ）→波段选择方便；
- ⑥ 体积小、重量轻、功耗低→灵活机动；
- ⑦ 通信要求→信道无遮挡、可通视。

2.2 空间激光通信的研究现状

1) 空间激光通信的国外研究现状

从国外情况看，美国、欧洲、俄罗斯、日本等起步较早，发展至今已有 40 多年，国外空间激光通信主要研究机构如图 6 所示。

自 20 世纪 70 年代以来，空间激光通信已经发展形成了多种通信链路，这些通信链路都已在野外试验中获得成功，如卫星和地面之间、卫星和卫星之间、卫星和飞机之间、飞机和飞机之间、飞机和

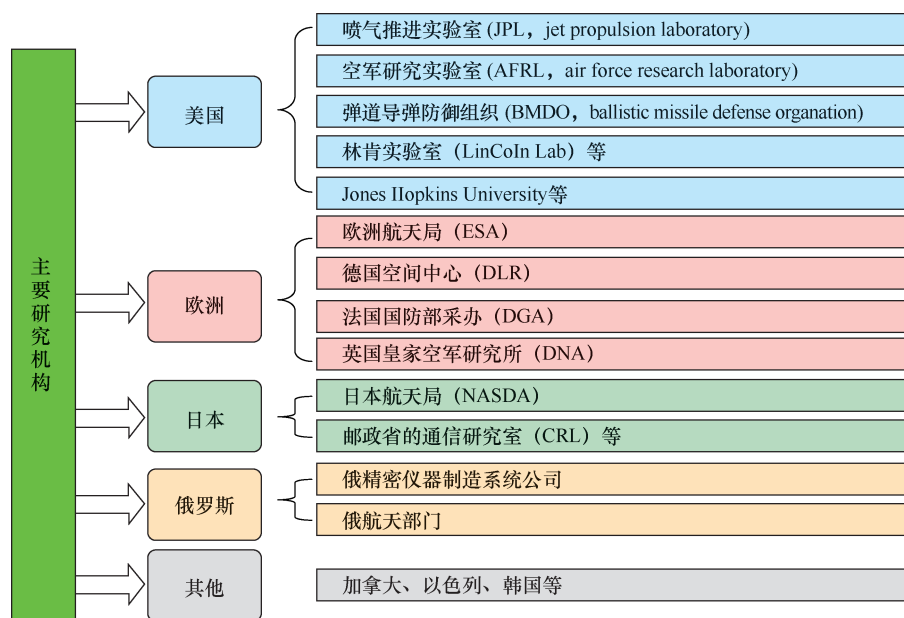


图 6 国外空间激光通信主要研究机构

飞艇之间、空地之间（飞艇和地面之间或飞机和地面之间）以及地面站间^[7]。国外主要空间光通信试验及参数指标统计如表2所示。

2) 空间激光通信的国内研究现状

我国空间激光通信研究起步较晚，但仍进行了多个链路的激光通信野外试验，取得了良好的成果。国内主要空间光通信试验及参数指标统计如表3所示。

2.3 空间激光通信的发展趋势

目前，世界上激光通信的发展趋势主要体现在高速率、网络化、多用途、一体化和多谱段5个方面。

1) 高速率

高速率已成为各国空间激光通信共同追求的一个主要目标。激光通信速率从最初的几kbit/s、2 Mbit/s、50 Mbit/s、300 Mbit/s、622 Mbit/s、1.5 Gbit/s、2.5 Gbit/s发展到5.6 Gbit/s，未来将达40~100 Gbit/s。

表2 国外主要空间光通信试验及参数指标统计

链路类型	系统	搭载终端	国家或地区	时间	速率	通信距离/km	误码率
星地	LCTSX	TerraSAR-X 卫星-夏威夷地面站	德国	2009年	5.65 Gbit/s	大于500	/
	SLS	ISS 空间站-北高加索地面站	俄罗斯	2012年	125~622 Mbit/s	1 000	/
	LLCD	月球环境探测器-地面站	美国	2013年	下行 622 Mbit/s; 上行 20 Mbit/s	400 000	/
	OPALS	ISS 空间站-怀特伍德地面站	美国	2014年	50 Mbit/s	大于400	10^{-4}
星间	SILEX	Artemis 卫星-SPOT4 卫星	欧洲	2001年	50 Mbit/s	40 000	10^{-6}
	LCTSX	TerraSAR-X 卫星-NFIRE 卫星	德国、美国	2008年	5.65 Gbit/s	5 000	/
星空	LOLA	Artemis 卫星-神秘20飞机	法国	2006年	50 Mbit/s	38 000	/
空空	T39A	T39A 飞机-飞机	美国	1999年	600 Mbit/s	50~500	10^{-6}
	Falcon	DHC-6 飞机-飞机	美国	2011年	2.5 Gbit/s	94	/
空地	/	飞艇-地面车载终端	美国	2006年	40 Gbit/s (波分复用)	1.2 (飞行高度1)	/
	ARGOS	DLR 飞机-地面站	德国	2008年	150 Mbit/s	/	/
地地	/	La Palma 岛-Tenerife 岛	德国	2005年	5.6 Gbit/s	/	/

表3 国内主要空间光通信试验及参数指标统计

链路类型	搭载平台	单位	时间	通信速率	通信距离
星地	空间站-地面	武汉大学	2016年	1.6 Gbit/s	400 km
	墨子号-地面	中国科学院上海光学精密机械研究所	2016年	5.12 Gbit/s	2 000 km
	实践13-地面	哈尔滨工业大学	2017年	4.8 Gbit/s	40 000 km
空潜	船-水下	中国科学院上海光学精密机械研究所	2010年	10 kbit/s	125 m
	飞机-水下	中国科学院上海光学精密机械研究所	2016年	—	3 110 m
空地	飞艇-船	长春理工大学	2011年	1.5 Gbit/s	20.8 km
空空	两直升机	长春理工大学	2011年	1.5 Gbit/s	17.5 km
	两运12飞机	长春理工大学	2013年	2.5 Gbit/s	144 km
地地	地-地	中国电子科技集团第三十四研究所	2000年	155 Mbit/s	26 km
	船-地	长春理工大学	2007年	300 Mbit/s	20.4 km
	地-地	武汉大学	2010年	7.5 Gbit/s (三路波分复用)	40 km
	地-地	中国电子科技集团第三十四研究所	2014年	2.5 Gbit/s	5 km

2013 年，美国提出激光通信中继卫星验证系统 (LCRD)，计划于 2019 年发射，实现卫星和地面站间的激光通信，速率为 2.88 Gbit/s，并有望达到 10 Gbit/s。空间激光通信的速率发展趋势如图 7 所示。

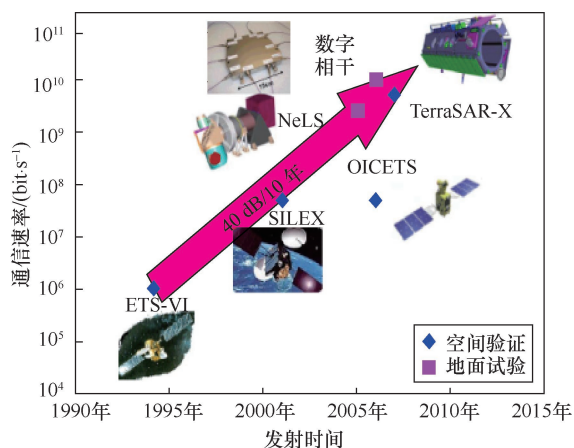


图 7 空间激光通信的速率发展趋势

2) 网络化

目前，世界上的空间激光通信都是一点对一点，严重影响了通信中继、组网和应用，激光通信组网是未来发展的必然趋势。2010 年，美国提出了转型卫星通信计划 (TSAT)，针对不同的通信条件和通信要求，将射频微波通信和空间激光通信 (卫星、飞机、飞艇间) 等多种手段相结合，实现各平台间的无盲点通信^[6]。

需要构建的主要网络包括天基激光通信网络 (GEO、MEO、LEO)、空基激光通信网络 (LEO、飞机、飞艇)、天地激光接入网络 (车、机、星等)、地海激光应急网络 (车、船、站、点) 等。主要难点是激光发散角非常小、动态接入、空间环境的影响等；主要的解决途径包括突破“一对多”同时激光通信技术、研究动态路由解决接入难题、寻求激光微波通信联合体制等。

3) 多用途

空间激光通信可用于星间、星空、空空、空地等多种链路中，并逐渐向深空和海下通信扩展。2010 年，美国国防高级研究计划局 (DARPA) 发布了战术中继信息网络 (TRITON) 项目，研发蓝光潜艇通信系统，完成了 P-3 海上巡逻机与潜航的潜艇间的激光通信。

2013 年，美国提出计划于 2023 年实施深空光通信 (DSOC) 系统项目，旨在研究深空任务中的

激光通信在数据速率、系统空间占用和功耗等指标能力方面的改进，用于以 250 Mbit/s 以上的速率从火星回传数据，通信距离达 6.3 亿千米。深空光通信计划构成如图 8 所示。

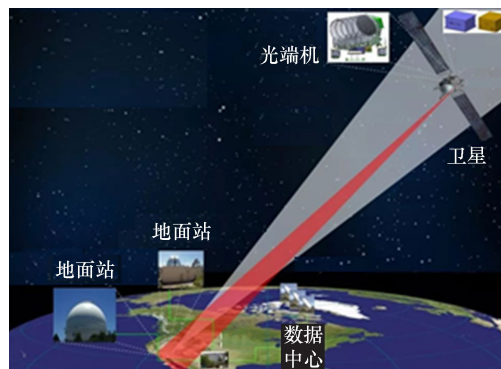


图 8 深空光通信计划构成

4) 一体化

2013 年，美国国家航空航天局的 LLCD 系统能够除激光通信外，完成高于厘米精度测距的飞行测量，测距精度达 3 cm。美国国家航空航天局的 LLCD 系统如图 9 所示。

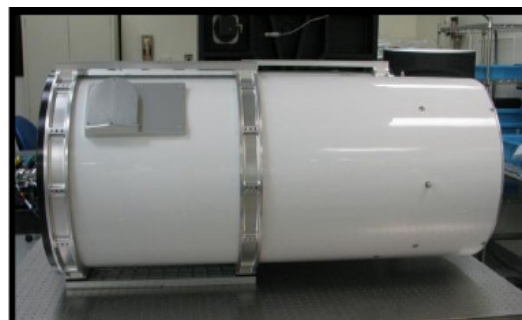


图 9 美国国家航空航天局的 LLCD 系统

2015 年，长春理工大学提出空间目标测距、成像、通信一体化方案^[7]。为了实现激光探测成像兼通信系统的轻小型化，合理安排系统结构，将原本需要 5 个光学口径的结构设计成 2 个光学口径，减少了光学口径的数量，有利于轻小型化。其中，激光通信信标光发射/接收和激光测距光发射/接收共用一个光学天线，通过分光片实现信标光和测距光的分离；激光通信信标光发射/接收、激光通信精信标光发射/接收、成像探测组成共用一个卡塞格林望远镜光学系统，通过分光和折转实现缩短长度、缩小体积的轻小型化。空间目标测距、成像、通信一体化方案如图 10 所示。

5) 多谱段

未来通信将向紫外、可见、红外、太赫兹等多

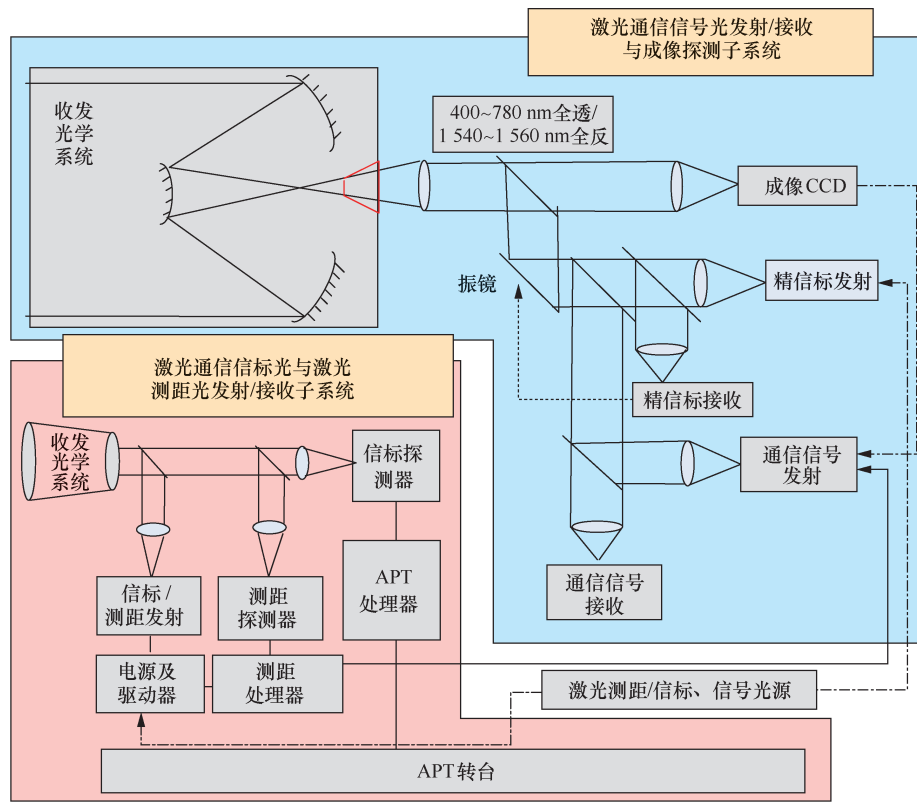


图 10 空间目标测距、成像、通信一体化方案

谱段相结合的发展方向，目的是发挥不同谱段通信系统的优势。2010 年，加州大学搭建了紫外通信实验平台，波长为 266 nm，通信距离达 100 m，通信速率为 3 kbit/s。2017 年，中国工程物理研究院科研团队成功实现了距离为 21 km、单路实时速率为 5 Gbit/s、频率为 0.14 THz 的远距离高速无线传输试验。THz 远距离高速无线传输试验如图 11 所示。



图 11 THz 远距离高速无线传输试验

3 结束语

空间信息网络在充分继承和集成我国在空基网

络、天基网络及地基网络等方面已有成果的基础上，按照“统筹规划、分步实施、资源共享”的原则，充分发挥后发优势，实现系统的跨越式发展。空间激光通信具有高速率、抗干扰、抗截获、轻小型和保密性好等优点，在军事保密通信、民用应急通信、电磁干扰下通信以及天地一体化信息网络建设等方面具有广泛的应用前景。下一步应继续刻苦攻关，努力拼搏，加快发展我国的空间激光通信技术在空间信息网络中的应用，为国家和国防建设做出应有的贡献。

参考文献：

- [1] 沈荣骏. 我国天地一体化航天互联网构想[J]. 中国工程科学, 2006, 8(10):19-30.
SHEN R J. Conception of space Internet integration in China[J]. Engineering Sciences, 2006, 8(10): 19-30.
- [2] 张军. 面向未来的空天地一体化网络技术[J]. 国际航空, 2008(9): 34-37.
ZHANG J. Future oriented space-earth integration network technology[J]. International Aviation, 2008(9): 34-37.
- [3] 吴巍. 天基信息系统互通技术研究[J]. 无线电通信技术, 2003, 29(3):16-20.
WU W. Research on interworking technology of space-based information system[J]. Radio Communications Technology, 2003, 29(3): 16-20.

[4] National Aeronautics and Space Administration. Developing architectures and technologies for an evolvable NASA space communication infrastructure[R]. 2004.

[5] AIAA ICSSC. A Framework for an intelligent Internet protocol for a space-based Internet[R].2004.

[6] 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(2): 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(2): 117-125.

[7] 姜会林, 张国玉, 付强, 等. 空间光电技术与光学系统[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
JIANG H L, ZHANG G Y, FU Q, et al. Space photoelectric technology and optical system[M]. Beijing: Science Press, 2015.



付强 (1984-), 男, 吉林长春人, 博士, 长春理工大学空间光电技术研究所副所长、副教授、博士生导师, 主要研究方向为大气激光传输特性、多光谱偏振成像探测等。



赵义武 (1971-), 男, 吉林长春人, 博士, 长春理工大学空间光电技术研究所副所长、副教授、博士生导师, 主要研究方向为激光通信建模仿真等。

[作者简介]



姜会林 (1945-), 男, 辽宁辽中人, 中国工程院院士, 长春理工大学校学术委员会主任、空间光电技术研究所所长, 主要研究方向为应用光学、激光通信、光电探测等。



刘显著 (1988-), 男, 吉林长春人, 博士, 现就职于长春理工大学空间光电技术研究所, 主要研究方向为多点高速激光通信等。