



“十二五”国家重点出版规划项目

现代激光技术及应用丛书

卫星光通信

马晶 谭立英 于思源 编著

Satellite Optical Communication



国防工业出版社
National Defense Industry Press



“十二五”国家重点出版规划项目

/现代激光技术及应用丛书/

卫星光通信

马 晶 谭立英 于思源 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

卫星光通信是一个新兴的空间高速通信技术研究领域,涉及多个相关学科,具有广阔的应用前景。本书首先介绍了卫星光通信研究进展和应用背景,深入介绍了卫星光通信理论,包括卫星光通信终端光学系统设计的物理基础,卫星光通信终端光学系统的特点和光学系统设计,光束捕获、跟踪和通信技术物理基础,光束预瞄准和捕获扫描技术,光束跟踪和振动补偿技术,以及卫星激光通信技术。

本书可供卫星通信、光通信以及相关学科的科技工作者参考,也可作为大学高年级学生和研究生的教材或相关课程的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

卫星光通信 / 马晶,谭立英,于思源编著. —北京:
国防工业出版社,2015. 12
(现代激光技术及应用丛书)
ISBN 978 - 7 - 118 - 10351 - 9

I. ①卫… II. ①马… ②谭… ③于… III. ①卫星
通信—光通信 IV. ①TN927 ②TN929. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 283897 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司印刷

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 18½ 字数 336 千字
2015 年 12 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 88.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

丛书学术委员会 (按姓氏拼音排序)

主 任	金国藩	周炳琨		
副主任	范滇元	龚知本	姜文汉	吕跃广
	桑凤亭	王立军	徐滨士	许祖彦
	赵伊君	周寿桓		
委 员	何文忠	李儒新	刘泽金	唐 淳
	王清月	王英俭	张雨东	赵 卫

丛书编辑委员会 (按姓氏拼音排序)

主 任	周寿桓			
副主任	何文忠	李儒新	刘泽金	王清月
	王英俭	虞 钢	张雨东	赵 卫
委 员	陈卫标	冯国英	高春清	郭 弘
	陆启生	马 晶	沈德元	谭峭峰
	邢海鹰	阎吉祥	曾志男	张 凯
	赵长明			

世界上第一台激光器于1960年诞生在美国,紧接着我国也于1961年研制出第一台国产激光器。激光的重要特性(亮度高、方向性强、单色性好、相干性好)决定了它五十多年来在技术与应用方面迅猛发展,并与多个学科相结合形成多个应用技术领域,比如光电技术、激光医疗与光子生物学、激光制造技术、激光检测与计量技术、激光全息技术、激光光谱分析技术、非线性光学、超快激光学、激光化学、量子光学、激光雷达、激光制导、激光同位素分离、激光可控核聚变、激光武器等。这些交叉技术与新的学科的出现,大大推动了传统产业和新兴产业的发展。可以说,激光技术是20世纪最具革命性的科技成果之一。我国也非常重视激光技术的发展,在《国家中长期科学与技术发展规划纲要(2006—2020年)》中,激光技术被列为八大前沿技术之一。

近些年来,我国在激光技术理论创新和学科发展方面取得了很多进展,在激光技术相关前沿领域取得了丰硕的科研成果,在激光技术应用方面取得了长足的进步。为了更好地推动激光技术的进一步发展,促进激光技术的应用,国防工业出版社策划组织编写出版了这套丛书。策划伊始,定位即非常明确,要“凝聚原创成果,体现国家水平”。为此,专门组织成立了丛书的编辑委员会,为确保丛书的学术质量,又成立了丛书的学术委员会,这两个委员会的成员有所交叉,一部分人是几十年在激光技术领域从事研究与教学的老专家,一部分是长期在一线从事激光技术与应用研究的中年专家;编辑委员会成员主要以丛书各分册的第一作者为主。周寿桓院士为编辑委员会主任,我们两位被聘为学术委员会主任。为达到丛书的出版目的,2012年2月23日两个委员会一起在成都召开了工作会议,绝大部分委员都参加了会议。会上大家进行了充分讨论,确定丛书书目、丛书特色、丛书架构、内容选取、作者选定、写作与出版计划等等,丛书的编写工作从那时就正式地开展起来了。

历时四年至今日,丛书已大部分编写完成。其间两个委员会做了大量的工作,又召开了多次会议,对部分书目及作者进行了调整。组织两个委员会的委员对编写大纲和书稿进行了多次审查,聘请专家对每一本书稿进行了审稿。

总体来说,丛书达到了预期的目的。丛书先后被评为国家“十二五”重点出

版规划项目和国家出版基金资助项目。丛书本身具有鲜明特色:一)丛书在内容上分三个部分,激光器、激光传输与控制、激光技术的应用,整体内容的选取侧重高功率高能激光技术及其应用;二)丛书的写法注重了系统性,为方便读者阅读,采用了理论—技术—应用的编写体系;三)丛书的成书基础好,是相关专家研究成果的总结和提炼,包括国家的各类基金项目,如973项目、863项目、国家自然科学基金项目、国防重点工程和预研项目等,书中介绍的很多理论成果、仪器设备、技术应用获得了国家发明奖和国家科技进步奖等众多奖项;四)丛书作者均来自于国内具有代表性的从事激光技术研究的科研院所和高等院校,包括国家、中科院、教育部的重点实验室以及创新团队等,这些单位承担了我国激光技术研究领域的绝大部分重大的科研项目,取得了丰硕的成果,有的成果创造了多项国际纪录,有的属国际首创,发表了大量高水平的具有国际影响力的学术论文,代表了国内激光技术研究的最高水平。特别是这些作者本身大都从事研究工作几十年,积累了丰富的研究经验,丛书中不仅有科研成果的凝练升华,还有着大量作者科研工作的方法、思路和心得体会。

综上所述,相信丛书的出版会对今后激光技术的研究和应用产生积极的重要作用。

感谢丛书两个委员会的各位委员、各位作者对丛书出版所做的奉献,同时也感谢多位院士在丛书策划、立项、审稿过程中给予的支持和帮助!

丛书起点高、内容新、覆盖面广、写作要求严,编写及组织工作难度大,作为丛书的学术委员会主任,很高兴看到丛书的出版,欣然写下这段文字,是为序,亦为总的前言。

金国藩 周灿瑞

2015年3月

随着现代卫星技术的快速发展,卫星需要传输的数据量也在迅猛增长,传统的卫星通信手段已不能满足卫星高速数据传输的需要,而卫星光通信技术因其具有极高数据传输率的显著特点,因此成为高速卫星通信技术的首选。卫星光通信技术是空间光通信技术中最重要的一个应用领域,也是具有极为重要应用前景和迫切需求的空间高速通信技术。

在2012年7月20日国务院正式发布的《“十二五”国家战略性新兴产业发展规划》中,明确要求突破超高速无线通信,启动空间信息高速公路建设。卫星光通信技术作为超高速无线通信的有效手段,将在空间信息高速公路建设中起着举足轻重的作用。作为国家战略性新兴产业之一,卫星光通信技术将会得到越来越快的发展。

本书对卫星光通信技术进行了较全面的介绍,主要内容如下:

第1章首先介绍了国内外卫星光技术的发展状况,简要介绍了卫星光通信系统的基本组成,分别对瞄准捕获跟踪子系统、发射/接收子系统、调制/解调子系统进行了介绍,并介绍了卫星光通信技术可能应用的方面。

第2章针对卫星光通信终端所处的特殊空间环境,主要介绍了卫星光通信终端设计时必须考虑的空间环境,主要是空间光学环境、温度场环境和辐射场环境。

第3章针对卫星光通信终端中最主要的光学系统,介绍了跟瞄子系统、发射子系统、通信子系统在光学设计方面的特点和性能要求。

第4章介绍了卫星光通信终端光学系统的设计问题,分别讨论了光学天线系统设计、跟瞄子系统光学设计、光束发射子系统光学设计以及通信子系统光学设计等问题。

第5章主要介绍了卫星光通信中光束捕获、跟踪和通信方面的物理基础问题,包括卫星光通信系统设计中涉及的卫星轨道动力学、大气对光场传输的影响

等问题。

第6章介绍了卫星光通信链路中的预瞄准和提前瞄准技术,主要包括预瞄准、提前瞄准角度的获取方法、实现方法,并分析了影响预瞄准和提前瞄准精度的主要因素以及修正方法。另外,介绍了卫星光通信链路中的捕获扫描技术、捕获理论、影响捕获的因素、捕获实现的方法以及地面模拟实验系统等。

第7章介绍了光束跟踪和振动补偿理论,分析了影响跟踪和振动补偿的因素,介绍了光束跟踪和振动补偿的实现方法和地面模拟方法。

第8章分析了星地、星间和深空激光通信链路性能需求,介绍了空间激光通信技术,包括直接探测技术和相干探测技术,讨论了光纤耦合问题。

本书是作者多年研究工作的一些总结,希望能够为从事卫星光通信研究工作的科技人员,以及对卫星光通信有兴趣的研究人员和大专院校的学生、研究生提供一些参考资料。

作者
2015年1月

第1章 卫星光通信研究进展及应用背景

1.1 概述	1
1.2 卫星光通信研究进展	1
1.2.1 美国卫星光通信研究进展情况	1
1.2.2 欧洲卫星光通信研究进展情况	5
1.2.3 日本卫星光通信领域研究进展情况	10
1.2.4 中国卫星光通信领域研究概况	12
1.3 卫星光通信应用背景	12
参考文献	13

第2章 卫星光通信终端光学系统设计物理基础

2.1 概述	15
2.2 卫星光通信终端所处光学环境	17
2.2.1 星光背景噪声分析	19
2.2.2 各链路星光背景仿真实验	25
2.2.3 太阳背景噪声分析	36
2.3 卫星光通信终端所处温度场环境	44
2.3.1 在轨温度场环境特点	44
2.3.2 在轨温度场分布特性研究	46
2.3.3 在轨温度场对系统性能影响的研究	50
2.3.4 45°反射镜在轨温度场分布对系统性能影响的仿真分析	52
2.4 卫星光通信终端所处辐射场环境	62
2.4.1 在轨辐射场环境特点	63
2.4.2 器件抗辐射要求	71
参考文献	74

第3章 卫星光通信终端光学系统特点

3.1 概述	78
3.2 卫星光通信终端系统	79
3.2.1 跟瞄子系统	79

3.2.2	通信子系统	86
3.2.3	其他子系统	86
3.3	光束发射子系统光学特点	91
3.3.1	光束发射子系统任务特点	91
3.3.2	光束发射子系统结构特点	92
3.3.3	光束发射子系统光学性能要求	100
3.4	跟瞄接收子系统光学特点	101
3.4.1	跟瞄接收子系统任务特点	101
3.4.2	跟瞄接收子系统结构特点	101
3.4.3	跟瞄接收子系统光学性能要求	107
3.5	通信接收子系统光学特点	110
3.5.1	通信接收子系统任务特点	110
3.5.2	通信接收子系统结构特点	110
3.5.3	通信接收子系统光学性能要求	111
	参考文献	114

第4章 卫星光通信终端光学 subsystem 设计

4.1	概述	117
4.2	光学天线系统设计	117
4.2.1	光学天线基本技术指标	117
4.2.2	折射系统	117
4.2.3	反射系统	118
4.2.4	折反系统	119
4.3	光束发射子系统光学设计	119
4.3.1	光束发射子系统光学基本技术指标	119
4.3.2	像差对光束发射子系统性能的影响	119
4.4	跟瞄接收子系统光学设计	127
4.5	通信接收子系统光学设计	130
4.5.1	反射式光学发射天线中多个局部畸变对误码率的影响	134
4.5.2	透射式光学发射天线中多个局部畸变对误码率的影响	138
	参考文献	141

第5章 光束捕获、跟踪和通信技术物理基础

5.1	概述	142
5.2	轨道确定与预测	142
5.2.1	利用地面观测数据确定轨道	142

5.2.2 利用 GPS 数据预测轨道 143

5.3 激光大气传输理论 145

5.3.1 大气对激光传输影响概述 145

5.3.2 大气激光衰减 147

5.3.3 大气激光折射 149

5.3.4 大气对光束发射的影响 151

参考文献 154

第 6 章 光束预瞄准和捕获扫描技术

6.1 概述 157

6.2 坐标系建立 158

6.2.1 星上瞄准坐标系的建立 158

6.2.2 瞄准机构方位轴坐标系 161

6.3 瞄准理论 162

6.4 提前瞄准 164

6.5 预瞄准和角度获取方法 165

6.5.1 基于 GPS 和星敏感器的卫星光通信跟踪
瞄准角度预测方法 165

6.5.2 基于星载 GPS 的星间激光通信快速收敛光束跟踪方法 169

6.6 捕获理论 172

6.7 影响捕获性能的因素分析 174

6.7.1 预瞄准误差 174

6.7.2 卫星平台振动 175

6.7.3 捕获探测性能 177

6.8 捕获扫描实现技术方法 178

6.8.1 扫描方式 178

6.8.2 扫描范围选取 182

6.8.3 扫描重叠角设置 184

6.9 大气对光束瞄准的影响 185

6.9.1 大气对光信号偏差检测的影响 185

6.9.2 大气对通信信号探测的影响 187

6.9.3 大气影响补偿方法 190

参考文献 195

第 7 章 光束跟踪和振动补偿技术

7.1 概述 197

7.2	跟踪理论	198
7.2.1	单向跟踪	198
7.2.2	双向跟踪	199
7.3	影响跟踪和振动补偿因素分析	201
7.3.1	探测器的测角误差	201
7.3.2	系统误差	205
7.3.3	卫星平台振动	206
7.4	稳定跟踪控制及振动补偿方法	207
7.4.1	瞄准角度误差的约束条件	207
7.4.2	最大均方差的约束条件	208
7.4.3	再生纵横单向凸图像形心方法	211
7.4.4	阈值分割法的选择	216
7.5	跟踪和振动补偿地面仿真模拟技术	220
7.5.1	实验方案	220
7.5.2	卫星平台振动的模拟	220
7.5.3	实验装置	221
7.5.4	实验过程描述	222
7.5.5	实验结果与分析	223
	参考文献	225

第8章 激光通信技术

8.1	概述	227
8.2	卫星激光通信链路性能需求分析	229
8.2.1	星地激光通信链路	229
8.2.2	星间激光通信链路	230
8.2.3	深空探测激光通信链路	231
8.2.4	天地一体化信息网络激光通信链路	233
8.3	直接探测通信技术	233
8.3.1	直接探测原理	233
8.3.2	APD(雪崩光电二极管)探测器	239
8.4	相干探测通信技术	240
8.4.1	空间背景光噪声影响	242
8.4.2	相干通信技术	244
8.4.3	相干接收技术	247
8.4.4	相干探测的信噪比	250
8.4.5	多普勒频移对相干通信的影响	250

8.5 鲁棒自差接收方法 252

8.6 光纤耦合效率 253

 8.6.1 光纤耦合的基本理论..... 254

 8.6.2 光纤耦合影响的理论模型..... 257

 8.6.3 耦合效率和最优耦合参数..... 261

参考文献..... 266

第 1 章

卫星光通信研究进展及应用背景

1.1 概述

利用卫星进行信息获取及传递是现代信息网的一个重要手段,尤其是通过中继卫星或利用卫星进行组网传递信息,将更有利于尽快地获取和传递尽可能多的信息。在现代的信息高速公路中以及现代军事信息网中,更需要利用卫星进行信息的传递。利用卫星可以建立起以卫星为主体的天基信息网,而在这种天基信息网中,建立起星间通信链路是至关重要的。它不仅可以使信息达到实时传递,而且可以免于建立大量地面站,这对于及时掌握战场状况、实时评估打击效果、争取主动有着非常重要的作用,对于全球卫星通信系统或局部卫星信息网也很重要。

星间链路所采用的通信波段有两种,即微波星间链路和激光星间链路。由于激光星间链路与微波星间链路相比不仅具有极高的潜在通信数据率(可达几十吉比特每秒或更高),且具有较小的终端体积、质量和功耗,当链路的数据率相对较高时,光学链路终端在体积和质量方面的优势会进一步显现。同时,激光星间链路的抗干扰性和保密性更好,并可减少地面站,最少可只有一个地面站,还能提高跟踪天线测角的精度。激光星间链路不仅适合于高数据率的星间链路,也适合于较低数据率的星间链路,所以星间链路以光波段为优选波段。

卫星光通信系统主要由两个构成光通信链路的光通信终端组成,光通信终端是卫星光通信系统中进行光信号收发的光端机。光终端的基本组成通常包括光源模块、光信号收发模块、瞄准捕获跟踪模块、调制解调模块、终端控制模块等,根据需要,还可能包括二次电源模块、热控模块等。

1.2 卫星光通信研究进展

1.2.1 美国卫星光通信研究进展情况

1.2.1.1 美国前期卫星光通信领域研究计划

20 世纪 70 年代初,美国的 NASA 资助进行了 CO₂ 激光和光泵浦 Nd:YAG 激

光空间通信系统的初步研究。当时的主要目的为将卫星间光通信应用于高数据率 GEO - GEO 星间激光链路和通信距离遥远的深空探测链路。此后又开展了低轨道小卫星星座激光链路技术的研究。美国空军部(Department of the Air Force)在 70 年代中期资助进行了选择最佳通信波长的研究工作,并在 ACTS 飞船上搭载使用半导体激光的发射机,进行了飞船与地面之间的外差接收链路的预研工作。

NASA 还在卫星光通信的一些新的应用领域进行了研究,以寻求星间激光链路的潜在应用前景。随着更小、更轻和更有效益的低轨道卫星的迅猛发展,通过中继星对用户星的数据信息进行中继的费用显得偏高。对价格更低、功耗更小的新型用户卫星终端的需求变得越来越迫切。NASA 的激光通信实验计划(LCDS)正是针对这一情况而建立的。该项计划建立了中心实验系统,包括光通信终端、主飞行器、发射装置、地面探测系统、数据采集及实验系统。LCDS 计划是在考虑实际需要的基础上进行研发和生产,目前该计划已成为驱动工业在空间应用领域发展的新动力。

NASA 的喷气推进实验室(JPL)一直在进行着卫星光通信及应用于外层空间探测器上的深空星间激光链路技术的基础研究。随着美国第一代跟踪数据卫星系统(TDRSS)投入运行,美国的卫星光通信研究进入了一个新阶段。针对第一代跟踪数据中继卫星的通信带宽不足、受卫星平台结构的限制而不能安装过多跟踪天线的缺点,第二代跟踪数据中继卫星方案设想中采用了激光星间链路,即利用激光进行卫星间的瞄准捕获跟踪(PAT)控制及通信。这将大大增加系统通信容量,提高跟踪天线测角的精度,减小发射天线体积,从而提高中继卫星应用能力。JPL 还大力进行深空探测光通信技术的研究工作,针对深空星间激光链路中的发射、接收、调制、编码等技术进行了详细分析,并曾进行过地面对伽利略探测器的光信号传递实验,制定过火星与地面之间的激光通信计划,也实施了月球与地面之间的激光通信实验。

从 1995 年起,美国的弹道导弹防御组织(BMDO)实施了 STRV - 2 实验计划(Space Technology Research Vehicle 2)。该项计划的主要目的是演示 LEO 卫星 TSX - 5 与地面站间的上行和下行激光链路,验证卫星光通信技术在星地激光链路应用方面的准备情况。STRV - 2 终端采用了极化复用技术,数据率为 $2 \times 600 \text{ Mb/s}$ 。TSX - 5 于 2000 年 6 月 7 日发射入轨,而后进行的星地激光链路实验却一直没有实现上下行激光链路的双向捕获,在进行了多次尝试后,该实验宣布失败。

美国 TRW 公司研制的新技术演示验证实验卫星 GEOLITE 在 2001 年 5 月 18 日于肯尼迪航天中心,利用 Boeing Delta II 型火箭成功发射,星上装有激光通信有效载荷,进行了高轨卫星光通信的空间实验,但实验结果未见报道。

1.2.1.2 月地激光通信演示验证计划

近几年美国重点进行的卫星光通信技术研究计划为月地激光通信演示验证

计划(LLCD)。该计划由 MIT 林肯实验室和 NASA 的 Goddard 空间飞行中心共同承担。该计划是 NASA 第一次尝试在绕月轨道与地面站间进行激光通信实验。

该项目的星上激光通信终端安装于月球大气与尘埃环境探测飞船(LADEE)上。该飞船于2013年9月发射。星上终端(Lunar Lasercom Space Terminal, LLST)与地面终端(Lunar Lasercom Ground Terminal, LLGT)成功地建立了激光通信链路,完成下行最高622Mb/s、上行最高20Mb/s的演示验证实验。该计划同时进行了DTN协议和飞行时间测量技术(Time-of-Tlight Measurement)的验证。

LLCD 主要包括三个组成部分:LLST、LLGT、月地激光通信操作中心(Lunar Lasercom Operation Center, LLOC)。林肯实验室完成此三部分的全部测试、制造工作。而 LLCD 计划在轨运行将由 NASA Goddard 空间飞行中心进行管理。

LLST 的承载平台 LADEE 由 NASA 的 Ames 研究中心设计研制,于2013年发射。该飞船带有三个科学载荷,在其飞行任务中进行约100天的科学实验,科学实验中该飞行器距月球表面几十千米高。在科学实验前有1个月的试运行阶段,其中16天飞船将进行星地激光通信实验。试运行阶段飞船距月球表面约250km,轨道周期约2h。由于受到能源限制,同时考虑热控,在每个轨道周期LLST仅工作15min。考虑地面终端的可见性,一天有3~5个轨道周期可进行月地激光通信。

LLCD 项目的地面终端 LLGT 安装于 NASA 的白沙基地,位于美国新墨西哥州,靠近拉斯克鲁塞斯。LADEE 飞船、LLST 终端、LLGT 终端的控制则由位于 Goddard 空间飞行中心的 LLOC 完成。

LLST 主要包含三个模块:光学模块、调制解调模块、控制器电子学模块。

其中,光学模块安装于 LADEE 飞船载荷仓的外表面,调制解调模块、控制器电子学模块安装于飞船内部。LLST 整体质量约为30kg,平均功耗50~140W。

光学模块的主要部分是口径为10cm的卡塞格伦望远镜,安装于两轴转台上,可实现大范围光学对准,如图1-1所示。

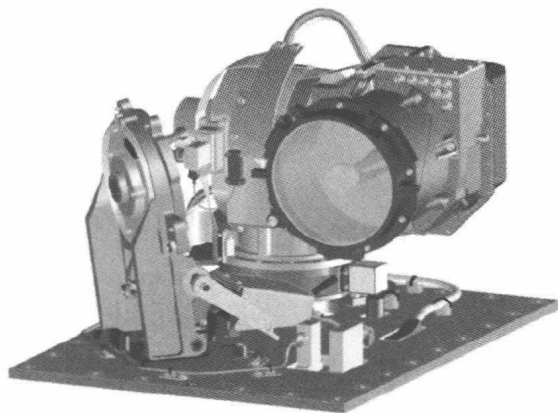


图1-1 LLST 终端的光学模块

为实现目标的空间捕获与跟踪,LLST 使用了大视域的 InGaAs 四象限探测器。发射光通过光纤出射,经由望远镜发射,入射光经由望远镜耦合入光纤中。这些光纤固定在压电陶瓷上,以实现超前瞄准和对目标的精跟踪。

光发射与接收器安装在调制解调模块中,光纤将其与光学模块连接起来。调制解调模块如图 1-2 所示。

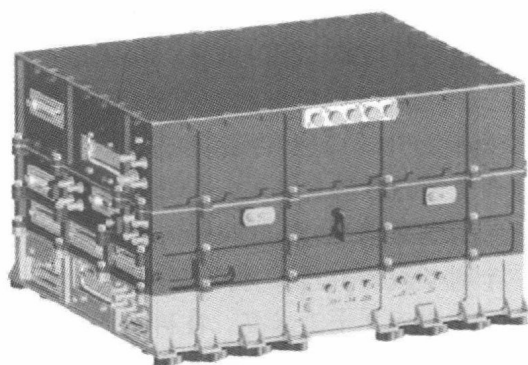


图 1-2 LLST 终端的调制解调模块

调制解调模块中的数字电路集成了下行链路不同的数据源(包括 LADEE 的科学实验数据、LLST 的高速遥测数据、光上行信号的回放数据)。调制解调模块利用高效半速码进行数据编码。编码后的数据通过高带宽脉冲位置调制加载到光信号上,之后通过 EDFA 放大到 0.5W 的平均功率。接收探测器为直接探测器,装有一个低噪 EDFA 前置放大器。基于双 PPM 解调器的硬判决脉冲位置解调器对上行链路信号进行解调,然后由 FPGA 进行解码。

控制电子学模块是单板机构成的航天电子学模块,实现对光学模块中所有执行机构的闭环控制,如图 1-3 所示。

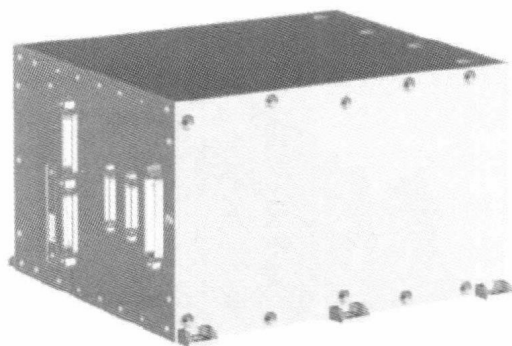


图 1-3 LLST 终端的控制电子学模块

该模块同时还为 LLST 终端与 LADEE 飞船间提供命令与遥测接口,对调制解调进行设置与控制。