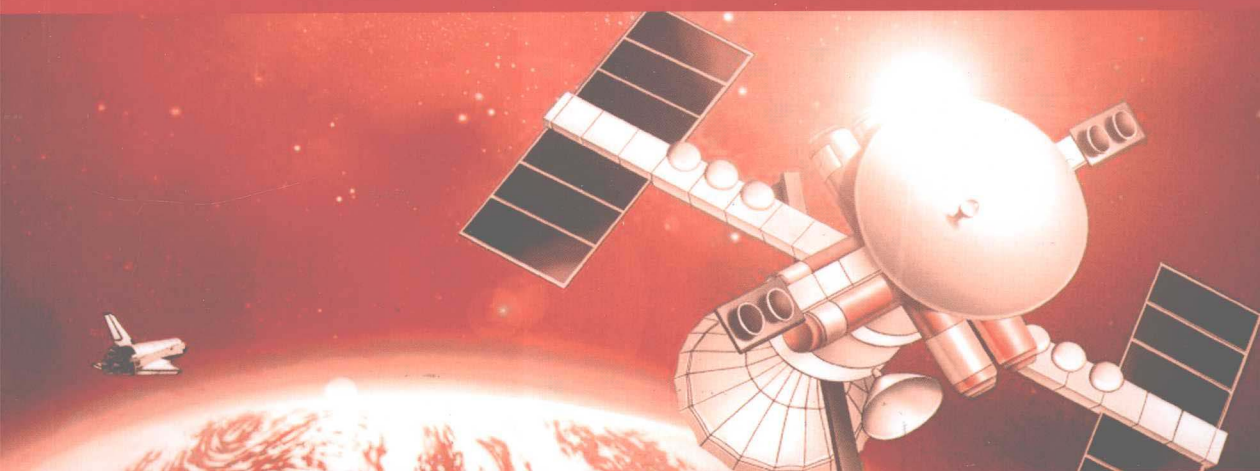


卫星光网络技术



赵尚弘 李勇军 吴继礼 编著



科学出版社
www.sciencep.com

卫星光网络技术

赵尚弘 李勇军 吴继礼 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

卫星光通信是 21 世纪新兴的通信技术,具有容量大、速率高、体积小、质量轻、功耗低以及高保密性和抗电磁干扰等优势,被公认为是构建未来天基信息系统的理想方案,在预警侦察、导航定位、深空探测以及全球通信等军事和民用领域具有广泛的应用前景。

本书内容丰富、新颖,理论讲解与技术实现相结合,是国内首部卫星光网络领域的专著。全书由卫星光通信技术和卫星光网络技术两大部分组成,详细介绍了卫星光通信系统原理,卫星光通信捕获、跟踪和瞄准技术,空间光信号的传输与接收,卫星激光链路组网体系结构,网络拓扑结构设计,路由算法等关键技术。

本书可作为空间光通信专业研究生的试用教材,也可供从事光通信及相关领域专业的科研人员 and 高等院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

卫星光网络技术/赵尚弘,李勇军,吴继礼编著. —北京:科学出版社, 2010. 3

ISBN 978-7-03-027002-3

I. ①卫… II. ①赵…②李…③吴… III. ①卫星通信:光通信-通信网 IV. ①TN915. 63

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 043124 号

责任编辑:王志欣 任 静 / 责任校对:陈玉凤

责任印制:赵 博 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

丽源印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010 年 3 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2010 年 3 月第一次印刷 印张: 17 1/2

印数: 1—3 000 字数: 338 000

定价: 50.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

基于激光链路的卫星光通信网络,作为未来空间宽带信息系统的可选方案,在近年来备受关注,它也是国际上的一个研究热点,国外时有一些令人振奋的典型试验系统的研究进展。近闻美国国会停止了其转型卫星系统中卫星激光通信系统的经费,我想这不是说在空间发展激光传输系统的决策错误,或者激光通信技术在空间传输上困难太大、行不通;而应该主要是出于经济形势、国际政治形势的某些考虑吧。卫星激光通信技术一定会不断发展,并在可见的时间里建设起实用的空间激光链路和网络,承担起在广袤太空传递高质量、大容量信息的重任。

赵尚弘教授及其研究团队在 2005 年出版了《卫星光通信导论》,最近又在此基础上编写了新作《卫星光网络技术》,我有幸先看了书稿。这本书收集了很多国内外的研究资料,列出了不少参考文献,免除了读者繁琐的查阅工作。同时,书中也有编著者的研究心得,值得学习、讨论。书中用了较大篇幅介绍卫星激光通信技术的系统及链路技术,这是符合当前此技术发展水平及系统建设的实际的。书中也讨论了卫星激光网络及编队飞行,鉴于目前实际上还没有规模的哪怕是实验的卫星激光网络,书中在讨论卫星光网络拓扑结构等内容时,只能用有关的卫星微波网络来举例,可以理解。关于卫星激光网络,深入的、有规模的研究工作尚未真正开始,还有大量事情要做,还需大家努力。

总体看,这是一本推动空间光通信发展的好书,特别适合初接触卫星激光通信的学生、教师、科技人员阅读。我愿向有兴趣研究、关心空间激光通信的各位推荐此书,也想借此书出版之机,再次呼吁加强空间激光通信技术的研究,包括星一地自适应激光通信的研究等。

杨千里

2009 年 11 月于北京

前 言

卫星光通信是一种新兴的通信技术,与微波通信相比,具有极强的保密性和抗电磁干扰能力,同时,它还具有宽带宽、高速率、大容量、低功耗和小体积等优点,是实现空天一体全球宽带互联的理想选择,在民用和军事领域都具有广泛的应用前景。利用卫星激光链路技术整合现有卫星资源,发展星上信息处理技术,将静止轨道卫星、中轨道卫星、低轨道卫星以及飞船、航天飞机、空间站、深空和近空间探测器连接在一起构建卫星光网络能极大发挥卫星光通信的潜能。以卫星为主的空间激光信息网络有望形成像地面信息高速公路一样的空间高速信息通道,在全球范围内实现无缝覆盖,使各类移动终端能够随机接入,在军事预警侦察、导航定位、深空探测和遥感遥测等方面将发挥巨大作用。卫星激光链路组网是一个涉及通信三大主题,即光、网络和无线通信的综合性课题,也是航天领域一个具有时代性、前瞻性、战略性的新概念系统工程。我国深空探测、载人航天的发展,以及我空军 21 世纪新发展战略的实现将越来越依赖于以卫星光网络为主的强大天基信息支援系统。

作者从 2001 年开始从事卫星光通信方面的研究工作,已于 2005 年出版专著《卫星光通信导论》。2007 年承担国家高技术发展研究计划(863)项目“基于激光链路的卫星光网络体系结构研究”及其他军内外相关科研项目。目前国内对卫星光网络的研究还处于起步阶段,为了给广大读者一个较为完整的系统介绍,在多届研究生教学讲义的基础上,将散见于国内外各种学术期刊上的最新研究成果加以汇总,结合作者课题组的研究成果完成了本书。全书系统介绍了卫星光通信从链路到组网的基本原理和主要技术内容。希望给初涉该领域的读者提供一个较系统的入门读物,为推动我国空间光通信的研究起到抛砖引玉的作用。

全书共 11 章,分为两部分,上部分第 1~6 章为卫星光通信技术,下部分第 7~11 章为卫星光网络技术。第 1 章~第 3 章介绍了卫星光通信系统原理及组成,重点研究了卫星光通信捕获、跟踪和瞄准技术,以及振动对跟瞄系统的影响及抑制方法。第 4 章~第 6 章介绍了卫星光通信中光信号的产生、发送以及接收检测。第 7 章~第 11 章主要研究了卫星激光链路组网体系结构、网络拓扑结构设计、路由算法及编队卫星组网等关键技术。

研究生刘兰、侯睿、李田等参与了全书的资料整理和图表绘制工作。杨千里教授对本课题组多年来的研究工作给予了很多指导帮助,北京邮电大学王柏义教授在本书的编写过程中提供了很多宝贵建议,在此一并表示衷心的感谢!

由于本人知识水平有限,书中疏漏和不当之处在所难免,恳请广大读者指正。

目 录

序

前言

第 1 章 卫星光通信技术简介	1
1.1 引言	1
1.2 卫星光通信系统原理及组成	2
1.2.1 光发射端机	3
1.2.2 光接收端机	4
1.2.3 光学天线	5
1.2.4 光学系统	6
1.2.5 ATP 子系统	7
1.2.6 其他参数	9
1.2.7 卫星光通信的关键技术	10
1.3 激光链路优势	11
1.4 国内外研究现状和发展趋势	13
1.4.1 国外研究现状	13
1.4.2 国内研究现状	25
1.4.3 卫星光通信发展趋势	26
参考文献	27
第 2 章 空间 ATP 技术	30
2.1 ATP 系统的组成及工作原理	30
2.1.1 粗瞄准机构	30
2.1.2 精瞄准机构	31
2.1.3 预瞄准机构	31
2.1.4 传感器	31
2.1.5 ATP 系统的原理	31
2.2 ATP 系统关键技术及其参数设置	32
2.2.1 ATP 的关键技术	32
2.2.2 信标光链路分析	32
2.2.3 跟踪灵敏度	33
2.2.4 捕获灵敏度	33
2.2.5 瞄准性能	34

2.3	光束捕获技术	36
2.3.1	捕获基本原理	36
2.3.2	捕获方法	38
2.3.3	天线扫描	39
2.3.4	焦平面扫描	41
2.3.5	焦平面阵列	43
2.3.6	阵列顺序搜索	44
2.3.7	固定阵列顺序搜索	46
2.4	捕获时间优化	48
2.4.1	系统配置和捕获协议	48
2.4.2	捕获时间最小化	51
2.5	光束跟踪技术	59
2.5.1	空间光束跟踪原理	59
2.5.2	空间双向光束跟踪	65
2.5.3	光束跟踪对数据传输的影响	69
2.6	光束瞄准技术	71
2.6.1	瞄准光束特性	71
2.6.2	瞄准误差	71
	参考文献	73
第3章	卫星振动对 ATP 系统的影响及抑制	75
3.1	概述	75
3.2	自适应带宽	75
3.3	改变光束宽度	78
3.4	功率控制	79
3.5	编码技术	80
3.6	通道分集	81
3.7	振动隔离	81
3.8	自我调节前反馈	82
	参考文献	82
第4章	光信号的产生、发送与传输	84
4.1	光源	84
4.1.1	卫星光通信对光源要求	84
4.1.2	半导体激光器光源	84
4.1.3	光纤激光器光源	86
4.1.4	其他激光器光源	87

4.2 高斯光束的特性	87
4.3 高斯光束的发送	92
4.4 高斯光束的空间传播	95
4.5 高斯光束的聚焦与准直	96
4.5.1 高斯光束经透镜后参数的变化	96
4.5.2 高斯光束的准直	98
4.6 高斯光束的接收	100
4.7 背景干扰及滤波	100
4.7.1 背景干扰	101
4.7.2 滤波	103
4.8 空间环境对卫星光通信系统影响	103
4.8.1 高能带电粒子对卫星光通信的影响	104
4.8.2 背景光辐照对卫星光通信的影响	108
4.8.3 等离子体对卫星光通信的影响	110
4.8.4 其他环境对卫星光通信的影响	112
参考文献	113
第5章 空间光信号调制原理与技术	115
5.1 光信号调制基本参量	115
5.1.1 振幅调制	116
5.1.2 频率调制和相位调制	116
5.1.3 强度调制	117
5.1.4 脉冲位置调制	117
5.1.5 DPPM 调制	119
5.1.6 DH-PIM 调制	120
5.1.7 几种 PPM 调制性能比较	120
5.2 光信号体调制器	121
5.2.1 电光强度调制	121
5.2.2 电光相位调制	124
5.3 波导调制器	125
5.3.1 波导调制原理	125
5.3.2 波导相位调制	126
5.3.3 波导强度调制	127
参考文献	128
第6章 空间光信号接收	129
6.1 接收检测原理	129

6.2	相干 PSK 零差接收机	130
6.3	相干 FSK 外差接收机	132
6.4	直接检测 OOK 系统 APD 接收机	134
6.5	直接检测 OOK 系统 PMT 接收机	135
6.6	直接检测 m-PPM 系统 APD 接收机	135
6.7	直接检测 m-PPM 系统 PMT 接收机	137
	参考文献	138
第 7 章	卫星光网络系统设计	139
7.1	卫星光网络概述	139
7.2	空间网络协议体系	141
7.3	分级卫星光网络设计	142
7.3.1	空间光频率与调制	142
7.3.2	空间网络拓扑模型	144
7.3.3	空间数据链路模式	144
7.3.4	空间信道编码	145
7.3.5	空间路由协议	146
7.3.6	空间网络故障恢复	146
7.4	卫星网络业务要求	147
7.4.1	电信业务估算	147
7.4.2	点到点连接带宽	148
7.4.3	星上处理载荷	149
7.5	卫星光网络管理	150
7.5.1	一般网络管理	150
7.5.2	卫星光网络管理	151
7.6	空间卫星光网络构建方法	152
	参考文献	156
第 8 章	卫星光网络链路特性及拓扑结构	158
8.1	卫星节点特性	158
8.1.1	卫星轨道参数	158
8.1.2	卫星轨道方程	159
8.1.3	卫星轨道分类	162
8.1.4	星下点轨迹	165
8.2	通信卫星覆盖	166
8.3	星间激光链路	169
8.3.1	星间激光链路分类	169

8.3.2 星间激光链路坐标转换	171
8.3.3 星间激光链路空间位置	172
8.3.4 星际激光链路空间位置	173
8.4 卫星光网络动态拓扑	175
8.4.1 单层卫星光网络拓扑	177
8.4.2 极轨道卫星星座	178
8.4.3 倾斜轨道卫星星座	180
8.4.4 编队卫星	182
8.4.5 多层卫星光网络拓扑	183
8.5 几种典型的卫星网络系统	184
参考文献	191
第9章 WDM 卫星光网络技术	192
9.1 光传输网结构	192
9.1.1 传送网的分层和分割	192
9.1.2 光传送网的功能和结构	193
9.2 WDM 卫星光通信组网方案	193
9.2.1 波长路由卫星激光链路组网	193
9.2.2 波长通道网络与虚波长通道网络	195
9.2.3 卫星光网络光传输网设计	196
9.2.4 波长通道模型	197
9.3 光学/RF 混合节点模型	201
9.4 光分叉复用器 OADM	203
9.5 光交叉连接器 OXC	206
9.6 波长分配算法	208
9.7 通信量路由选择和 OTN 的 ISL 尺寸	209
9.7.1 基于 WDM 的通信量路由选择	209
9.7.2 卫星光网络的光路容量的设计	210
9.7.3 卫星光网络的故障恢复	211
9.8 时延问题	211
9.9 小结	212
参考文献	213
第10章 卫星光网络路由算法	214
10.1 卫星网络路由算法概述	214
10.2 卫星网络路由算法研究现状	215
10.3 卫星光网络路由算法的分类	217

10.3.1 面向连接的卫星网络路由算法	217
10.3.2 面向无连接的卫星网络路由算法	220
10.4 卫星 IP 业务	229
10.4.1 卫星通信在 Internet 中的应用	230
10.4.2 多址接入控制	232
10.4.3 卫星 TCP/IP 协议	233
10.4.4 卫星 Internet 架构	241
10.5 卫星网络业务	241
10.5.1 通信业务理论	241
10.5.2 M/M/n 排队模型	242
10.5.3 M/M/n/N 排队模型	243
10.5.4 链路容量设计	245
10.6 卫星网络的仿真工具	250
10.6.1 卫星网络协议仿真系统	250
10.6.2 卫星网络星座仿真系统	252
参考文献	253
第 11 章 编队卫星光通信	256
11.1 编队卫星群简介	256
11.1.1 编队卫星群的概念	256
11.1.2 编队卫星的优点	256
11.2 编队卫星群间的光通信	257
11.2.1 星间通信概念	257
11.2.2 编队卫星间通信系统组成	257
11.2.3 编队卫星间激光通信链路的特点	257
11.2.4 编队卫星激光链路的网络拓扑结构	258
11.2.5 编队卫星间通信的主要关键技术	259
11.2.6 国内外编队卫星间通信技术现状	260
11.3 编队卫星光通信的多信号捕获方案	261
11.3.1 多信号捕获方案	261
11.3.2 数学分析	262
11.4 卫星激光通信中的多址连接	265
11.4.1 多址连接含义	265
11.4.2 几种常用的多址连接方式	266
参考文献	267

第 1 章 卫星光通信技术简介

1.1 引言

光通信包括地面的有线光通信和空间的无线光通信两个重要部分。有线光通信就是光纤通信,是以激光为信号载波、光导纤维为传输介质的通信方式,已经成为十分成熟的通信手段。无线光通信也是以激光为信号载波、空间或大气为传输介质的通信方式。随着通信技术和计算机技术的飞速发展,人们的信息交流越来越频繁,方法也越来越广泛,人类历史进入了“信息时代”。信息时代的发展需要建立传输速率高、信息量大、覆盖范围广的通信网络系统。采用波长极短、带宽极宽的光束进行空间卫星通信是实现高码率通信的最佳方案,尤其是在空间卫星日益拥挤的今天,这一点已经获得了通信领域许多专家学者的共识。实际上,世界主要空间技术强国为了争夺卫星光通信这一领域的技术优势,已经投入了大量的人力物力,并取得了可喜的进展。

微波通信是 20 世纪 50 年代开始实际应用的一种先进通信技术,由于它建设周期短、质量稳定、维护方便、费用相对较低,与有线通信相比可节省大量有色金属并易于跨越复杂地形等特点,已迅速成为现代化通信的一种重要传输手段。而传统的空间通信(包括卫星通信)则几乎都是利用微波进行通信。但是,随着移动通信的迅速增长,地面基站数量的增多,卫星通信采用微波通信技术遇到一系列新问题,如微波频带资源有限、通信容量不够、传输方向性不好等。近几年,无线光通信迅速崛起,它作为一种新兴的通信技术,与微波通信相比,具有保密性和抗干扰能力极强、信息容量大、天线尺寸小、功耗低、体积小、质量轻等优点,是进一步利用广阔的宇宙空间发展通信方式,获取高速率、大容量、广覆盖面通信的最佳途径之一。

随着光通信技术的进步和光器件的成熟,空间激光通信可行性问题已经解决。近几年,卫星光通信的关键技术,如发射功率、接收灵敏度、光束的捕获、跟踪、瞄准技术(acquisition, tracking and pointing, ATP)、热和机械稳定性均已取得明显进展。相信不久的将来,空间卫星光通信会取代传统的“弯管”式卫星微波通信。卫星网络的概念在 20 世纪被提出,到了 20 世纪 90 年代,一些基于地面网络的通信技术无法满足广大用户多种通信业务的需求,商业和军事的不同需求也推动卫星通信向网络化方向发展。然而,卫星网络与光纤通信技术的结合给通信领域带来

了一场革命,同时也为空间通信技术研究开辟了新的途径。卫星光网络概念的提出使得大容量、高速化的全球实时通信成为可能,为空间信息高速公路的铺设奠定了基础。

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,由于卫星光通信具有通信容量大、高速率的优点,使卫星光通信成为实现高码率卫星通信的理想方案之一。由于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。

1.2 卫星光通信系统原理及组成

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或卫星与地面间的通信。原理是信息电信号通过调制加载在光波上,通信的两端通过初定位和调整以及光束的捕获、跟踪、瞄准建立起光通信的链路,然后在真空或大气信道中传输信息。卫星光通信不仅包括深空、同步轨道卫星、中轨道卫星和低轨道卫星间的光通信,还包括卫星与空基(airborne)、海基(seaborne)、陆基(terrestrial)终端和基站间的光通信。利用卫星光通信可以建立空—空、空—地、飞机—飞机、飞机—地面基站等之间完整的立体通信网络体系,如图 1.1 所示。

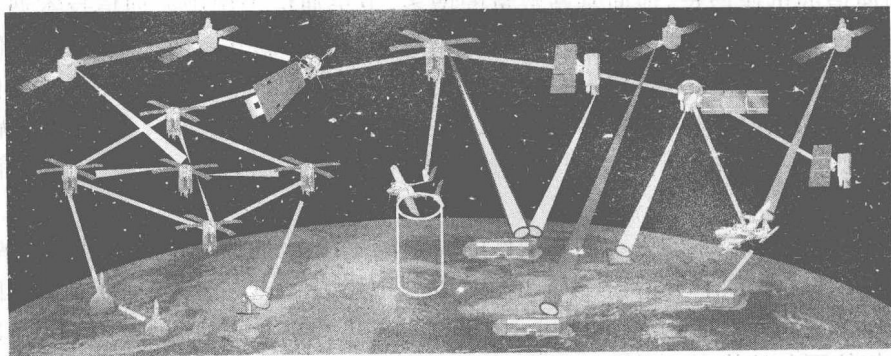


图 1.1 卫星光通信场景示意图

卫星光通信系统主要包括信号传输(通信)和空间光束的捕获、跟踪、瞄准两大子系统。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、月亮、地球、星体等)也将产生很强的干扰,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的情况下,如何捕获、跟踪、瞄准光束是一个光、机、电结合的精密综合技术,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,因此如果利用信号光束进行瞄准、捕获将会是非常困难的过程。所以,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系统及调制、检测等单元组成。其总体框图如图1.2所示,其工作过程简述如下:

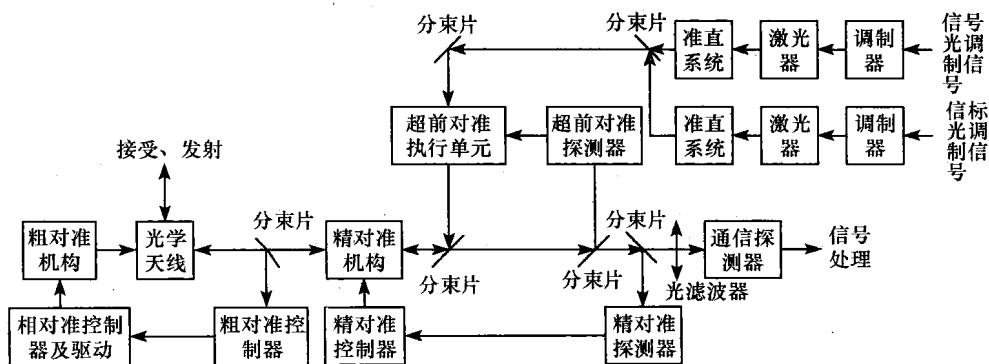


图 1.2 一个典型的卫星光通信框图

(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和分束片,信标光一部分至粗对准探测器,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;信标光另一部分经精对准机构、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。

系统主要可以分为三大部分:①光收、发端机;②光学天线系统;③ATP系统。

1.2.1 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

由于信标光是用作系统的 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

$0.8\mu\text{m}$ 的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,一直是激光通信的首选激光器。近年来, $1.55\mu\text{m}$ 激光器加掺铒光纤放大器(EDFA)的方案也逐渐为人们所接受。目前,IRE-Polus 公司正在 Lincoln 实验室验证一个功率为 10W、数据率大于 2.5Gb/s 的 1550nm 收发机。最近,大功率($>1\text{W}$)及高数据率($>2.5\text{Gb/s}$)已经由 980nm 的半导体 MOPAS 完成。同时,德国也在研究使用 $1.06\mu\text{m}$ 波段的收发机。

1.2.2 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:

(1) 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。

(2) 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。

(3) 探测对方发出的信号光,接收通信信号,完成通信功能。

因此,光探测器应包括粗对准探测器、精对准探测器及超前对准探测器、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,通常在跟瞄技术中分为粗跟踪、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、光源稳定等。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,这也会进一步提高卫星光通信的质量。

1.2.3 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:

(1) 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。

(2) 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

若发射天线的增益以 G_T 来表示,则其物理意义为: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。对于无遮挡型望远镜,在光轴上($\theta=0$)的增益为

$$\theta(0) = \frac{32}{\theta_i^2} \quad (1.2.1)$$

其中, θ_i 为激光的发散角,其值为

$$\theta_i = \frac{1.22\lambda}{D} \quad (1.2.2)$$

其中, λ 为光波长, D 为发射孔径。

所以,发射天线的对数增益为

$$G_T = 10 \lg G(0) = 10 \lg \frac{32}{\theta_i^2} \quad (1.2.3)$$

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

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

$$G_R = 10 \lg \left(\frac{2\pi a}{\lambda} \right)^2 \quad (1.2.4)$$

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巴塞格伦型反射式天线或透射式天线。一般说来, 在常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 25cm 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、减轻质量; 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 (small optical user terminal, 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、质量也要增加, 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 30cm 左右, 如 SILEX 系统装于 GEO 卫星上的天线孔径为 25cm, 装于 LEO 上的为 18cm; 美国喷气动力实验室 (JPL) 研制的卫星光通信系统接收天线孔径为 32cm; 日本进行空一地光通信实验的卫星光通信系统星上天线孔径为 30cm。

JPL 的卫星光通信系统中收发天线不共用, 且用两个 600Mbit/s 的通道实现 1.2Gbit/s 的通信数据率, 而欧洲、日本是收发天线共用, 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。

1.2.4 光学系统

光学系统指除光学天线外的其他光学元件, 包括光学透镜、合束镜、反射镜、光滤波器、分束片等。