

MODERN
COMMUNICATIONS

现代通信理论与技术丛书

Introduction To Laser Satellite
Communications

卫星光通信导论

● 赵尚弘 编著

西安电子科技大学出版社
[http:// www.xduph.com](http://www.xduph.com)

现代通信理论与技术丛书

卫星光通信导论

Introduction to Laser Satellite Communications

赵尚弘 编著

西安电子科技大学出版社

2005

内 容 简 介

卫星光通信是近年来国内外广泛关注的研究领域。本书主要介绍卫星光通信的基本原理、关键技术、系统组成及最新进展等。

本书主要内容包括：卫星光通信系统组成，捕获、跟踪、瞄准技术，激光信号的传输与检测，卫星振动对通信系统的影响，典型的卫星光通信试验系统，编队卫星光通信等前沿技术。

本书可作为高校和科研机构光通信专业硕士研究生参考书，对于相关领域的研究人员也具有一定的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

卫星光通信导论=Introduction to Laser Satellite Communications/赵尚弘编著. —西安:西安电子科技大学出版社, 2005.12

(现代通信理论与技术丛书)

ISBN 7-5606-1598-8

I. 卫… II. 赵… III. 卫星通信:光通信 IV. TN927

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 127937 号

策 划 霍小齐

责任编辑 霍小齐 王中伟

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

http://www.xduph.com E-mail: xdupfxb@pub.xaonline.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西光大印务有限责任公司

版 次 2005年12月第1版 2005年12月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 8.75

字 数 201千字

印 数 1~4000册

定 价 13.00元

ISBN 7-5606-1598-8/TN·0318

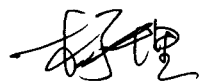
XDUP 1890001-1

*** 如有印装问题可调换 ***

本社图书封面为激光防伪覆膜, 谨防盗版。

序

利用“光”传递信息自古有之，今日的光纤网络已遍布全球，以其巨大的容量成为信息传输媒介的主流。其实，自由空间光通信技术的研究还早于光纤网络，中国在 20 世纪 50 年代末已经研制生产了自由空间红外光通信设备。除了其它因素外，主要由于大气吸收、湍流、水的沉降物等的影响，大气激光通信一直只能作为短距离大容量通信的一种备选和补充手段，未能普及推广。但人们从未放弃对自由空间光通信技术的研究，尤其是大气层以外的卫星光通信，由于其军事及外层空间开发的重大效用，更是吸引了科技界及有关使用部门的巨大兴趣和注意，投入了众多人力和经费，取得了关键性的技术进步，进行了许多空间试验、验证，现正进入实用化阶段。卫星光通信必将成为天基信息系统网络重要而不可缺少的组成部分。中国的高等院校、科研院所、政府部门对卫星光通信都给予了关注，也取得了重要的研究成果。在越来越多的科技和管理人员参与到卫星光通信这一领域中来的同时，介绍卫星光通信的书籍却不多。赵尚弘教授写的这本《卫星光通信导论》正好为满足这一需求增加了一个选择。《卫星光通信导论》不仅介绍了卫星光通信的基本原理，对卫星光通信链路的初始建立、保持，对光通信信号的空间传播、接收，及对几个空间光通信系统实例，都作了较具体的叙述。尤其是对衍射极限卫星光通信至关重要的对准、捕获、跟踪——即所谓 ATP 技术作了较详细的分析，可使读者对卫星光通信的关键技术有较深入的了解。作者还将他在空间飞行器编队飞行时的光通信研究心得编进本书，与读者共同探讨。本书可用作大学本科及研究生的教材，也可作为通信技术工作者和管理人员更新知识的读本。相信阅读本书的读者一定会从书中得到收益。是为序。



2005 年 10 月 3 日于北京

前 言

信息时代的发展需要建立高速、广域覆盖的通信网络。用波长极短的光波传输信息的光通信是实现高速通信的理想方案。光通信按照光信号的传输媒介不同可分为光纤通信和空间光通信两大类。地面的光纤通信与空间的卫星通信构成了广域覆盖通信网络的主体,但现有基于微波技术的卫星通信不能满足日益增加的大容量空间信息传输的需求。卫星光通信是指利用激光作为信息载体在卫星之间以及卫星与地面之间进行通信的一种空间光通信方式。与微波卫星通信系统相比,卫星间和星地间的激光通信系统的主要优势是:潜在的传输速率极高,通信容量极大;运行安全,机动,隐蔽;体积小,重量轻,功耗低;传输信道不受大气影响,因而被认为是星际通信的理想手段。近年来,鉴于激光通信技术的战略重要性,再加之性能优越的新型光器件的出现,对于空间光通信的研究重新兴起,但研究热点已从大气激光通信转向卫星光通信。特别是美国和西欧国家对卫星光通信技术如同对激光武器一样,给予了相当的重视,并投入大量的财力和技术力量。据报道,欧洲航天局组织了宏伟的星际半导体激光通信计划(SILEX)并已取得理想的试验结果;美国也在20世纪90年代中期成功试验了卫星与预警机、与地面站之间的激光通信,近年来已转入工程实验。我国在空间光通信领域的研究始于20世纪50年代末,在大气激光通信、卫星光通信等方面均有不少技术积累,有些单元技术已基本成熟。随着国家加大对空间技术研究的投入,对卫星光通信技术将会有越来越多的需求,这为进一步发展我国的卫星光通信技术创造了良好的机遇。

本人近年来开始卫星光通信的研究工作,指导的博士、硕士研究生也选择这一研究方向。目前国内对卫星光通信的研究相当关注,为了给广大读者提供一个较为完整的系统介绍,就将散见于国内外各种学术期刊上的论著加以综合,结合自己的研究兴趣,汇集成书。一方面给初涉该领域的年轻学者一个较系统的入门读物,另一方面也抛砖引玉,以期引起大家的广泛讨论,进一步推动我国卫星光通信技术研究的不断深入。

总参通信部原副部长、空军工程大学特聘教授杨千里先生详细审阅了全书,并提出了全面修改意见,作者在此表示由衷的谢意!感谢空军工程大学科

研部长杨晓铁高工、空军工程大学电讯工程学院院长李荣常高工几年来对本项研究工作的大力支持和鼓励。同时感谢(成都)电子科技大学胡渝教授的有益讨论。感谢研究生刘涛(女)、刘涛、石磊在书稿整理中的辛勤劳动。

由于作者水平有限,书中难免存在错误和缺点,恳请广大读者批评指正。

赵尚弘

2005年6月于西安

目 录

第 1 章 卫星光通信简介	1
1.1 卫星光通信概述	1
1.2 卫星光通信系统的应用	2
1.3 同微波系统的比较	2
1.4 卫星光通信系统发展概况	4
1.5 卫星光通信系统组成	5
1.6 卫星光通信系统面临的挑战和发展趋势.....	14
第 2 章 卫星光通信的关键技术	16
2.1 卫星光通信关键技术概述.....	16
2.2 光源.....	17
2.3 收发系统对光通信的影响.....	21
2.4 ATP 系统中的信号处理	24
2.5 常用光电敏感探测器件的性能分析.....	25
第 3 章 自由空间中高斯光束的传输特性	35
3.1 高斯光束的表述.....	35
3.2 高斯光束的特性.....	38
3.3 高斯光束的发送.....	39
3.4 高斯光束的空间传播.....	41
3.5 高斯光束的聚焦与准直.....	42
3.6 高斯光束的接收.....	46
3.7 背景干扰.....	46
第 4 章 卫星光通信的 ATP 系统	49
4.1 ATP 系统的组成及工作原理	49
4.2 ATP 系统的捕获方法	50
4.3 ATP 系统的控制算法	52
4.4 ATP 系统关键技术及其参数考虑	52
第 5 章 捕获	57
5.1 捕获基本原理.....	57
5.2 天线扫描.....	58
5.3 焦平面扫描.....	60
5.4 焦平面阵列.....	62
5.5 阵列顺序搜索(并行处理).....	63
5.6 固定阵列顺序搜索(串行处理).....	65

第 6 章 捕获时间最小化	67
6.1 系统配置和捕获协议	67
6.2 捕获时间最小化	70
6.3 总结	76
第 7 章 跟踪	78
7.1 空间跟踪	78
7.2 双向光束跟踪	83
7.3 光束跟踪对数据传输的影响	87
第 8 章 瞄准	89
8.1 瞄准光束特性	89
8.2 瞄准误差	89
第 9 章 卫星光通信系统的接收检测技术	92
9.1 接收检测原理	92
9.2 相干 PSK 零差接收机	93
9.3 相干 FSK 外差接收机	95
9.4 直接检测 OOK 系统 APD 接收机	96
9.5 直接检测 OOK 系统 PMT 接收机	97
9.6 直接检测 m-PPM 系统 APD 接收机	97
9.7 直接检测 m-PPM 系统 PMT 接收机	99
第 10 章 振动对 ATP 系统的影响及抑制	100
10.1 概述	100
10.2 带宽适应	100
10.3 改变光束宽度	103
10.4 功率控制	104
10.5 编码技术	104
10.6 通道分集	105
10.7 振动隔离	106
10.8 自我调节前向反馈	106
第 11 章 几种典型的卫星光通信系统	107
11.1 欧洲卫星光通信系统	107
11.2 美国卫星光通信系统	110
11.3 日本卫星光通信系统	113
第 12 章 编队卫星群间的光通信	119
12.1 编队卫星群简介	119
12.2 编队卫星群间的光通信	120
12.3 编队卫星光通信的多信号捕获方案	124
12.4 卫星激光通信中的多址联接	127
参考文献	130

第 1 章 卫星光通信简介

1.1 卫星光通信概述

卫星光通信是指利用激光光束作为信息载体进行的卫星间通信。环绕地球可以建立的卫星光通信链路包括:

- 轨道高度小于 1000 km 的低轨道(LEO, Low Earth Orbit)卫星与 36 000 km 高的同步轨道(GEO, Geosynchronous Earth Orbit)上的卫星间的链路。
- 同步轨道卫星间的链路。
- 低轨道卫星间的链路。
- 低轨道卫星与地面之间的链路。

社会的发展越来越多地依靠大量的信息,对通信带宽的需求也越来越高。尽管这些带宽要求能够通过传统的无线电、微波(波长为 1 mm 至 30 mm 的高频电磁波)和铜线得到满足,然而,随着激光的出现,可利用的带宽增加了许多量级。

把光子作为信息载体,是 20 世纪中的一个划时代变化,用光通信代替电缆和微波通信,使信息的传输发生了本质性的变革。自 20 世纪 60 年代激光器诞生以来,经过 40 多年的努力发展,激光通信技术取得了长足的进步,并已经成功地应用于各个通信领域。20 世纪 80 年代后,随着卫星通信的发展,特别是全球信息高速网络的发展,卫星信息传输容量剧增,常规的卫星微波通信已经不能满足需要。因此,在空间卫星通信频道日益拥挤的今天,卫星光通信以其通信容量大、速率高的优点,成为实现高码率卫星通信的理想方案之一。由于激光在太空中传播不会受到大气的影响,因此,可以认为太空是卫星光通信充分展示其优势和魅力的舞台。

早在 20 世纪 80 年代末,关于卫星间使用激光还是微波通信就引发了一场辩论。支持卫星间使用激光通信的一派根据光学基本原理充分阐述卫星光通信高码率、大通信容量的优点,而反对者则强调微波通信的可靠性。虽然光通信能达到高码率、大通信容量,但是其狭窄的发射光束(约十到几十微弧度)使得接收端捕捉激光束十分困难。因此捕获、跟踪、瞄准(Acquisition、Tracking、Pointing,总称 ATP)技术就成了卫星光通信首先要解决的问题。

在各种 ATP 技术方案中,美国 Therlmo Trex 研究所提出的采用原子滤光器的方案相当引人注目。该方案认为在接收端采用性能优异的超窄带宽的原子滤光器,就能够展宽视场角。通俗理解就是接收的门可以开得大些,这样卫星接收端就容易捕获到激光束。由于原子滤光器对太阳背景辐射的强烈抑制作用,发射端的信标信号光不会淹没在强烈的噪声

中, 卫星接收端就可以捕捉并跟踪锁定对方通信卫星的发射光束, 这个过程被称为光链路的建立。这种含有原子滤光器的接收装置, Thermo Trex 研究所称之为激光无线电装置。该项发明被 1996 年美国技术创新发现奖评为航空航天类五项入围技术之一, 并引起商业通信公司的深切关注。

1.2 卫星光通信系统的应用

卫星光通信的应用领域可以分为三个方面:

- 轨道之间通信(IOL)。
- 卫星之间通信(ISL)。
- 深层空间任务(DSM)。

1. 轨道之间通信

轨道之间通信用于从低轨道的飞行器 LEO(如地球卫星、人造空间站、Hermes 基地平台等)向同步地球轨道飞行器 GEO(通常是数据中继卫星 DRS)传输数据。这种通信回传链路(LEO - GEO)需要较高的传输速率, 通常在 500 Mb/s 量级; 正向传输(GEO - LEO)只需提供一些遥控信号, 传输速率约为 25 Mb/s。

2. 卫星之间通信

卫星之间通信主要用于有商业价值的语音、视频和数据的传输。这种通信是通过两个同步地球通信卫星之间形成的星际链路进行的。该链路特别适用于地球两端的通信, 可以避免使用另外三个地面中继站以及遭受地面微波链路的干扰。

3. 深层空间任务

深层空间任务是指除地球外的自然星与人造卫星间的通信。该通信提供从行星, 例如火星(距地球约 7.8×10^7 km)、土星(距地球约 1.278×10^9 km)到同步地球卫星之间的深层空间高速数据传输。

1.3 同微波系统的比较

使用光通信的一个主要优点是减小了信号发射孔径及发散角, 大大提高了系统增益。对于短波长衍射极限的光束, 天线增益为

$$G_a = 20 \lg\left(\frac{\pi D_a}{\lambda}\right) \quad (1.3.1)$$

其中, λ 代表光波长, D_a 代表天线(望远镜)的直径。光发射机半功率光束发散角为

$$\phi_a = 1.03 \left(\frac{\lambda}{D_a}\right) \quad (1.3.2)$$

需要指出的是, 公式(1.3.1)和公式(1.3.2)不论对微波和光波都成立。

微波通信和光波通信的一个主要区别是波长的不同。光波的波长要短得多, 因此光束

发散角很小，光斑也很小。

因为卫星光通信具有较高的天线增益，因此可以：

- 降低天线(望远镜)孔径(例如 $D=10\text{ cm}$)。
- 提高数据传输速率。
- 增加传输距离。例如，可以到达几百万千米的深层空间。

在中等频率(IF)的微波系统中，接收机的信号噪声比(S/N)为

$$\frac{S}{N} = \frac{P_r}{k_B T_0 B} \quad (1.3.3)$$

其中， P_r 代表接收到的信号功率， k_B 是玻尔兹曼常数， T_0 是绝对坐标系下的温度， $B=1/T$ (T 是数据传输周期) 是 IF 信号的奈奎斯特采样带宽。与此对应的相干(外差)光接收机的信噪比表达式为

$$\frac{S}{N} = \frac{P_r}{hfB} \quad (1.3.4)$$

式中， h 是普朗克常数。如果实际所取的带宽为奈奎斯特采样带宽的两倍，则公式(1.3.3)和公式(1.3.4)都要乘以 2。

对公式(1.3.3)和公式(1.3.4)进行比较就可以发现，微波通信系统的热噪声 $k_B T_0$ 对应于光通信系统中的量子噪声 hf 。根据热力学理论，在温度为 T_0 的热平衡状态，对于频率为 f 的振动， $k_B T_0$ 和 hf 是决定其噪声极限的两个因素。对于微波频率， $hf \ll k_B T_0$ ，因此热噪声决定了其噪声极限；但是对于光波频率，情况却不一样，其它一些噪声如背景噪声、光前放噪声等同量子噪声相比都不能忽略。这时，在公式(1.3.4)的分母中还要加上一项 F_i ，即接收机的噪声系数(NF)。 F_i 的取值范围为 $1 \sim \infty$ 。 F_i 越小，接收机的性能越好。

光通信和微波通信相比，天线直径和重量都大大降低，这一点在卫星通信中非常重要，尤其是要求传输速率较高时更有必要。比如卫星遥感图像的分辨率越高，要求卫星传输速率越高。对于地球观测卫星，希望传输速率达到 1 Gb/s，而对于火星观测卫星，希望传输速率达到 10 Mb/s，此时，卫星光通信就可发挥优势。

总而言之，卫星光通信与微波通信相比，具有如下优点：

(1) 增加了带宽，信息容量加大。微波频率大致在数吉赫到数十吉赫量级，而激光的频率大致在数百太赫量级，比微波高 3~5 个数量级，因而可以得到高得多的数据传输速率。

(2) 尺寸小，重量轻。由于卫星光通信的能量利用率高，使得发射机及其仪电系统的重量减轻；由于激光的波长短，在同样的发散角和接收视场角要求下，发射天线和接收天线的口径都可以减小。

(3) 方向性强，功率密度增加。激光波长大致在微米和亚微米量级，而射频和微波波长则在数十厘米到毫米量级。根据波动光学理论，在相同通光口径的情况下，光波衍射极限发散角正比于波长。因此，激光束比微波波束的发散角小 3~5 个量级，增加了接收端的能量密度，并为减轻质量、减少功耗、增加工作距离提供了基本条件。

(4) 高度的保密性。由于激光束宽远小于微波束宽，捕捉和干扰非常窄的激光束是很困难的，因此满足了保密性和抗干扰性的要求，使得通信过程更加安全。

(5) 深空对于光波是一种优良的传输媒质，光波在深空中传输损耗小，传输同样数据

和信息,光通信的性价比最高,很适合于卫星与卫星、地面站与卫星、卫星与航天飞机等空间站之间高码率的信息传输。

1.4 卫星光通信系统发展概况

在光通信中,远距离和高比特率一直是人们努力追求的方向,人们正在为 21 世纪信息时代的需求研制各种新的光通信系统。

目前卫星光通信已经从理论研究进入到应用研究的试验阶段,发展日新月异。卫星光通信的出现是现代信息社会对大容量、远距离、低成本通信需求的必然结果,而它的优点也表明了它能够担此重任,但就目前技术水平来看还有许多关键技术尚待解决,要进入实用化阶段还需要一定的时间和更多的努力。

全球卫星光通信的研究目前主要是由政府支持的。如欧洲航天局(ESA)、日本政府、美国国家航空航天局(NASA)和国防部(DOD)等。下面介绍国际上卫星光通信的研究状况。

1. 美国

美国是世界上开展卫星光通信研究最早的国家,主要研究部门是美国国家航空航天局(NASA)和美国空军(Air Force)。

美国国家航空航天局选择喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)进行卫星光通信系统的研制。JPL 计划开始于 1979 年,随后开发了一台光通信演示器(OCD)——实验室证实的工程模型,且产生了许多系统级的演示。1995 年完成了激光通信演示系统(Laser Communication Demonstration System, LCDS),数据率为 750 Mb/s,该系统要求至少有一个通信端机在太空中。其研究的目的有两个:一是演示两个运动平台之间及平台与地面之间的高码率光通信链接;二是论证在未来的卫星通信中,激光通信与无线电通信相比,在性能、体积、重量、功耗及传输码率等方面的优势。

美国的战略导弹防御组织(BMDO)也在积极进行卫星光通信的研制开发工作,该工程由空军提供主要经费,由麻省理工学院林肯实验室进行有关关键技术的研究。2000 年 6 月 7 日, BMDO 宣布: STRV-2 在美国西部标准时间上午 6:29 从范登堡空军基地成功发射。STRV-2 是空军空间测试计划的 TSX-5 卫星的主要有效载荷。它包含一套高级技术试验,这些试验包括高带宽激光通信系统、一个有源振动抑制系统、空间辐射影响和微流星体传感器、一个低成本复合空间结构以及一个红外传感器试验。

2. 欧洲

1977 年夏天,欧洲航天局(ESA)开始了一项关于空间高数据率激光链路的调制器评估的研究计划,这标志着一个 ESA 卫星光通信长期计划的开始。ESA 在卫星光通信研究方面不仅起步早,而且制定了一系列研究计划,在近 20 年的时间里对有关技术进行了有步骤、周密详细的研究。

从 1985 年起,ESA 开始实施半导体激光卫星间链路试验(SILEX)计划,即在两颗卫星间建立实验性激光通信链路,其主要目的是在实验和预研的水平上,研制并验证所有有

关卫星间激光通信的单元和子系统。SILEX 是一个自由空间卫星光通信系统,它由两个光通信有效载荷组成,被装载在 ESA 的高级中继和科技任务卫星 ARTEMIS(Advanced Relay and Technology Mission Satellite)空间飞行器和法国地球观测卫星 SPOT-4 上。它用 AlGaAs 激光二极管进行直接探测,将数据以 50 Mb/s 的速率从 LEO 发射到 GEO。

欧洲的第一个卫星间激光通信系统,也是世界上第一个民用激光通信系统——SILEX 系统已经设计完毕。装载了 SILEX 系统的 ARTEMIS 同步轨道卫星已于 2001 年 7 月发射,并实现了与 1998 年 2 月发射的 SPOT-4(LEO satellite)之间的光通信实验。在实施 SILEX 计划的同时,欧洲航天局还致力于一些旨在使卫星光通信更实用化和商业化的高级系统的关键技术和关键元器件的研究。例如:高功率固体激光器、大型电光调制器、高码率相干光接收机、捕获和跟踪器件、单镜精定位组件、相控接收天线阵列等,并取得了很大的成就。

3. 日本

日本于 20 世纪 80 年代中期就开始了光学空间通信研究工作,研究单位主要是日本航天局(NASDA)和邮电省通信研究实验室(Communication Research Laboratory, CRL)。

日本航天局的主要系统是始于 1985 年的 LUCE(Laser Utilizing Communication Equipment)系统,它安装于 OICETS(Optical Inter-orbit Communication Engineering Test Satellite)卫星(在 2000 年夏天发射)上,该通信端机和欧洲的 SILEX 通信端机兼容,并与 ESA 的 GEO 轨道上的 ARTEMIS 卫星上的 SILEX 系统进行了光通信实验,在轨道上证实对准、捕获和跟踪技术,以及轨道间光通信的其它关键技术。LUCE 采用 26 cm 孔径天线、0.847 μm 波长、50 Mb/s 强度调制、200 mW 激光器。在 ARTEMIS 端采用 0.819 μm 波长激光器、2.048 Mb/s 速率直接探测。

日本邮电省的 CRL 从 20 世纪 70 年代初就开始卫星光通信相关技术的研究工作,主要进行卫星间的空间光束跟踪技术研究,以及地—空激光通信技术的理论和实验研究,取得了满意的结果。CRL 开发的卫星光通信设备(Laser Communication Equipment, LCE),装载于 1994 年 8 月 28 日发射的 ETS-VI 实验卫星上,进行空间激光通信系统的基本技术的演示。该卫星没有被发射到原计划的 GEO 轨道上,且由于轨道错误影响了其寿命。在 ETS-VI 有限的寿命(1994~1996)内,CRL 和 NASA 的 JPL 进行了一些空—地实验。实验中使用强度调制和直接探测(IM/DD),建立了 1.024 Mb/s 的双向链路,卫星上使用 7.5 cm 直径天线。下行链路使用波长 0.83 μm 、13.8 W 的 AlGaAs 激光二极管。东京的上行链路采用 0.51 μm 波长的 argon 激光器,天线孔径 1.5 m。值得一提的是,1995 年,美国与日本两颗相距 3 万千米的卫星实现了互联,并成功地通话了 8 min,是卫星光通信的第一次突破。

1.5 卫星光通信系统组成

1.5.1 系统组成

卫星光通信系统主要包括信号传输(通信),空间光束的捕获、对准和跟踪(ATP)两大

子系统。完成光的长距离传输会产生很大的光能量损失，接收的光信号往往十分微弱，此外，背景光(太阳、月球、地球、星体等)也会产生很强的干扰，这就大大增加了光信号的接收难度。因此，在较远的距离和较强的背景干扰下，如何捕获、对准和跟踪光束，是一个光、机、电精密结合的综合技术，也是卫星光通信的核心技术之一。由于卫星光通信系统的通信信号光束发散角非常小，如果利用信号光束进行瞄准、捕获将会是非常困难的过程。因此，要完成空间光束的捕获、跟踪及瞄准，通常采用信标光来完成。ATP系统的主要功能是确保两个通信终端的精确定向，因为最大允许的指向误差常常是微弧度量级，因此ATP也就成为卫星激光链路成功与否的关键。

根据卫星光通信的特点及要求，一个典型的光学通信终端是由光源、天线、ATP系统、调制及检测等单元组成。其总体框图如图1-1所示。

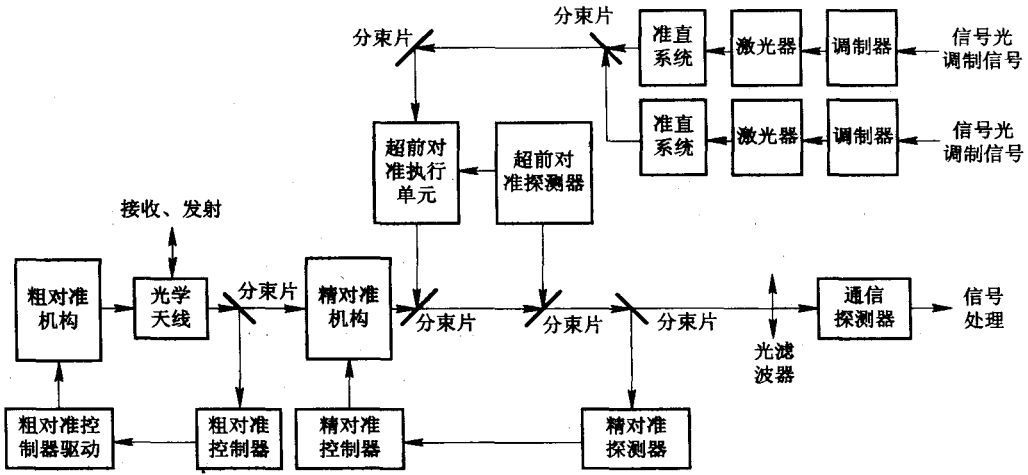


图1-1 一个典型的卫星光通信框图

卫星光通信终端的工作过程简述如下：

(1) 发射过程。系统采用信号光和信标光分离的方式，使用不同的激光器。信号光与信标光经准直系统对激光进行光束准直后，具有了合适的发散角，两束光由合束器合成为一束光，经分光片、精对准机构、天线后发射出去。

(2) 接收过程。接收到的光经过光学天线、分束片。一部分信标光至粗对准探测器，输出信号由粗对准控制器控制，驱动粗对准机构，完成捕获和粗对准；另一部分信标光经精对准机构、分光片、分束片至精跟踪探测器，由精对准控制器控制精对准机构，从而完成双方的精确对准和跟踪。信号光由信号光探测器检测。

卫星光通信终端系统主要分为三大部分：

- 光收、发端机。
- 光学天线系统。
- 捕获、瞄准、跟踪(ATP)系统。

1.5.2 光发射端机

光发射端机主要包括激光器、调制驱动器等，其中最重要的是激光器。

1. 激光器的选择

在卫星光通信中,通信光源至关重要。它直接影响天线的增益、探测器件的选择、天线直径、通信距离等参量。作为激光光源的激光器是激光通信机的核心部件之一,典型应用中经常选择半导体激光器为光源,并同时使用两只激光器,分别作为信标光源和通信光源。

1) 信标光激光器

由于信标光是用于系统的 ATP,为使双方搜索方便,减少捕获时间,信标光源应有较大的光束发散角;为保证接收端能收到足够强的光信号,作为信标光光源的激光器应有足够强的发射功率。

2) 信号光激光器

通信用激光器应有较好的光束质量和较高的调制频率响应,由于信号光采用较小的发散角,故可采用功率较小的激光器。

2. 波长的选择

在 $0.8\ \mu\text{m}$ 波段,不仅具有成熟而可靠的器件,同时也具有实际的星上试验经验,因此,这一波段的激光器一直为激光通信所首选。近年来, $1.55\ \mu\text{m}$ 激光器加掺铒光纤放大器的方案也逐渐为人们所接受。一个功率为 $10\ \text{W}$ 、数据率大于 $2.5\ \text{Gb/s}$ 、波长为 $1550\ \text{nm}$ 的激光器收发机已问世。最近,大功率 ($>1\ \text{W}$) 及高数据率 ($>2.5\ \text{Gb/s}$) 的激光器收发机已经由 $980\ \text{nm}$ 的半导体 MOPAS 担当。同时,德国也在研究使用 $1.06\ \mu\text{m}$ 波段的激光器。

1.5.3 光接收端机

光接收端机主要包括光探测、低噪声前放及后续信号处理电路。

光探测是整机的重要组成部分。它主要完成以下功能:

- 探测对方发来的信标光,确定信标光的位置,给出位置误差信号以用于驱动 ATP 单元,校正接收天线的方向,完成双端天线的粗对准。
 - 在天线已粗对准的前提下,探测对方发来的信号光,并利用信号光在四象限探测器上的坐标,确定信号光的位置,给出位置误差信号并提供给 ATP 单元,完成双端天线的精对准及跟踪。
 - 探测对方发出的信号光,接收通信信号,完成通信功能。
- 为此,光探测器应包括粗对准探测器、精对准探测器、超前对准探测器及通信探测器。

1. 信号光接收的分析

信号光探测器完成通信任务,应有高的灵敏度,高的光电转换效率,低的噪声系数,宽的带宽。接收通信信号的探测器一般都选用雪崩光电二极管 (APD),因为 APD 有很高的增益。通常,对于 $0.8\sim 0.9\ \mu\text{m}$ 波长,常采用 Si-APD 作探测器;对于 $1.55\ \mu\text{m}$ 加掺铒光纤放大器 EDFA 系统,可采用 InGaAs/InP 或 Ge 探测器。

2. 信标光接收的分析

信标光主要是作为 ATP 单元技术中提取误差信号的光源,通常在跟踪技术中分为粗跟踪、精跟踪两部分。卫星光通信系统的捕获、跟踪基本上都是采用高精度 CCD 传感器完成的。

激光的探测技术分为直接探测和外差探测两种。将入射到探测器上的光功率转换为相应的光电流的探测方式称为直接探测。光电探测之前接收机通过本地光场叠加到接收光场上来工作的检测方式称为外差(相干)探测,它要求光场空间准直,光源稳定。在现有的卫星光通信系统中,由于均采用半导体激光器作为光源,探测都采用直接探测方式。随着半导体激光器泵浦 Nd:YAG 激光器(DPL)的发展,相干探测系统也得到不断的改进。由于相干探测有着比直接探测高得多的灵敏度,当 DPL 发展到成熟阶段时,卫星光通信的探测方式将转变为以相干探测为主,这将进一步提高卫星光通信的质量。

1.5.4 光学天线

1. 光学天线的作用

光学天线(望远镜)的作用有以下两个方面:

- 对发射光束进一步扩束准直,扩大发射系统的光斑尺寸,压缩光斑的接收角。
- 接收另一个终端发过来的光信号,将其聚焦并耦合到光电探测器上。

对望远镜的基本要求有:

1) 要有适当的发射增益

发射天线增益的物理意义为:天线发射的光波强度与相同辐射功率条件下理想的各向同性辐射强度的比值。同 G_t 来表示发射天线的增益,对于无遮挡型望远镜,在光轴上($\theta=0$)的增益为

$$G_t(0) = \frac{32}{\theta_t^2} \quad (1.5.1)$$

其中, θ_t 为激光的发散角,其值为

$$\theta_t = \frac{1.22\lambda}{D} \quad (1.5.2)$$

式中, λ 为光波长, D 为发射孔径。因此,发射天线的对数增益为

$$G_t = 10 \lg G_t(0) = 10 \lg \frac{32}{\theta_t^2} \quad (1.5.3)$$

若天线孔径为 20 cm, $\lambda=0.8 \mu\text{m}$, 则 θ_t 为 $5 \mu\text{rad}$, 天线增益可达 121 dB。

2) 要有较高的接收增益

由于到达接收天线的光斑尺寸远远大于接收天线的直径,可认为在接收天线上的光束为平面波,其能量分布是均匀的。这样,天线的接收增益为

$$G_r = 10 \lg \left(\frac{2\pi a}{\lambda} \right)^2 \quad (1.5.4)$$

其中, a 为接收孔径,若 $\lambda=0.8 \mu\text{m}$, $a=200 \text{ mm}$, 则 $G_r \approx 124 \text{ dB}$ 。

3) 要有较低的光学损耗

低的光学损耗能保证激光能量的有效利用。对反射式望远镜其每个面的反射率应大于 98.9%,透射式望远镜应镀增透膜,透过率大于 80%。

2. 光学天线的选择

卫星光通信系统的发射、接收天线实际上就是一个光学望远镜,天线的形式根据具体情况可采用卡塞格伦型反射式天线或透射式天线。一般说来,在常选用的卫星光通信波段

范围,对于孔径较大的天线,如 SILEX 系统的 25 cm 天线,可采用反射式天线,这有助于降低天线的制造难度,提高天线的可靠性,减轻重量;而在天线孔径较小时,则选用透射式天线,如小光学用户终端(SOUT)的天线系统。

由于天线的孔径直接影响着天线的增益,孔径越大,增益越大,因此从提高天线增益的角度来说,卫星光通信系统的天线孔径应当选取大一些。但是,孔径增大,天线的体积、重量也要增加,会增加 ATP 系统的难度,故星上天线孔径也不能过大。一般卫星光通信系统的星上天线孔径在 30 cm 左右,如 SILEX 系统装于 GEO 卫星上的天线孔径为 25 cm,装于 LEO 卫星上的为 18 cm;JPL 研制的卫星光通信系统接收天线孔径为 32 cm;日本进行空一地光通信实验的卫星光通信系统的星上天线孔径为 30 cm。

美国 JPL 的卫星光通信系统中收发天线不共用,且用两个 600 Mb/s 的通道实现 1.2 Gb/s 的通信数据率,而欧、日是收发天线共用,单通道通信。收发不公用的优点是可降低损耗,缺点是使终端体积增大,而收发共用的优点是光终端体积小,但由于增加分光镜等分光器件,使光能的损耗增加。

1.5.5 光学系统

光学系统指除光学天线外的其它光学元件,包括光学透镜、合束镜、反射镜、分光片、光滤波器等。

1. 光学透镜

激光器的准直由光学透镜完成。由于半导体激光器的发散角通常为几度到几十度,光学透镜应能完成对 LD 发出的激光进行准直、整形和匹配,达到预定的发散角。要求透镜的光学质量高、象差小。若系统采用信标光与信号光分离的方案,则对信标光和信号光应有不同的光学透镜设计。

2. 合束镜

合束镜的作用是将两只激光器的光合为一束。要求合束镜有高的合束精度,应达到光发散角的 1/10 以下或甚至 1%,以充分利用光能量。

3. 分光片

分光片对不同波长的光的反射、透射率不同,可以根据需要对光能进行分配。

4. 光滤波器

光滤波器是用来进行波长选择的仪器,它可以从众多的波长中挑选出所需的波长,而除此波长以外的光将会被拒绝通过。它在此处的作用是抑制背景光,将系统接收到的背景噪声进行有效的压缩,提高接收系统的信噪比。一般可采用带通滤波器来抑制背景光的影响。

5. 分束片

分束片将接收到的光按合适的分光比分为两路,一路送入 ATP 接收探测器,一路送入通信探测器。