

■张洪涛 编著

空间光通信 原理与技术

The Principle and
Technology
of Optical
Communications
in Space

 吉林大学出版社

空间光通信原理与技术

The Principle and Technology of
Optical Communications in Space

张洪涛 编著

吉林大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

空间光通信原理与技术/张洪涛编著. —长春: 吉林大学出版社, 2008. 11

ISBN 978-7-5601-3556-4

I. 空… II. 张… III. 空间激光通信系统—研究 IV. TN929.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 187354 号

书 名: 空间光通信原理与技术

作 者: 张洪涛 编著

责任编辑、责任校对: 孟亚黎

吉林大学出版社出版、发行

开本: 787×1092 毫米 1/16

印张: 12 字数: 238 千字

ISBN 978-7-5601-3556-4

封面设计: 张沐沉

长春大学印刷厂印刷

2009 年 1 月第 1 版

2009 年 1 月第 1 次印刷

定价: 28.00 元

版权所有 翻印必究

社址: 长春市明德路 421 号 邮编: 130021

发行部电话: 0431—88499826

网址: <http://www.jlup.com.cn>

E-mail: jlup@mail.jlu.edu.cn

前 言

空间光通信是指利用激光作为信息的载体,在卫星与卫星之间或卫星(其它空中目标)与地面站之间进行的通信方式.与微波通信相比,空间光通信的主要优势在于:传输速率高,信息容量大;发射光束窄,方向性好,抗电磁波干扰强,保密性好;功耗低,体积小,重量轻.近年来,鉴于空间光通信技术的战略重要性和新型激光器件的出现,发达国家,特别是美国对此投入了大量的人力和财力,对空间光通信系统所涉及的各项关键技术展开了全面深入的研究,取得了突破性进展,成功实现了卫星—地面、卫星—卫星之间的光通信试验.据报道,欧洲航天局实施了宏伟的星际激光通信计划(SI-LEX),并取得了预期的试验结果.美国也成功试验了卫星与预警机及地面站之间的光通信,并已进入工程试验阶段.我国在大气光通信和卫星光通信等空间光通信领域均获得不少技术积累,很多单元技术已趋于成熟.

本书围绕空间光通信原理与技术进行论述.第1章回顾了空间光通信的发展历史和发展趋势,介绍了国外目前比较先进的空间光通信系统;第2章重点阐述了空间光通信系统中的光学系统结构,并对与之相关的部分关键技术及分系统结构进行了归纳与总结;第3章对空间光通信系统中常采用的半导体激光器及其性能参数进行了分析;第4章介绍了光束捕获、瞄准和跟踪(APT)技术,并对

APT 系统的作用、工作方式及动态特性参数进行了分析;第 5 章详细分析了激光束在湍流大气中的传输特性,对于理解大气对激光通信、激光雷达、激光武器等在大气环境中工作的空间系统的影响具有指导意义,它同时也是分析如何改善激光束传输特性的重要依据;第 6 章阐述了如何将自适应光学技术应用于空间光通信系统以补偿大气湍流效应对激光束传输的影响,这种有机结合必然会给空间光通信技术的发展注入新的活力;第 7 章对空地光通信系统进行了建模与仿真,模拟了采用自适应光学系统后,低轨卫星与地面站之间光通信系统中激光束传输质量的改善。

本书的主要内容是作者多年从事空间光通信领域研究的成果,由于水平有限,恳请专家和学者批评指正。书中部分章节引用了参考文献中的相关内容,在此对参考文献的作者表示衷心的感谢!正是他们的创造性工作推动了空间光通信技术的发展,并使编者对该领域的技术问题有了更全面的认识 and 了解。

由于编者水平有限,时间仓促,错误和不妥之处势必难免,敬请使用本书的广大教师和读者批评指正。

张洪涛

2008 年 11 月

目 录

第 1 章 概 论	1
1.1 国外空间激光通信发展现状	2
1.1.1 美国空间激光通信进展	2
1.1.2 欧洲激光通信进展	10
1.1.3 日本空间激光通信进展	13
1.1.4 法国空间激光通信进展	16
1.2 国内空间激光通信发展现状	16
1.3 空间光通信的特点	17
1.4 发展趋势展望	22
第 2 章 空间光通信系统中的光学系统	24
2.1 激光通信系统的总体布局	24
2.2 空间光通信系统中光学系统结构	28
2.2.1 激光器的选择	28
2.2.2 调制技术	30
2.2.3 复用技术	33
2.2.4 探测器的选取	35
2.2.5 光学滤波器	36
2.2.6 光电探测器	38
2.2.7 背景光辐射	41
2.2.8 回转结构及方式	43
2.2.9 分光方式的选择	45
2.2.10 望远镜结构形式	46
2.2.11 光学材料选择	50
2.3 几种典型的国外空间光通信系统	52

2.3.1 欧洲空间光通信系统	52
2.3.2 美国空间光通信系统——LCDS 系统	56
2.3.3 日本空间光通信系统	59
第3章 空间光通信系统中的常用激光器	66
3.1 850 nm 超辐射发光二极管(SLD)	66
3.2 808 nm 阵列半导体激光器	70
3.3 LD 泵浦高频 YAG 激光器	73
3.4 940 nm 半导体激光器	76
3.5 980 nm 应变量子阱阵列激光器	79
第4章 APT 系统	82
4.1 捕获系统	83
4.2 对准和跟踪系统	85
4.3 自由空间 APT 粗跟踪链路功率分析	91
4.4 用于跟踪的探测器比较与分析	96
第5章 激光在湍流大气中的传输	100
5.1 大气衰减	100
5.1.1 激光束在标准晴朗大气中的衰减	100
5.1.2 大气气溶胶的衰减	103
5.2 大气湍流	107
5.2.1 光束漂移	108
5.2.2 到达角起伏	111
5.2.3 光束扩展	113
5.2.4 大气闪烁	115
第6章 自适应光学技术在空间光通信系统中的应用	118
6.1 自适应光学系统	118
6.1.1 波前探测器	119
6.1.2 波前控制器	121
6.1.3 波前校正器	123
6.2 自适应光学系统在空间激光通信中的应用	128

6.2.1 总体布局	128
6.2.2 相位补偿原理	129
6.2.3 补偿效果的评价	131
6.2.4 相位扰动的 Zernike 多项式展开	133
6.2.5 补偿误差的分析	136
6.3 高速倾斜镜带宽的提高	138
6.3.1 高速倾斜镜带宽与谐振频率的关系	139
6.3.2 有限元动力学分析基本原理	140
6.3.3 有限元动力学分析结果	143
6.4 自适应光学系统中时间带宽和空间带宽的匹配	151
6.4.1 时空带宽与波前相位均方值的关系	152
6.4.2 激光束沿水平大气传输时系统时空带宽的匹配问题	154
第 7 章 空地光通信系统建模与仿真	157
7.1 空地光通信系统仿真模型的建立	157
7.2 空间光通信系统计算机仿真结果	165
7.2.1 激光束沿水平大气传输时的补偿效果	165
7.2.2 基于自适应光学技术的空间光通信系统计算机仿真 结果	167
7.2.3 高速倾斜镜部分振型的有限元分析结果	170
主要参考文献	176

第1章 概 论

空间光通信是指采用激光束作为信息的载体,在空间(包括近地大气空间、低轨道、中轨道、同步轨道、星际太空)信道之间进行的通信.空间光通信主要有三种形式,即空间站与地面站之间的通信,空间站之间的通信和地面站之间(如需要可通过空间站转发)进行的通信.所谓空间站是指地球大气层以外的飞行体(如低轨卫星、同步卫星、航天飞机等)和其它天体(如月球)上面所设的通信站;地球站包括陆地、水上和大气层中的通信站.

随着超稳激光器、新型光束控制器、高数据率接收器和适于空间应用的先进通信电子设备的研究基本成熟,激光通信已成为下一代通信的发展方向之一.与微波通信相比,激光通信的主要优点是:发射光束窄,方向性好.激光通信中,激光光束的发散角通常都在毫弧度,甚至微弧度量级,它能较好地解决日益严重的电磁波干扰和保密问题;天线尺寸小.由于激光波长短(约零点几微米到几十微米),在完成同样功能的情况下,光学天线的尺寸比微波、毫米波通信天线尺寸要小许多;信息容量大.激光波(其相应光频率在 $10^{13} \sim 10^{17}$ Hz)作为信息载体可传输达 10 Gbps 的数据码率;功耗低,体积小,重量轻,尤其适用于空间通信.激光通信的核心内容主要包括高功率光源及高码率调制技术;高灵敏度抗干扰的光信号接收技术;精密、可靠、高增益的收、发天线技术;快速、精确的捕获、对准和跟踪技术(APT);大气信道的研究等.完整的空间激光通信系统包括相应的机械支撑结构、热控制、辅助电子学等部分及系统整体优化技术,这些技术难度大而且十分重要.总之,激光通信是包含多项工程的交叉学科研究课题,它不仅要实现一系列重要的技术功能,还需要有步骤地从地对地、地对空、空对空中获取许多试验数据和技术经验.

1.1 国外空间激光通信发展现状

由于空间激光通信在航空航天及国民经济等领域具有强大的吸引力,因此美国、西欧、日本等投入了大量的人力和物力开展研究,目前主要的研究机构有:美国国家航空航天局、美国空军、麻省理工学院林肯实验室、加州理工学院喷气推进实验室;欧洲空间局通信部;日本宇宙开发事业团、日本邮政省通信研究实验室、高级长途通信研究所等。

1.1.1 美国空间激光通信进展

美国是世界上开展空间光通信最早的国家,也是技术走在最前沿的国家之一,它最主要的研究部门有美国宇航局(NASA)和美国空军(Air Force)等。NASA 早在上世纪 70 年代初就资助进行 CO_2 激光器和灯泵浦的 Nd:YAG 激光器空间通信系统的研究。此项研究主要用于高码率的低轨卫星间(LEO - LEO)光链路和低码率的深空(Deep Space)光中继。此后,随着体积小、重量轻和成本低的低轨卫星(LEO)增多,以及相应的关键技术和元器件的发展,激光通信的应用逐步扩展到 LEO—LEO, LEO—GEO(地球同步轨道卫星), LEO—地面站和 LEO—飞机的光通信链路。

1971 年美国空军提出代号为 405B 的激光通信计划,具体由赖特帕特森实验室实施,其目标是建立空间激光通信网。1975 年该计划移交给空间与导弹系统组织 SAMSO(Space And Missile System Organization)管理,后来由于项目资金的减少而把目标转为直升机到地面站之间的激光通信演示实验,并改名为“机载飞行测试系统(AFTS)”。1981 年在美国新墨西哥州白沙导弹靶场进行了飞机与地面站之间的激光通信演示实验,实验持续了三个月,采用倍频 YAG 激光器,波长 532 nm,飞机向地面传输的数据率达到 1 Gbit/s,通信距离约 100 km。

1981 年,美国海军支持的空间飞行试验系统首次成功实现了 KC—135 飞机与地面站之间的激光通信,采用倍频 YAG 激光器(波长 532 nm),通信

速率最高为 1 Gbit/s,通信距离最高达 100 km,试验的成功验证了建立空中移动平台和地面固定站点间激光通信链路的可行性。

从 80 年代中期到 1994 年间,美国空军支持麻省理工学院林肯实验室建立了高速星间激光通信实验装置 LITE(Laser Intersatellite Transmission Experiment),它是世界上首次采用外差式接收方式的激光通信实验系统,其目的是验证相干激光通信的可行性。该实验采用 30 mW 半导体激光器,8 inch(1 英寸=2.54 厘米)口径的望远系统,数据率为 220 Mbit/s,通信距离为 40 000 km。该项目计划应用于美国国家航空航天局的 ACTS 卫星,但由于投资力度等方面的问题而终止了该实验计划。

1994 年美国弹道导弹防御组织(BMDO)通过美国空军和战略防御司令部(SSDC)签署一项计划,投资开发 12 Gbit/s 高数据率激光通信终端,用于 1998 年升空的空间技术研究载体 2 号(STRV - 2)上,其目的是演示低地球轨道卫星的激光上行和下行链路,Astro Terra 公司报道了 STRV - 2 与地面终端之间水平激光通信的实验结果。实验在所罗戴德山与德尔马高地之间进行,通信距离为 13.8 km,传输数据率为 155 Mbit/s~1 Gbit/s。STRV - 2 星地激光通信计划的两个地面实验终端在 1997 年由喷气推进实验室加工装配,1996 年 6 月进行了低轨卫星与固定地面站间的激光通信实验,链路的斜距为 2 000 km,数据率达 1 Gbit/s,终端的重量为 31.5 磅(1 磅=0.4536 千克),体积小于 1 立方英尺(1 立方英尺=0.028317 立方米),其光学终端结构及实验情况如图 1.1 和图 1.2 所示。

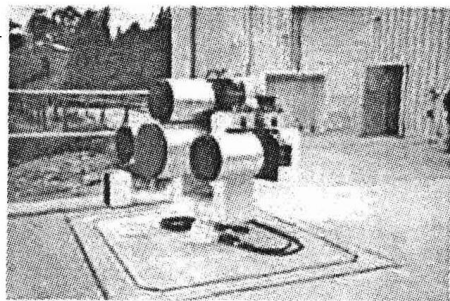
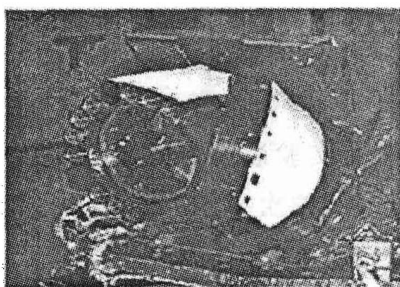
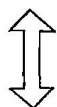


图 1.1 STRV - 2 上装载的激光通信终端外形图

卫星通信终端



传输数据率:1.0 Gbps
链路距离:2000 km



地面通信终端

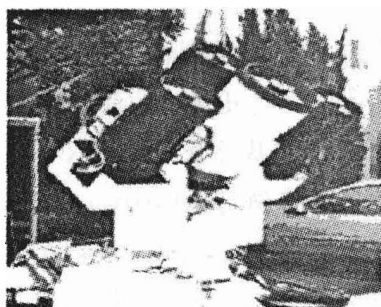


图 1.2 STRV-2 星地激光通信实验情况

1995 年 6 月,日本的 LCE 与美国大气观测卫星成功地进行了 8 min 的双向激光通信;1995 年 7 月与 CRL 的地面站间实现了双向光通信,这是历史上第一次成功的卫星对地面激光通信实验.同年 11 月至次年 5 月,还与美国 JPL 成功地进行了卫星与地面站间的光通信实验,在 37 800 km 距离上实现了传输码率为 1.02 Mbit/s、误码率达 10^{-6} 的通信,提供了双工链路,连接率为 1.024 Mbit/s.

1998 年加州理工学院喷气推进实验室利用其承担的光通信演示计划(OCD)项目,进行了终端系统的装配与性能测试.喷气推进实验室利用 OCD 系统进行了地面站之间一系列实验,用以验证大气效应与光通信演示计划系统的经验理论.OCD 系统采用一个焦平面阵列(FPA)与一个快速控制反射镜(FSM)实现信标的捕获、跟踪及瞄准提前量补偿,同时采用光纤耦合激光器,以减小终端的复杂性.实验中的两个地面站分别位于斯特劳伯里山峰(靠近加州阿罗黑德湖)与太伯山(靠近加州赖特伍德),其间相距 45 英里(1

英里=1.609 千米),在太伯山用 24 inch 望远系统接收调制信号,并通过改变信标光强度与相位来模拟大气中光束的漂移与闪烁效应,以此了解信标光强度与信标光接收角的变化对 OCD 跟瞄特性及接收端猝发误差的影响. 喷气推进实验室未来将利用 OCD 的成熟技术,为国际空间站工程与技术 ISSERT 计划建造另一个光通信终端,比 OCD 有更好的性能,并演示大于 1 Gbit/s 的星地间激光链路实验.

喷气推进实验室于上世纪 90 年代末还利用 OCD 装置进行了地面站到深空的光通信实验演示,系统发射端采用短脉冲 Nd:YAG 激光器,通信时的上行、下行链路均采用脉位调制,其主要技术指标如表 1.1 所示.

表 1.1 光通信系统实验演示的主要指标

参 数	下行链路	上行链路
通信距离	6AU	6AU
数据率	100 kbps	2 kbps
发射波长	1064 nm	532 nm
发射孔径	300 mm	70 mm
接收孔径	10 m	300 mm
通道数	1 路	1 路
误码率	7×10^{-3} (未编码)	1×10^{-6}

注:AU—天文单位(Astronomical Unit), $1\text{AU}=1.5 \times 10^8 \text{ km}$

美国空军研究实验室传感器分部 AFRL/SN(Air Force Research Laboratory Sensors Directorate)正在研究一种可行的机载激光数据链路. 该项技术发展项目计划分两个阶段进行,第一阶段包括激光数据链路地面演示系统的设计与评估,并已经在 1995 年完成. 试验中的两个激光通信终端分别位于夏威夷群岛的莫纳罗亚山和毛伊岛的海里卡拉山之间进行,此间相距 150 km,实验演示了 1.1 Gbit/s 的全双工通信,通信误码率优于 10^{-6} . 第二阶段是将地面演示实验的结果转化为优化的终端设计,以便将其安装到两个商用型喷气飞机上.

目前,AFRL 在夏威夷成功实验的基础上正在作进一步的研究,目标是研制一种新型的激光通信终端,可以安装在 T-39 型飞机(或 Sabreliner 40)下腹处的一个吊舱内,进行全双工激光通信链路的飞行演示实验,其通信速

率为 1Gbps,通信距离 50 km 和 500 km,飞行高度 12 km. 飞行实验还将搜集大气及湍流效应对激光束传播影响的具体数据,其光学系统及组件如图 1.3 和 1.4 所示.

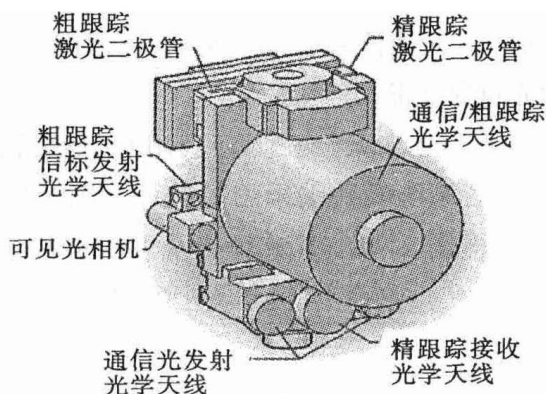


图 1.3 光学系统外观布局设计

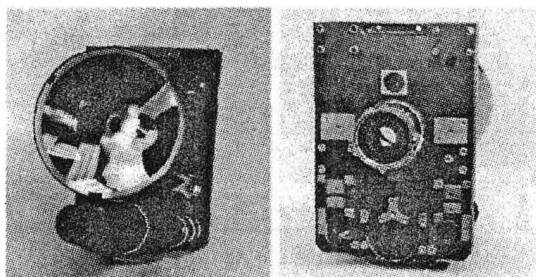


图 1.4 带有光学系统的光学平台组件

1998 年 2 月,朗讯(Lucent)公司制造了一套 10 Gbit/s 的无线光通信系统,相当于空间激光通信中的地面与地面之间的通信链路. 由于在大气中传输,通信性能受到通信距离、比特率、气候条件等因素限制,Astro Terra 公司在该系统加入自动跟踪系统以修正建筑物等的影响,该系统中还采用了内置相机以获得方向的变化量,并反馈给电子执行单元,以保持光束的准直性. 1998 年 8 月,两家公司对无线光通信系统的原型机进行了测试,获得成功,链路距离为 2.5 km,数据率 2.5 Gbit/s.

1999 年 ThermoTrex 公司用 T39A 飞机为搭载平台,进行了飞机—飞机间激光链路通信试验. 通信距离 50~500 km,速率 1 Gbit/s,飞行高度 10000 m,误码率 10^{-6} .

2000年4月由美军空间导弹防御司令部(SMDC)和弹道导弹防御组织(BMDO)分别出资进行了两个地面通信终端——空间技术研究运载2号(STRV-2)星地激光通信试验.它的一个重要特点就是地面通信终端对运行在低地轨道上卫星的开环指向精度在 $\pm 200\ \mu\text{rad}$ 以内.实验中使用了原子滤波器技术进行了实验,目标就是在低地轨道卫星与固定的地面接收站之间建立宽带数据链接,其数据传输可达1 Gbit/s. STRV-2的激光通信实验有3种工作模式:下行链路以155 Mbps的速率保存卫星传来的数据;以弯管模式(bent pipe)或环回模式(loopback)重复上行链路数据到下行链路,速率从155 Mbit/s~1 Gbit/s不等.上行数据到存储器,然后以155 Mbps的速率通过下行链路传回.

2001年5月18日,美国国家侦察局(NRO)的一颗新的“同步轨道轻型技术试验”(GeoLITE)卫星由“德尔它II”运载火箭发射升空,这颗卫星对于研制先进的激光通信和其他军用航天中继能力起着至关重要的作用.它是美国侦察局验证军用航天通信,特别是激光通信计划的组成部分,最终将为美国提供更强的“信息优势”.研制天基激光通信系统,重要目的之一是在同步轨道卫星之间进行极高数据率中继,诸如传输图像.这样,在传输关键数据时不必使用生存能力较低的地面站.

2001年11月20日,欧洲航天局(NASA)首次建立了卫星之间的激光通信链路,光终端SILEX系统主要目标是在低轨道卫星与高轨道数据中继卫星之间的激光通信链路,即数据信息通过激光通信链路上传到高轨道数据中继卫星,然后通过微波射频传到地面,高轨道卫星ARTMIS和低轨道卫星SPOT4之间成功实现了星间激光通信链路,并进行了双向数据传输,达到了50 Mbps的通信速率,误码率为 10^{-6} ,这是人类首次成功进行星间激光通信实验.

2002年5月,美国国防部计划在2003—2007年财政投资22.4亿美元在下一代军用通信卫星系统上增加激光通信功能.激光通信能在短时间内传输海量数据,而且由于使用窄波束传输,将减少被拦截的可能性,并能增强抗干扰能力.美国国防部计划研制的这种使用激光通信技术的先进宽带系统(AWS)作为国防卫星通信系统、全球广播系统(GBS)和宽带通信卫星系统(WGS)的后续系统.

2004 年 4 月,美国国防部预先研究计划局(DARPA)授予朗讯(Lucent)技术公司一份价值 2500 美元的合同,对两项高速光学通信计划进行研究.其中的一项计划是在未来的 2 年中开发一个激光卫星连接的原型,研究经费达 1340 万美元.另外一项计划是在未来 4 年中开发一个全光学路由器,以使通信速率达到 10 Gbit/s,研究经费达 1250 万美元.

2004 年 4 月初,美国国防部预先研究计划局(DARPA)宣布将在 6 月发布两个或更多的万亿赫兹运行回馈(THOR)项目合同,该项目将通过光(激光)链接为战场提供宽带通信. THOR 项目正在通过建立自由空间光通信链接为战场移动单元提供比传统射频链接快 40 倍的通信网络,还希望减小当前战术数据链路的尺寸、重量和成本. 该项目将展示如何利用自由空间光链接,以飞机作为中继站建立战场通信. 波音、洛克希德·马丁、诺斯罗普·格鲁门和其他一些公司正在竞争该项目合同. 这项为期 3 年的合同将在 2006 财年进行最后演示.

2004 年 4 月 7 日,波音宣布与“全球”航空航天和技术集团组成开发激光通信技术,竞争国防部转换通信系统(TCS)项目, TCS 项目通过采用光通信建立地面到空间以及空间之间的数据传输,显著提高军用通信带宽,使卫星通信效率明显提高. 根据协议,波音和“全球”集团将共同努力成为美国卫星激光通信技术供应商. 波音该项目负责人称,波音公司对光通信的所有方面感兴趣. 公司已经开始关注空间光通信链接技术,同时波音还对空天和空空光通信十分关注. 此外,波音公司还正在考虑与美国航空航天局(NASA)合作开发能与深空探测器进行通信的光通信系统.

2004 年 8 月,美国国防部预先研究计划局(DARPA)制定了“光学和射频综合链路试验”(ORCLE)计划,研究一种新的通信能力. 该计划将研制和演示一个将自由空间光学和射频通信系统综合为一个单一网络化系统的样机系统,并为军队提供小型、耐用、宽频带的移动通信服务. ORCLE 方法给通信系统带来了革命性的发展,它将激光通信系统的高速率数据传输性能、射频通信系统的高可靠性能和网络的智能管理有效性综合到一起,即使在一些链路受到天气影响或物理损坏的情况下也能确保网络化通信系统的高效与可靠性. 该计划的第 I 阶段主要是研制一个样机系统,并进行综合自由

空间光学(FSO)/射频(RF)空—空—地链路的飞行演示. 洛克西德·马丁公司是 ORCLE 系统综合计划的总承包商, 研究小组成员还包括 ITT 公司、L3 通信系统公司、RAE 系统公司、美国 AOA 公司、苍鹰系统公司、EMS 技术公司、代顿宇航公司和洛克韦尔系统公司。

2004 年 8 月 19 日, 美国空军(Air Force)选定诺斯罗普·格鲁曼公司等 4 家公司进行光学孔径系统(Optical Aperture System)样机的设计、建造和验证, 光学孔径系统将实现空中平台与天基平台间的激光通信. 诺·格是 4 个被选中进行孔径技术研发和验证的主承包商之一, 它主要负责系统工程和集成工作. 其他的合作伙伴包括 OPTRA 公司(提供粗跟踪控制子系统)和 AOptix 技术公司(提供精跟踪控制子系统). 采用该技术能够为现有的军用平台和空间平台提供更强大的通信能力. 与现有的射频系统相比, 这种技术不仅能够增加带宽、以更高的传输速率为用户提供更丰富的情报、监视和侦察数据, 还具有缩小系统尺寸、减少系统重量和降低系统功耗和成本的潜力. 机载激光通信终端将与光学孔径技术一同进行演示验证, 与单独研发通信终端相比, 这样有助于技术更加成熟. 随着工业界转向研发互操作性和以网络为中心的系统, 激光通信技术的应用为使用分层体系(包括卫星、有人及无人飞行器、航空器和便携/固定地面终端)的空中侦察任务提供了一项关键技术. 光学孔径系统将是机载激光通信终端与转型的通信系统体系之间的重要连接。

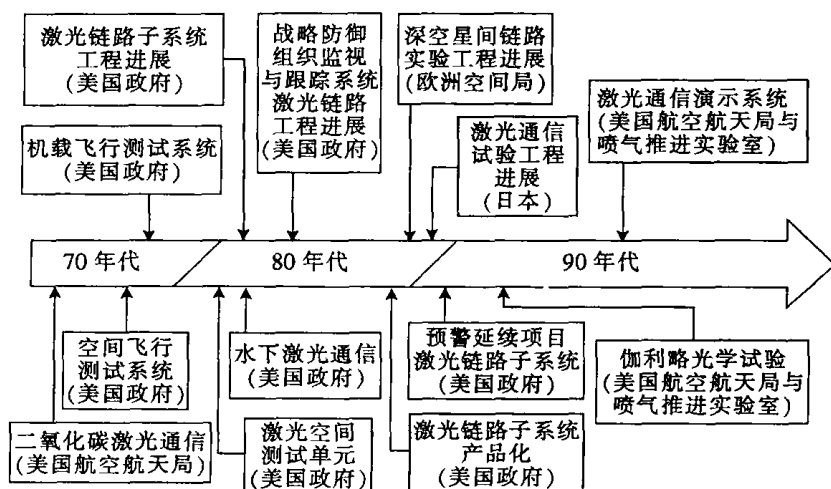


图 1.5 国外激光通信进展