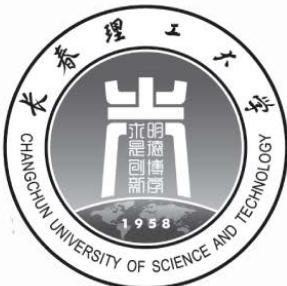


编号: _____



长春理工大学
Changchun University of Science and Technology

工程光学课程论文

基于 MEMS 的逆向光通信系统设计

Design of reverse optical communication system based on MEMS

学生姓名: 付煜文

专 业: 机械电子

学 号: 150321128

指导教师: 孟立新 长春理工大学

学 院: 机电工程学院

二〇一九年六月

Design of reverse optical communication system based on MEMS

A thesis submitted to the
Changchun University of Science and Technology
in partial fulfillment of the requirement
for the degree of
Bachelor of Engineering
in Mechatronic
By
Fu Yuwen
Supervisor: Professor Meng Lixin

Institute of Mechanics, Changchun University of Science and Technology

June, 2019

长春理工大学 学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文是本人在导师的指导下独立进行研究工作所取得的成果。尽我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明或致谢。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

作者签名：

日 期：

长春理工大学 学位论文授权使用声明

本人完全了解并同意遵守长春理工大学有关保存和使用学位论文的规定，即长春理工大学有权保留送交学位论文的副本，允许该论文被查阅，可以按照学术研究公开原则和保护知识产权的原则公布该论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存、汇编本学位论文。

涉密及延迟公开的学位论文在解密或延期后适用本声明。

作者签名：

日 期：

导师签名：

日 期：

摘要

本文针对轻小型平台安全保密、紧凑的要求，使用基于 MEMS 逆向光调制器件，开展了逆向光通信系统原理的研究。涉及到逆向光通信系统的光机结构是如何设计、理论计算和选型，最后涉及到软件的仿真、电路的设计、光学系统设计和光机结构的设计和建模。

具体工作如下：

1. 设计主动端的 RC 卡塞格林光学系统，理论计算得出参数，最后通过 ZEMAX 优化，并确定遮光结构参数，SolidWorks 设计固定光学系统的机械结构和系统的遮光结构。
2. 通过 SolidWorks 设计主动端的两自由度回转平台，设计相应的回转轴系，对直流力矩电机进行选型，并设计固定的装置。
3. 根据逆光调制器应用的场景和实际要求，进行选型和机械固定结构的设计。
4. 根据所使用的光纤激光器，理论计算确定激光光纤准直器的相关参数，然后依据参数进行产品的选型，获取光学参数后，进行 ZEMAX 仿真评估，看是否满足使用要求。
5. 电路设计。根据要求需要设计一个语音采集电路，使用 STM32 单片机进行控制，对语音数据进行存储和操作；设计 STM32 单片机（CMOS 电平）与 MEMS 逆向光调制器（TTL 电平）的电平匹配电路，并用 Multisim 进行电路仿真，确定可行性和可靠性；通过 STM32 单片机对探测器接收的数据进行解码，解析出其中包含的语音数据；通过 Altium Designer 进行电路图绘制。
6. 结合 SolidWorks 和 CAD，进行 3D 建模，出工程图纸，包括主动端装配图，整个逆向调制系统的光路图和程序流程图。

关键词：MEMS 调制器；逆向光调制；ZEMAX；Multisim；激光通信；RC 卡塞格林系统

Abstract

Based on light small compact platform security and requirements, this paper used modulating retro-reflector(MRR) based on MEMS, carried out the study of reverse optical communication system. Concerning the design, theoretical calculation and selection of the opto-mechanical system structure of the reverse optical communication system. Finally came to the software simulation, circuit design, opto-Mechanical system design and modeling.

The detailed works as follow:

1. The RC Cassegrain optical system of the active end was designed and the parameters was calculated theoretically. Finally, the shading structure parameters was determined through ZEMAX optimization. SolidWorks was used to design the mechanical structure of the fixed optical system and the shading structure of the system.
2. Designed the 2-DOF rotary platform of the active end with SolidWorks, seted the corresponding rotation shaft system, selected the DC torque motor, and designed the fixed device.
3. According to the application scenarios and actual requirements of the backlight modulator, determined the mechanical device fixed on a small platform, and checked whether there were corresponding products available for purchase and use through the selection of products on the market.
4. According to the fiber laser used, the relevant parameters of the laser fiber collimator was determined by theoretical calculation. Then, the product selection was conducted according to the parameters.
5. Circuit design. According to the requirements, a audio acquisition circuit was designed, which was controlled by STM32 single chip microcomputer to store and operate the audio data. Designed the voltage level matching circuit between STM32 single chip microcomputer (CMOS level) and MEMS reverse optical modulator (TTL level), and used Multisim for circuit simulation to determine feasibility and reliability. STM32 microcontroller decoded the data received by the detector and analyzed the audio data contained in it. Conducted circuit diagram drawing through Altium Designer.
6. 3D modeling with SolidWorks and CAD, and Conducted engineering drawings, including assembly drawing of active end, optical path drawing and program flow chart of the whole reverse modulation system.

Keywords: MEMS MRR;FSO;RC Cassegrain;ZEMAX;Multisim; Solidworks

目 录

摘要	I
目 录	III
第 1 章 引言	1
1.1 本课题研究目的和意义	1
1.2 常用的逆向调制器类型和国内外文献发展现状	3
1.3 逆光调制器的发展趋势	8
第 2 章 MEMS 逆向光调制器 (MRR)	9
2.1 MEMS 逆向光调制器的工作原理	10
2.2 MEMS 逆向光调制器	11
2.2.1 产品概述	11
2.2.2 MEMS MRR 的机电特性	13
第 3 章 主动端光学系统设计	15
3.1 光学分系统总体分析	15
3.2 光学设计考虑的因素	15
3.2.1 口径计算	17
3.2.2 接收视场角的选择	17
3.2.3 材料性能与选择	17
3.3 卡式系统反射式物镜设计	18
3.3.1 R-C 系统理论计算公式	19
3.3.2 R-C 系统设计	20
3.3.3 MATLAB 自动化生成 RC 望远镜尺寸参数	20
3.4 光机系统遮光结构设计	26
3.4.1 遮光机械结构设计	26
3.5 光学机械设计	28
3.5.1 主镜固定的机械结构设计	29
3.5.2 次镜固定的机械结构设计	31
3.6 装配误差	31
3.7 光学系统的稳定性和轻小型化	32

第 4 章 激光单元 ······	33
4.1 激光器概述 ······	33
4.2 激光束瞄准和稳定 ······	34
4.3 激光单元的实验设备理论计算和选型 ······	34
4.3.1 理论计算 ······	34
4.3.2 准直透镜设备选型 ······	37
4.3.3 准直透镜 ZEMAX 仿真 ······	37
4.3.4 激光准直器在光学基台的安装 ······	38
第 5 章 光电探测器单元 ······	42
5.1 自由光通信主要使用的探测器类型 ······	42
5.2 通信接收单元的信号处理 ······	42
5.3 实验所用的探测器简介 ······	43
第 6 章 光信号调制原理与技术 ······	47
6.1 开关键控调制 (OOK) ······	47
6.2 脉冲位置调制 (PPM) ······	47
6.3 数字脉冲间隔调制 (PIM) ······	48
6.4 几种调制方式的性能比较 ······	49
6.4.1 发射功率 ······	49
6.4.2 带宽 ······	50
第 7 章 电路设计 ······	51
7.1 录音电路和音频解码 ······	51
7.2 常用的逻辑电平介绍 ······	54
7.3 电平匹配电路 ······	55
7.3.1 方案一：使用集成电路芯片 ADG3308 实现 ······	56
7.3.2 方案一：使用分立元件场效应管来实现 (Multisim 软件仿真) ······	56
第 8 章 光机结构设计 ······	60
8.1 主动端二自由度回转平台组成 ······	60
8.1.1 方位转台设计 ······	61
8.1.2 俯仰转台设计 ······	61
8.1.3 光学平台设计 ······	64
8.2 MEMS 逆向光调制器机械结构设计 ······	65

第 9 章 成本预算	67
9.1 实验所需设备	67
9.2 费用估算	67
参考文献	68
致谢	69

第1章 引言

1.1 本课题研究目的和意义

我正在研究基于 MEMS 的逆向光通信系统设计的课题。因为我尝试找出

- 信息如何通过光介质来进行传输？为什么要使用光进行通信？
- 何为逆向光通信？它与现今的自由光通信和光纤通信的区别何在？
- MEMS 器件是如何进行光信息的调制？其国内外发展如何？局限性有哪些？
- 常用的逆向调制器有哪些？国内外分别进行哪些相关的研究？研究进展如何？
- 为什么需要研究逆向光通信？它可以给现今带来哪些突破？
- 新兴的光通信方式有哪些？

为了深入了解基于 MEMS 逆光调制器的逆向光通信的原理，我将通过具体的电路设计，主动端光机结构的设计和具体的光路图来介绍语音信号是怎么通过单片机进行发送和接收，具体讲述单片机如何通过电平匹配电路将语音信息的数据加载至 MEMS 逆光调制器上，激光如何经过主动端的光学系统进行发送，并通过光电探测器接收经 MEMS 逆光调制器反射回来的已加载信息的激光，通过单片机进行解码还原出原有的语音信息，最后进行前后数据的对比，从而评估基于 MEMS 器件逆向光通信的可行性。

1. 信息如何通过光介质来进行传输？为什么要使用光进行通信？

由于光的波粒二象性，光具有和电磁波一样的特性，如幅度、频率和相位，通过合理地设置这些参数就可以将信息有效地加载到光上，进行信息的传输，进而还发展出了抗干扰性能更好的相干光通信^[1]，除此之外，光在通过某些特殊的材料后，其偏振态会发生改变（线偏振和圆偏振），进而可以设计出相应的调制器如图 1.1。

利用光进行通信有很长的历史可以追溯，但是近代应用最广、发展最快的并不是光通信，在梅曼研制出激光器到康宁玻璃公司光纤商业化来看，至少是这样的。而最早的信息传输是通过电磁波进行信息传输，容易受磁场干扰，且带宽低，传输距离近，但是其优点是电磁波可以穿透物体传播，而光通信则不能。

现在由于大气信道对光信号严重的衰减效应没有得到有效的解决，大部分研究都集中在光纤通信器件的研制中，对于自由空间激光通信的研究发展比较缓慢。传统自由光通信^[2,3]与逆向光通信区别如图 1.2。

2. 逆向光通信（MRR）原理，与现今的自由光通信（FSO）和光纤通信的区别。

逆向光通信（MRR）就是主动端使用传统光通信的激光系统（体积比较大）向被动端（即 MEMS 逆光调制器一端，没有 ATP 装置，只有一个 MEMS 逆光调制器件）发送一束激光束，MEMS 逆光调制器件通过加载信息到激光束，然后将激光原路返回至主动端的技术，这样大大减少了被动端的体积和重量，能很方便的安装在各种小型平台上，而且 MEMS 逆光调制器需要的驱动电压比较低，具有低功耗的特点。

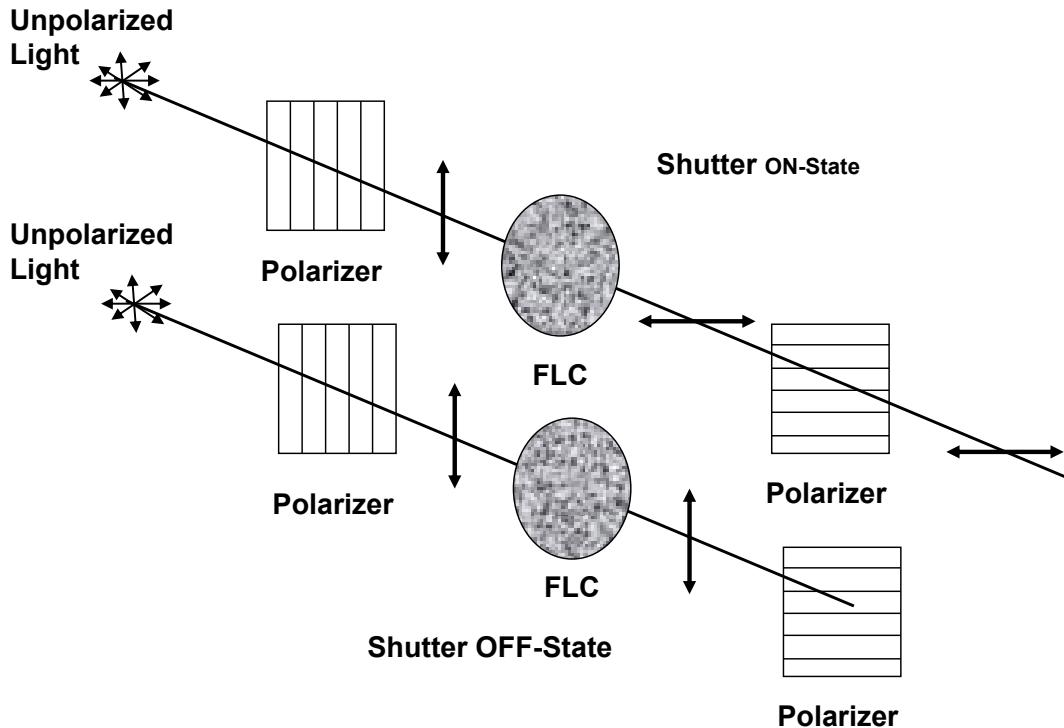


图 1.1 铁电液晶调制器

传统的激光通信两端的设备需要很高的对准精度，而且对视场角要求很高，通常在 1° 以内，导致光学装置十分复杂。而基于 MEMS 的逆向光调制器就没有这个限制，不但体积小，而且对视场角的要求比较宽裕，能达到 30° 或者更高，所以不需要复杂的光学对准和定位系统，有效解决了自由光通信的应用局限性。

同时 MRR 还具备光纤通信所不具备的机动性和灵活性，能在通信设备遭到破坏的时候迅速恢复，不需要花费进行光纤通信所需的大量铺设光纤的时间，但是 MRR 受大气影响较大^[?]，信息传输速率受到限制，没有光纤通信速度快和稳定。

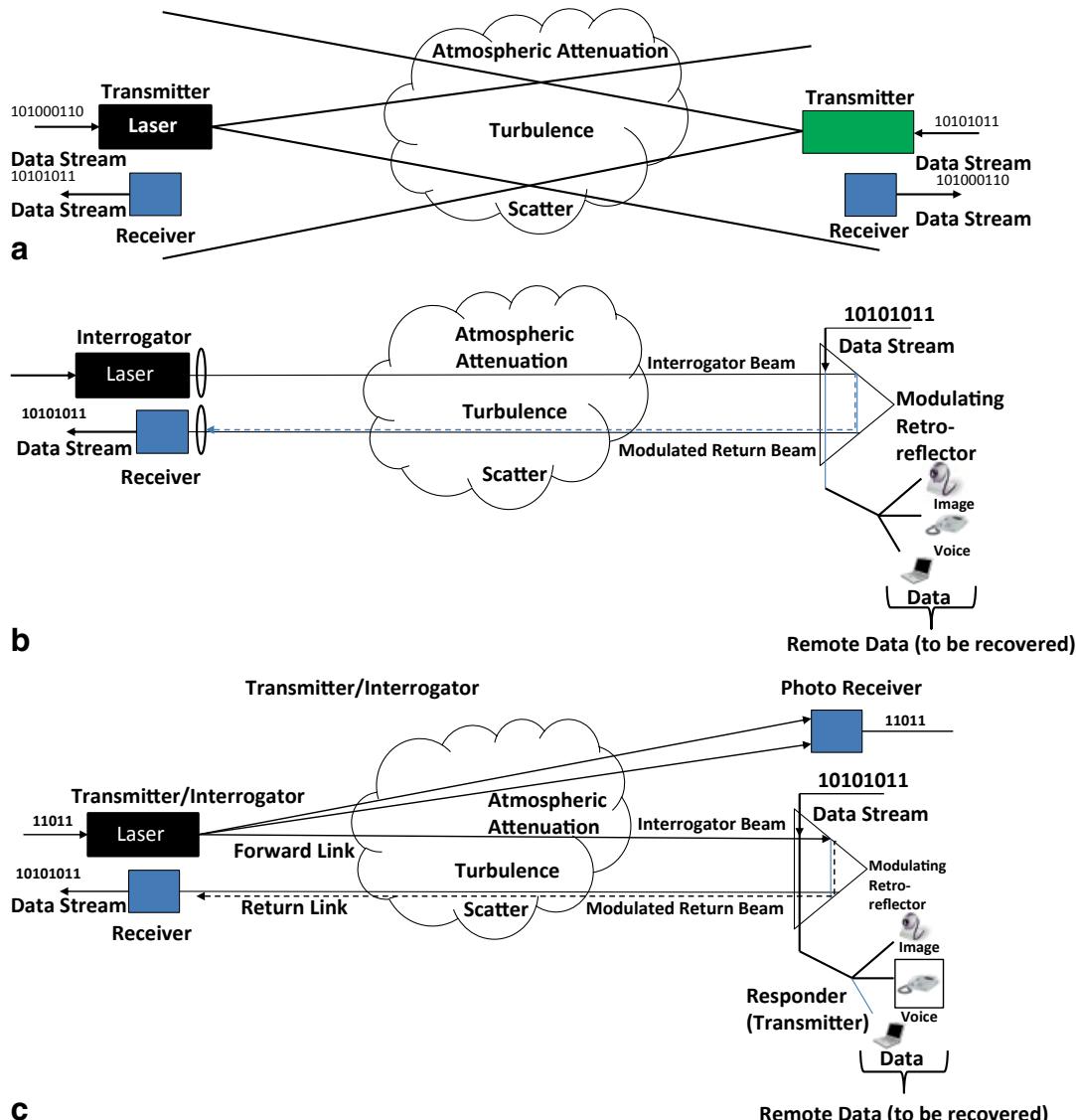


图 1.2 自由光通信系统 a 传统的光通信系统, b 基于逆向光调制器光通信系统(半双工模式, HDX mode), c 基于逆向光调制器光通信系统(全双工模式, FDX mode)

1.2 常用的逆向调制器类型和国内外文献发展现状

逆光通信调制器^[4-6]从传统的声光(图 1.3)、电光、液晶等角立体棱镜调制器(图 1.6)发展到如今的猫眼结构^[7-9]调制器, MEMS(图 2.3) MRR、MQW 逆向光调制器、电润湿透镜逆光调制器(图 1.5), 逆向调制速率从传输几 kbps 到如今的几 Gbps 的速率, 从最初的半双工通信到如今的全双工通信, 从最初的单点对单点的通信到如今的组网技术。

国外对 MRR 的研究普遍比国内研究得早, 特别是在 MQW MRR 器件中, 美国海军实验室(NRL)对 MQW 器件的研究尤为深入, 不断研制出实验模型, 搭载到不同的移动平台上进行实验, 积累了很多的经验。国内主要对 MRR 进行理论分析为主和提出了很多不同的调制方案以实现全双工通信, 加快其商业化进程。目前国内

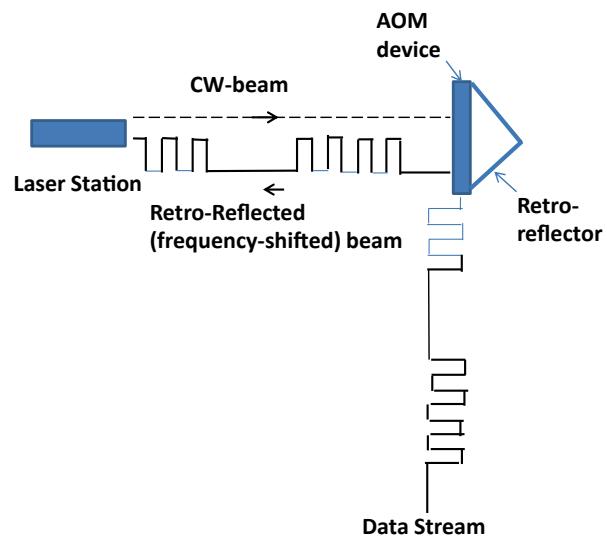


图 1.3 声光调制器

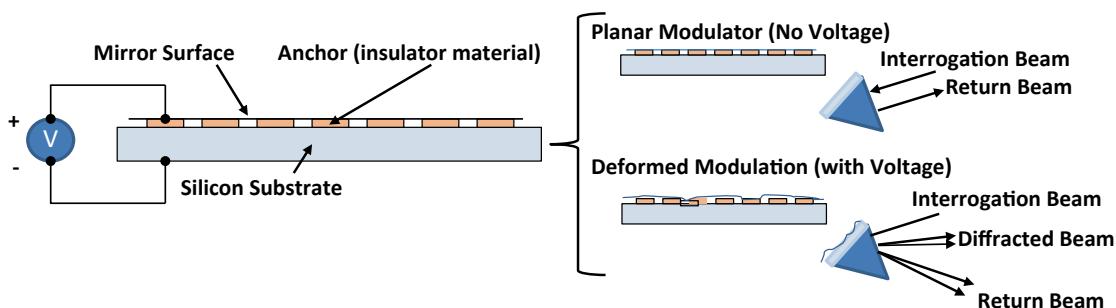


图 1.4 MEMS 逆向光调制器原理图

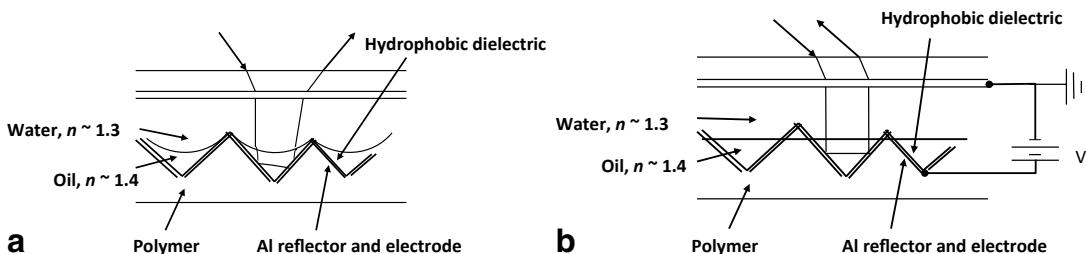


图 1.5 电润湿透镜逆光调制器

研究 MRR 器件的高校主要集中在长春理工大学、西北工业大学等。国内外很多的高校、研究机构和公司都发布各自的理论分析和专利。以下整理成表格列出^[10]，如图 1.7 和图 1.8。

从图 1.7 和图 1.8 对比可以看出，国内目前在逆光调制器产品研发的性能与国外还有不少的差距，主要基于理论验证，实物的调制速率不算高，离具体实际应用还有很长的路要走；而国外目前集中于量子阱（MQW）调制器的研发，研究机构为军事机构，研究成果带有保密性质，根据其最近实际工程调试的成果，可以看出 MQW

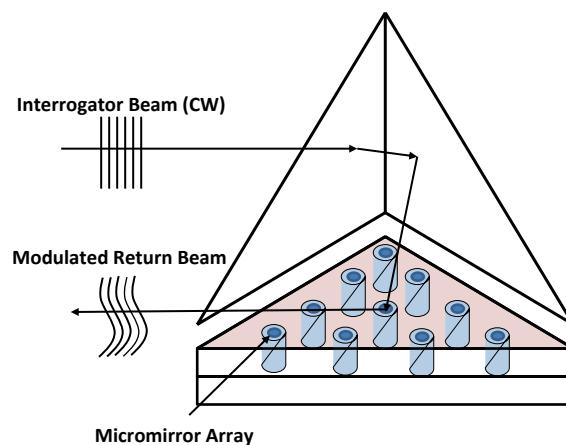


图 1.6 角反棱镜式逆向光调制器

调制器传输数据的速率最快，技术比较成熟，积累了不少现场调试的经验。

国外逆向调制空间激光通信技术研究列表

时间	从事单位	研究内容	主要指标	备注
1996	美国犹他州州立大学、 菲利普斯实验室	高空气球与地面基站之间的半双工 MRR激光通信链路	距离: 3km 速率: 20kb/s	采用铁电液晶调制器
2002	NASA、NRL	实验验证基于多量子阱MRR的飞行器 与飞行器之间通信、导航的概念	距离: 35m 速率: 10 Mb/s	MRR端采用6个0.5mm量子 阱组成的阵列，每个重约 10g, 功耗 75mW
2003	NASA、NRL	利用一个主猫眼MRR和两个子CEMRR 结合COTS光学系统构成空间激光互 联链路MIL-STD-1553	距离: 3m 速率: 40Mb/s	采用980nm波长光源
2006	美国海军	马里兰州切萨皮克湾进行了岸对舰 通信试验	距离: 2~7km 速率: 45Mb/s	采用 Novasol公司DMOI双 模询问端
2006	美国海军	三叉戟勇士军事演习中，将 MRR 用于舰与舰之间的互联		用 Novasol公司DMOI双模 询问端
2007	瑞典防御署	研究了多电平调制的应用，并进行 了室内、室外传输距离分别为90m、速率: 22Mb/s 160m的通信实验		利用带宽超过10MHz的多 量子阱调制器与大视场猫 眼光学系统
2007	美国海军	海鹰2007军事演习中用于建立单向 吉比特通信链路		采用 Novasol 公司DMOI 双模询问端
2008	美国海军	三叉戟勇士军事演习中， 用于舰与 舰的双向互联	速率: 2Mb/s	采用 Novasol公司DMOI双 模询问端
2009	英国牛津大学	提出了一种低功耗液晶MRR设计	距离: 30m 速率: 30b/s 功耗: 3.5W	
2011	澳大利亚国防部	进行了视音频岸对岸和岸对舰传输 实验	距离: 岸对岸 2.4km 距离: 岸对舰 3.07km	利用 Navasol的DMOI和角 反射棱镜 MRR
2012	美国海军、 海军陆战队	TALON项目， 研制海上无线激光通信 系统	距离: 50km 速率: MRR上行2Mb/s 速率: MRR下行10Mb/s	计划未来5年内实现部署
2015	欧盟	欧盟C3PO概念验证项目， 验证基于 多量子阱MRR阵列的卫星 对地1Gb/s数据传输可行性	速率: 卫星-地 1Gb/s 重量: 小于 1kg 功耗: 小于 2W	进行了实验室200Mb/s和 室外200m 150Mb/s试验
2016	NASA、 ISDEF	联合研制用于小卫星的MRR通信系统	速率: 20MHz调制速率	正在研制

图 1.7 国内逆向调制空间激光通信技术研究列表

国内逆向调制空间激光通信技术研究列表

时间	从事单位	研究内容	主要指标	备注
2012	电子科技大学	实验室搭建了离焦型“猫眼”实验平台	速率: 600b/s	短距离里实现音频通信
2012	内蒙古大学 西北工业大学	用反射式纯相位液晶空间光调制器产生涡旋光束		理论分析
2012	中国工程物理研究所	利用空间分辨率较高的液晶空间光调制器实现了电控光束偏转		理论分析
2013	国防科技大学	研究发现利用相干检测可以降低散射效应的影响	距离: 5km	系统能够适应更加恶劣的天气情况，并且具有更长的通信距离
2014	杭州电子科技大学	提出全双工调制回复反射天线光通信系统及其通信方法的专利		
2015	长春理工大学	提出基于双波长的全双工MRR通信方案		理论分析
2015	解放军理工大学	提出利用不同调制方法实现双工通信方案	上行速率: 2kb/s 下行速率: 1.048Mb/s	下行OOK调制，上行AM调制，采用镀膜压电陶瓷片作为调制器
2015	重庆大学	进行基于声光调制器的MRR试验	距离: 5m 速率: 115.2kb/s	采用电科集团26所的TSGMN-1型声光调制器
2016	北华航天工业学院 西安理工大学	影响逆向调制发射光特性的因素分析		理论分析
2016	浙江大学、 长春理工大学	将用于WDM-PON系统中的RSOA应用于MRR系统，并利用不同调制方案实现双工通信	距离: 5m 上行速率: 1.25Gb/s 下行速率: 10Gb/s	下行采用 DPSK 调制方式； 上行采用 OOK 调制方式
2016	长春理工大学	提出大视场逆向调制自由空间激光通信系统的专利		
2016	中国人民解放军战略支援部队航天工程大学	提出一种能实现弱光信号检测的基于激光散斑检测的逆向调制无线光通信装置及方法的专利		
2017	浙江大学	发明公开一种基于调制器的高速逆向反射模块及反射传输方法	速率: 1.25Gb/s	基于光环形器和电光调制器
2017	解放军理工大学	提出一种大视场接近衍射极限的逆向调制猫眼光学系统的发明专利	视场角: >30° F数: 1.3 系统焦距: 26mm	六片球型透镜结构
2017	航天工程大学	提出一种基于猫眼效应的逆向调制激光组网通信系统的专利	速率: 1Mb/s 视场角: 30°	专利
2017	航天工程大学	提出一种基于焦平面失调的猫眼逆向调制器的专利	DMD偏转角度: +/-12°	专利
2017	河南农业大学	通过仿真建模以及实验研究验证了采用铌酸锂相位调制器和压电陶瓷搭建的基于PSK /OOK 的逆向调制系统能够进行全双工工作模式的可行性。		仿真实验
2017	杭州摩焕科技有限公司	一种基于伪相位共轭反射器的逆向调制自由空间光通信系统的专利		逆向调制器采用薄片式伪相位共轭反射器和薄片式像数化空间调制器制成
2018	航天工程大学	进行逆向调制空间光通信快速捕获对准特性的实验		理论分析
2018	杭州电子科技大学 中国电子科技集团公司	全双工逆向调制自由空间激光通信系统的 设计与分析	距离: 110 cm 速率: 1 kHz	室内MRR FSO通信系统实验

图 1.8 国外逆向调制空间激光通信技术研究列表

1.3 逆光调制器的发展趋势

MEMS 调制器件^[11] 主要依靠器件内部的机械运动或材料结构的变化来实现对光信息的调制，有学者研究表明 MEMS 器件机理决定了其最高通信速率不会超过几 Gbps，所以现在国外很多学者都在研究基于量子阱的逆光调制器（MQW），还有学者通过整合猫眼镜头，形成了猫眼结构的量子阱调制器如图 ??，既满足大视场要求又有很高的调制速率。

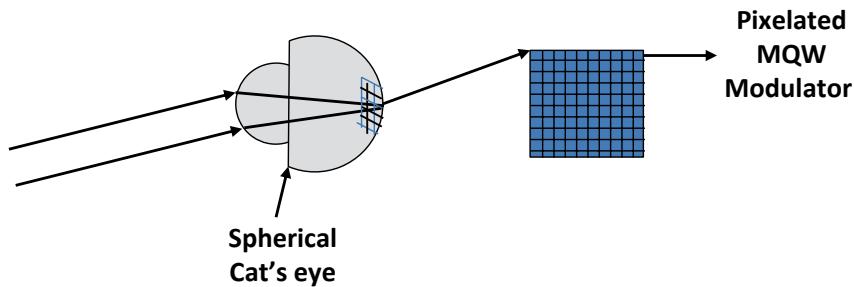


图 1.9 带猫眼结构的量子阱调制器阵列

逆向光通信在很多中小平台的得到了广泛的应用，如无人机通信、海上舰船通信、大气监测、海底通信、交会对接中对目标平台的姿态监控和目标识别等多个领域。

由于具有传统激光通信的抗干扰性、宽带宽等优点，还被应用于电磁环境复杂的通信链路中。当调制器采用阵列结构时，可以打破传统 FSO 链路只能点对点的工作模式，实现 FSO 链路组网^[12-14]，对天基信息实现网络化传输具有重要意义。

逆光调制系统由于有传统 FSO 没有的一点对多点的能力，还可以用于光学标签的识别。在医学应用领域，MRR 还可以进行人体透皮无线光通信，如起搏器、智能假肢、大脑接口的神经信号处理器，充当人工眼睛和用于收集人体产生的信号的摄像头^[15]。逆向调制激光通信系统，结构简单，视场角大，对激光瞄准系统精度要求降低，节省经费，所以研究 MRR FSO 技术对国家发展有着重要的战略意义。

除了器件发展外，光通信形式也发生了改变。现在国内外很多机构和高校早已开始进行量子光通信的研究。量子光通信是以光子作为数据载体，由光量子态来携带信息，量子信息论表明量子光通信容量比经典光通信提高很多个数量级，安全系数很高，不存在被破译的可能^[16]。

光通信由于不能透光传输，光信息载体只能在真空、光纤或其他透光的物质内传播。中微子通信很有潜力成为新的通信方式，中微子质量很小，可以穿透任意物质，而且没有能量损耗，在空间应用中，可以不用中继卫星就可以实现与月球背面的端机进行通信，是未来很有发展潜力的通信方式。

第2章 MEMS 逆向光调制器（MRR）

常用的逆光调制器如图 2.1 所示。

MRR technology	Liquid crystal MQW (LC)/Ferro-electric liquid crystal (FLC)	Electro-optics MEMS	Amplified fiber-retro: single channel/fiber array
<i>Modulation</i>	Polarization and amplitude	Amplitude	Polarization and amplitude
<i>Speed</i>	Slow	Medium-fast	Fast
<i>Power consumption</i>	Very low	Medium	High
<i>Voltage required</i>	Low	Low	High
<i>MRR diameter</i>	Large	Medium	Medium
		Small	Low/medium
			Very fast possible
			Very low
			N/A (does not require any electro-optical, acousto-optical, LC or MQW material)
			Very small for single channel to small for array device
<i>Mass</i>	Low	Low	High
<i>Comments</i>	Simple and rugged, easy to array for wide FOV; response shifts with temperature Cat's eye is capable of higher bandwidth	AOM can be very compact and high-speed possible	Low cost; deformable micro-mirror array possible for higher modulation contrast, and larger FOV
			Very low
			Single channel has extremely small FOV; array of fiber retro provides large FOV

MRR modulated retroreflector, MQW multiple quantum well, MEMS micro-electromechanical modulators system, AOM acousto-optic modulators

图 2.1 常用的逆向光调制器 MRR

从图 2.1 中可以看出铁电液晶调制器通信速率上限不高，而且体积大，不利于在小型平台上的应用；电光调制器虽然调制速率可以做得很高，但是所需的控制电压

很高，不利于进行功耗控制，无法在固定容量的电池下，长时间的工作；相对前面两款，MEMS 因为驱动电压低，体积紧凑，调制速率满足基本的需求，功耗低因而目前应用很广泛，很有潜力；最有为了克服 MEMS 调制器通信距离受限的缺点，有研究者考虑在 MEMS 调制器后端接光纤放大器，对信号进行二次放大后反射回探测器，使得传输距离大大提高。

2.1 MEMS 逆向光调制器的工作原理



图 2.2 MEMS 逆向光调制器工作示意图

典型的 MEMS 逆向光调制器原理如图 2.3，这种模式主要工作于 OOK 模式，即通过是否施加电压以改变镜面的形状，如图 2.4a。当施加电压为零时，MEMS 器件表面平整，询问光束照射后，以镜面反射的形式返回给主动端，表示“1”状态；当施加电压为非零值时，MEMS 器件表面变得粗糙，很多沟槽出现，询问光束照射后，发生漫反射，很少光线能返回主动端，表示“0”状态，如图 2.4b。

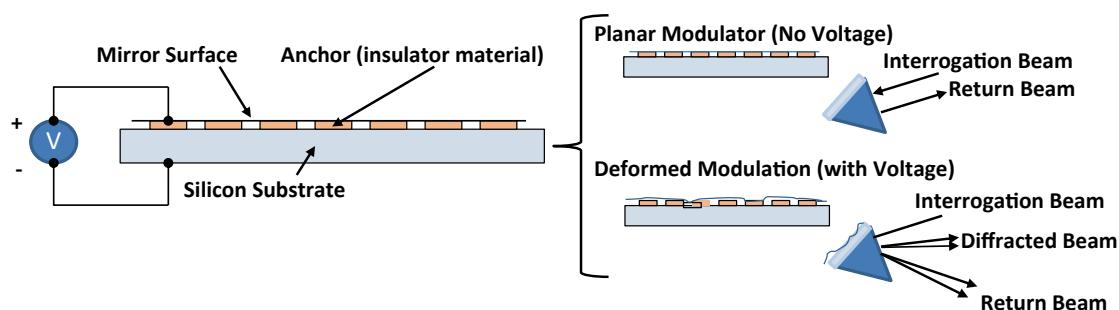


图 2.3 典型的 MEMS 逆向光调制器原理

该 MEMS 逆向光调制工作频宽，可在从可见光到中红外的广泛波长范围内工作。它是一种具有反射式衍射光栅，通过驱动器施加电压控制（如图 2.6c），即可控制凹槽深度，其最大深度取决于基体电极槽的深度，如图 2.4a。

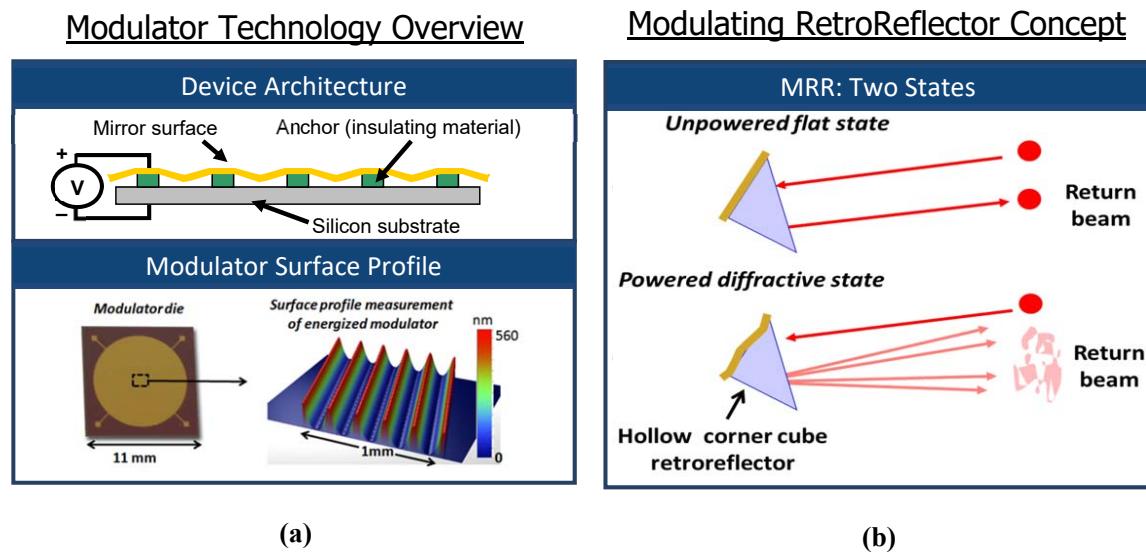


图 2.4 MEMS 逆光调制器。 (a) MEMS 逆向调制器的工作原理, (b) MEMS 微镜的两种工作状态
Figure 2.4 MEMS MRR.(a) MEMS -MRR-principle , (b) MRR-TWO-STATE

2.2 MEMS 逆向光调制器

2.2.1 产品概述

波士顿微机械公司 (Boston Micromachines) 开创了 MEMS(微机电系统) 变形镜技术, 用于先进的光学控制。这些微型精密的光塑形器使世界顶尖的研究人员能够在天文学、显微学、激光控制和视网膜成像方面取得突破。在 MEMS 镜像技术的发展和向全高分辨率成像系统的扩展方面, 波士顿微机械公司处于行业领先地位, 致力于推动光子学应用领域的发现。

波士顿微机械公司对于逆向光通信推出了两款微镜, 分别是镜面分立型 MEMS(2.5a) 和镜面连续型 MEMS(图 2.5b)。

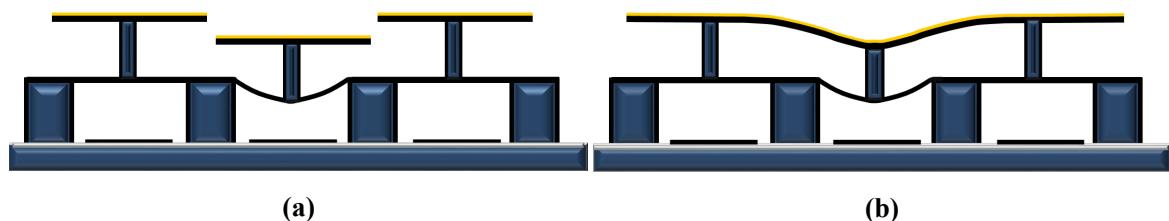
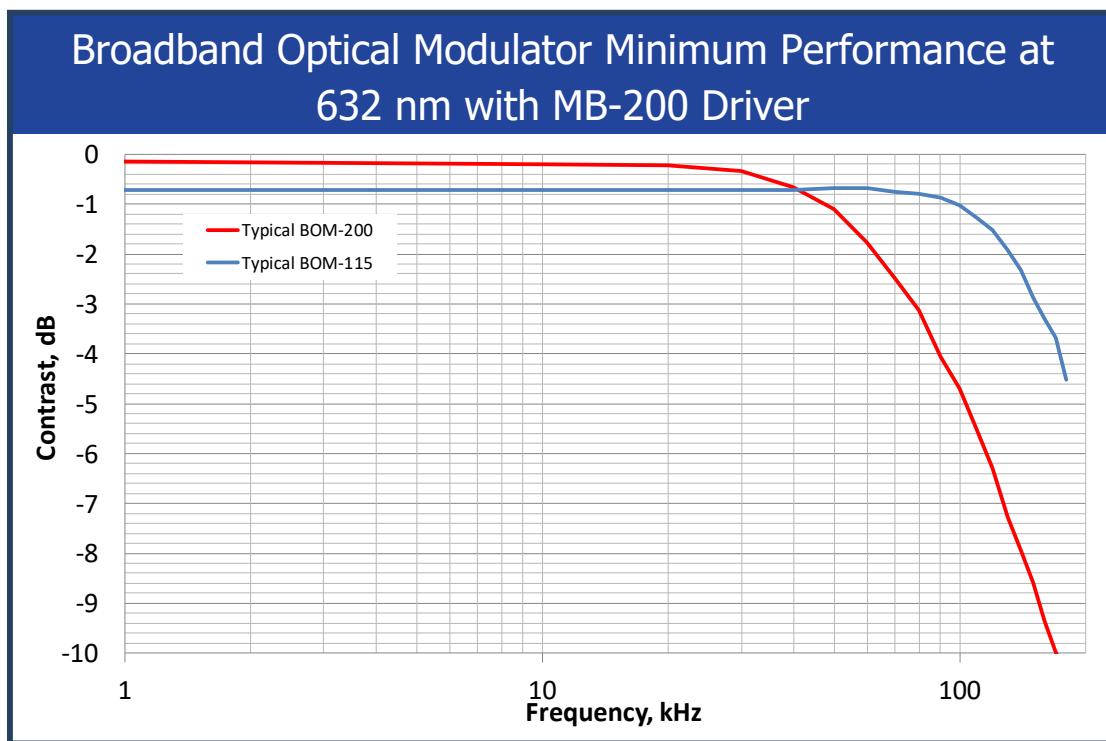
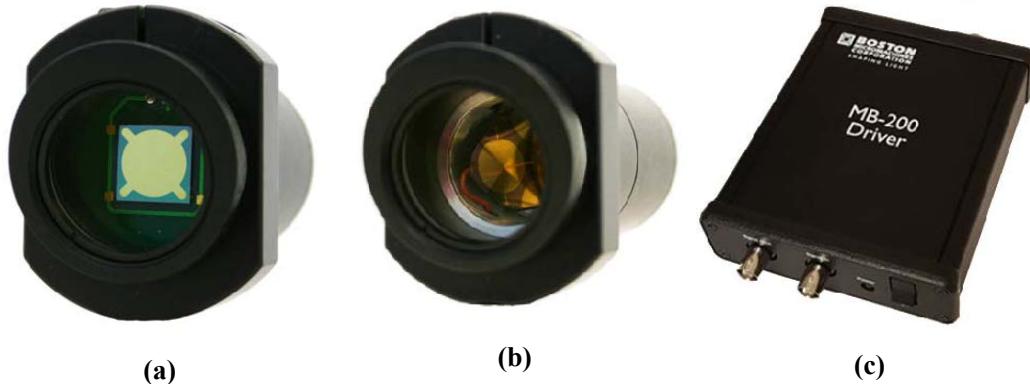


图 2.5 MEMS 逆光调制器。 (a) MEMS 分立微镜示意图, (b) MEMS 连续微镜示意图
Figure 2.5 MEMS MRR.(a) Segmented-DM , (b) Continuous-DM

MRR 系统已被证明能够使用二进制调制方案以高达 200kbps 的数据速率提供连续的非对称自由空间光通信。MRR 可以与 MB-200 驱动器配对, 支持使用标准 5V 的 TTL 电平进行测试光学测试, 具体的驱动器参数如表 2.1。



(d)

图 2.6 MEMS 逆光调制器。 (a) MEMS 逆向调制器内部结构图, (b) MEMS 逆向调制器外形图, (c)MEMS MRR 驱动器, (d) MB-200 的带宽

Figure 2.6 MEMS MRR.(a) MEMS-MRR-INNER . (b) MEMS-MRR-OUTSIDE .(c)MEMS-MRR-driver.(d)Broadband Optical Modulator Minimum Performance at 632 nm with MB-200 Driver.

表 2.1 MB-200 驱动器详细参数

MB-200 驱动器规格	参数
驱动器工作频率范围	0~300 kHz
外壳尺寸	127 × 101.6 × 25.4mm
电源供电电压	100~240V AC

2.2.2 MEMS MRR 的机电特性

MEMS 逆向光调制器的电极最大横向距离为 $185\mu\text{m}$, 最大垂直位移为 $185\mu\text{m}$ 。对比度的计算公式为

$$\text{modulation contrast} = \frac{\text{PDV}_{\text{max}} - \text{PDV}_{\text{current}}}{\text{PDV}_{\text{min}} + \text{PDV}_{\text{max}}}$$

式中 PDV 表示光电探测器的输出电压。

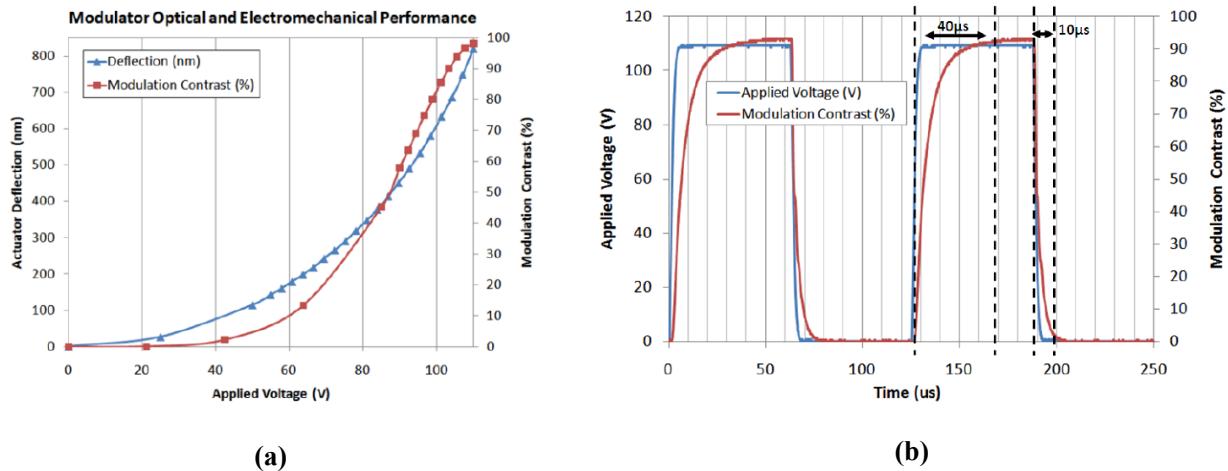


图 2.7 MEMS 逆光调制器。(a) 不同电压下的对比度和制动器位移, (b) 加载 8kHz 的方波, 幅值为 0~110V 的调制信号后, 0 级衍射条纹的动态响应。

Figure 2.7 MEMS MRR.(a) Actuator deflection and modulation contrast behavior for a $200\mu\text{m}$ pitch modulator with an $185\mu\text{m}$ span. (b) Dynamic response of the $185\mu\text{m}$ span modulator to a 0 to 110V, 8kHz square wave, as seen by the photo detector measuring the 0th diffraction order.

从图 2.7a可以看出当施加电极两端电压为 110V 时, 对比度已达到 98%, 继续增大电压并不会使对比度再有大的提高。

从图 2.7b可以看出, 当用 8kHz, 幅值为 110V 电压驱动 MEMS MRR 时, 其阶跃响应为过阻尼。调制器对比度达到 50% 时, 需要的时间为 $7\mu\text{s}$, 达到 98% 时, 需要的时间为 $40\mu\text{s}$, 所以对应的最大工作频率为

$$f = \frac{1}{40\mu\text{s}} = 25\text{kHz}$$

图 2.8展示了 MRR 样机模型; 图 2.9描述了 MRR 调制器的入射角和视场关系。

表 2.2 MEMS MRR 详细参数

MEMS MRR 规格	参数
对比度	>50% Peak Contrast
安装孔径	25.4 mm
反射材料	金膜
光束偏转角	<30 arcsec (1 arcsec = 1/3600°)

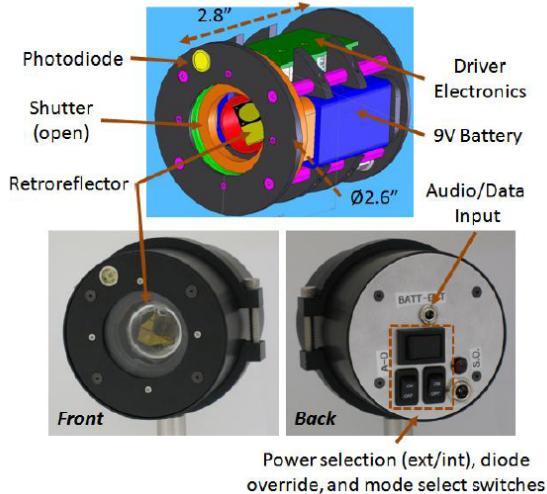


图 2.8 MRR 样机

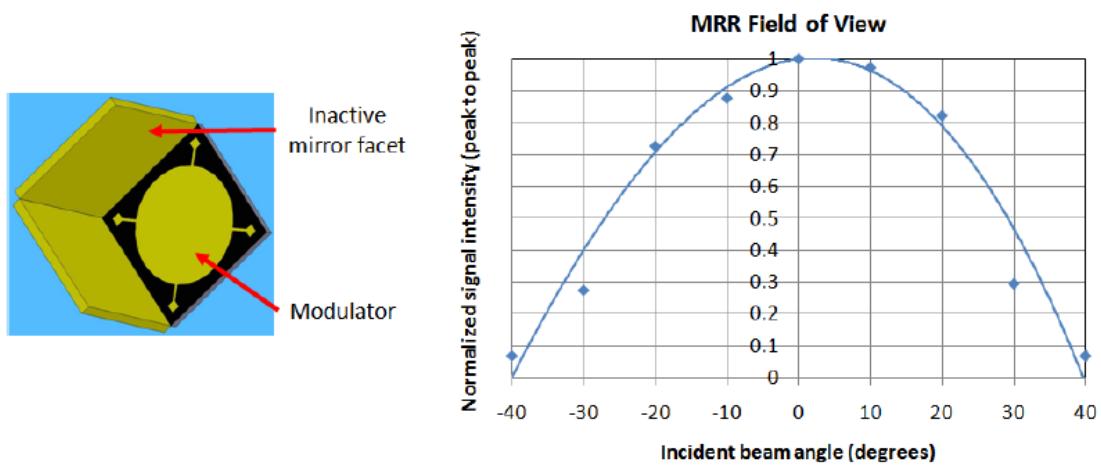


图 2.9 MRR 入射角和视场关系

第3章 主动端光学系统设计

激光通信载荷的光机分系统包括用于发射/接收的光学孔径和跟踪发射接收信号的后续光学组件。光机分系统应满足入射激光通过发射器之后的出射激光束散角能够达到设计要求。光机分系统由以下六部分组成：

- (1) 主发射和接收光学孔径（望远镜）；
- (2) 发射与接收信号的后续光学组件；
- (3) 捕获跟踪探测器，光束对准执行器；
- (4) 光学系统的机械支撑结构；
- (5) 补偿平台姿态变化的粗跟踪装置；
- (6) 惯性探测和隔离装置（针对某些系统）。

3.1 光学分系统总体分析

对于光学望远镜主要要求包括

- (1) 构应该具有高基频和良好的温度及热稳定特性，以满足亚微弧度量级的激光瞄准的高精度要求。
- (2) 允许范围内使用孔径尽可能大（同时保证最小的质量和体积条件下）；
- (3) 光学系统可以支持多个波长工作（用于波分复用）；
- (4) 发射光学系统一定要有足够宽的视场，满足下行链路通信时宽视场的要求，并在整个视场内具有好的波前质量；
- (5) 接收光学系统直接收集从入射孔径入射的光子，探测器能直接探测光信号；
- (6) 良好的背景光抑制。接收光学系统一定要有窄带滤光片减小背景辐射，要有足够的宽视场来覆盖空间飞行器振动引起的死区（如平台的角摆动）。

3.2 光学设计考虑的因素

载荷的光机分系统的设计因素包括光端机的通信距离、太阳角、大气传输、接近衍射极限角发射和光机结构空间装配公差等。望远镜的主要功能是接收从远程光端机传输的数据信号或信标信号，也可作为发射激光束的远程光端机设备，以下两种情况均可行^{[?]1}。

- (1) 发送和接收共口径。在这种情况下，发送和接收数据必须进行严格的隔离。
- (2) 发送和接收数据用分离口径。在后一种情况下，由于口径之间存在角度偏移需要精密跟踪和指向，故折射式和反射式望远镜系统都是很好选择。

¹姜会林等编著. 空间激光通信技术与系统. 北京：国防工业出版社，2010.12.

表 3.1 适用于机载望远镜结构的一般属性

参数	卡塞格林	折反式卡 塞格林	马科斯托 夫卡赛格	施密特卡 塞格林	离轴格里 高利	离轴牛顿
视场	小到中等	中等	大	大	小	小到中等
离轴光抑 制	好	好	一般 (依 靠校正 镜)	一般 (依 靠校正 镜)	很好	很好
质量 (相 对)	轻到中等	中等	重	中等	中等	中等
长度 (相 对)	短	短	短到中等	短到中等	长	长

望远镜结构的选取实际上取决于尺寸大小 (如直径)、质量、光谱范围、视场、遮拦、装调公差及热环境等要求。另外，透射系统适用于较小直径的接收器，而反射系统常用于大孔径反射镜，从而能降低整个系统的质量。

不同类型的卡式望远镜包括传统卡式系统 (CC)、里奇一克莱琴 (RC)、施密特卡式系统 (SC)、次镜和焦平面之间带有校正镜 (CR) 的卡式系统。卡式望远镜由一个抛物面的主镜和一个双曲面的次镜组成，该结构有着良好成像质量，相比于单抛物面镜具有较大的视场 ($\pm 2\text{mrad}$)。RC 系统由非球面的主镜和次镜组成，具有较小的球形畸变 (相对于传统 CC 望远镜)。SC 结合校正镜可以实现非球面扭曲成像校正存在的球差。加入透射汇聚光学系统的 CR 设计 (望远镜后续光学组件) 提供额外的畸变校正，在宽视场内具有良好的图像质量。离轴式卡塞格林望远镜系统 (Schief spiegler) 是一种特殊的卡式设计，镜片离轴使用可以避免二次遮拦。

在光学望远镜的后续光学组件中，传输到地球的下行链路信号从激光信号发生器到出射的望远镜单元，需要经过光纤整形平面镜、透镜组成的光路。在此过程中，可检测产生的信号能量，以及进行光束整形、分光、放大、控制和采样。后续光学组件由发射和接收光路，捕获和跟踪光路，激光光束对准、校准的光路或光学输出惯性传感器等组成。

光学发射信号从激光发射端的光学系统出瞳发射。发射光路必须使用倾斜镜控制下行光束在整个系统的视场内的指向，要保证在整个视场内具有良好的波前质量。

接收光路从入瞳孔径收集入射光子，由探测器直接探测信号。接收光路必须提供窄频带的滤波，以减少背景辐射，并提供较大的视场覆盖空间飞行器的死区。接收光路还必须提供足够多的隔离装置，可有效地将传输路径的反馈信号减少到最小。通常情况下，接收光路对波前质量的要求不严格，只要保证有足够小的光斑打到接收的探测器上即可，确保其具有足够的信噪比要求。然而，在小直径探测器上匹配宽视场，对光学设计来说是很具有挑战性的。而对于发射光路最关键的是光学系统的成像质量。通常，望远镜和成像光学系统两者必须满足波阵面均方根小于 $\lambda/15$ (波

长为 500m)。这意味着单个反射镜的波前误差需要优于 $\lambda/20$ (波长为 500m)。

经过权衡,为了使主动端体积更为紧凑,减轻系统的重量,采用 RC 式卡塞格林系统,通过反射镜的引用,有助于色差的矫正,两次反射镜结构使终端体积大幅减小,该天线的结构的缺点是次镜的遮挡将造成光能损失。

3.2.1 口径计算

望远镜主镜的口径设计十分关键,影响光学系统后面的粗精瞄准光路的设计,对系统总功率预算有影响,但是我们比较关心的是口径对激光通信光端机的体积和重量的影响,所以合理设计并进行计算很关键。

根据瑞利判据可知:

$$\theta = \frac{2.44\lambda}{D}$$

针对小型平台的应用,主望口径 D 根据主动端光学基台的空间要求,将确定为 $\phi 94$,能远远满足瑞利判据的要求。

3.2.2 接收视场角的选择

为使到达 APD 探测器的光斑均匀,以及降低大气干扰,通信光接收光学系统通常按望远系统设计,探测器 APD 位于出瞳处。若采用光纤直接接收,接收面较小,则无法采用望远系统设计,需根据光纤的数值孔径及探测面积优化选取焦距,设计为会聚系统。

3.2.3 材料性能与选择

主望远镜中主反射镜材料的选择是望远镜能否达到预期指标的关键。

表 3.2 Add caption

材料	密度/ (g/cm ²)	弹性模量 E/GPa	比弹性模量 E/P/(10 ⁹ N · mm/g)	导热率/ (W/m · °C)	线膨胀系数 $\alpha/(10^{-6}/^{\circ}\text{C})$	热变形系数 $\alpha/\lambda(10^8\text{m/W})$
SiC	3.05	400	12.6	185	2.5	1.4
Be	1.85	280	15.1	160	11.4	7.2
微晶玻璃	2.5	92	3.7	1.46	0.05	3
铝	2.7	92	3.7	1.46	0.05	12
熔石英	2.2	67	3.1	1.3	0.03	2.3
Si	2.3	157	6.8	169	2.5	—
碳纤维	1.8	纵向 9.5	14	193	0~1 (铺层 工艺确定)	—
复合材料		横向 3.1				

望远镜材料的选择依据:

(1) 机械稳定性 (耐机械变形和应力);

- (2) 热稳定性(耐热浸泡和局部温度的变化);
- (3) 低质量(随镜子的直径非线性变化);
- (4) 费用(价格一般随直径的平方增长);
- (5) 空间辐射抑制。

在发射和运行中, 使用低密度(低质量)和高模量(硬度)结构将减少机载光端机的质量, 要保证完整的结构, 使用具有各向同性、热膨胀系数高度均匀的材料可以保证在不同的热环境下具有高稳定性, 对于透镜而言, 材料必须是特定加工的, 允许公差大约2mm, 用金属或介电镀膜。

反射镜和望远支撑结构全部由铝或不同的碳化硅化合物生产装配而成。另外, 镍和低热膨胀系数的玻璃材料是镜子基底很好的选择材料; 但是根据实际情况, 我们将反射镜和望远支撑结构采用殷钢(Invar Steel), 这种合金材料属于低膨胀合金, 通过后期工艺配比, 可以基本做到0膨胀系数的要求, 除此之外, 这种合金材料导热系数低, 避免外壳在太阳高温照射下对里面的光学结构造成影响。

由于热应力造成的像差, 高热膨胀系数的镜面材质令人关注。可变辐射涂料(VEC) 是一项正在发展中的技术, 有可能解决光学镜子基底高热膨胀系数材料问题。采用VEC, 表面热通量密度可以由电子控制, 从而使透镜温度严格控制, 还可以对透镜面形进行控制。

3.3 卡式系统反射式物镜设计

卡式系统通常设计成主镜为抛物面, 次镜为双曲面的双镜结构, 如图 3.1。

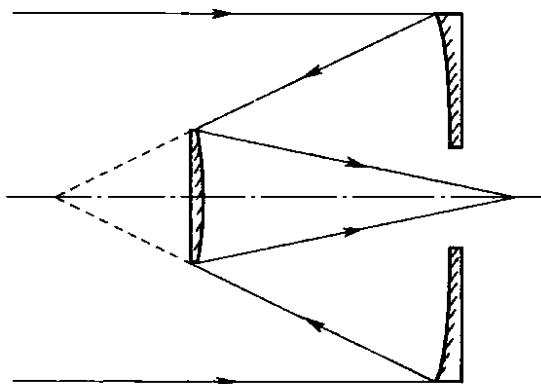


图 3.1 卡式系统示意图

卡塞格林系统由于采用两块反射镜, 相比于传统的透镜式望远镜, 其口径可以做得更大, 并且具有无色散的天然优势, 其光机结构重量可以做得更轻巧, 结构做得更紧凑。卡塞格林系统是会聚系统, 如果直接采用这个结构, 对后续光组的机械安装精度要求很高, 所以为了降低装配和对准难度, 一般在后续光路中设置光束整形光组, 其作用就是对光进行准直(如图 3.2)和波长复用等。

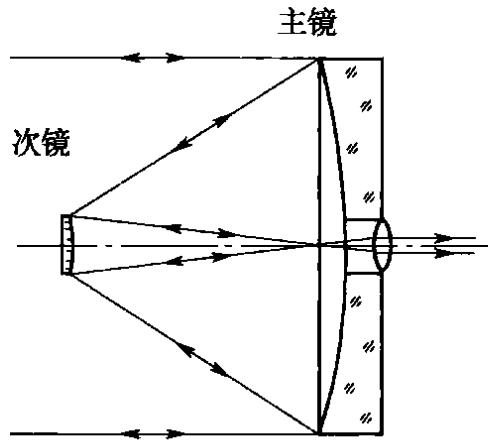


图 3.2 三镜卡式系统示意图

RC 望远系统的反射镜曲面表达式为

$$y^2 = 2rx - (1 - e^2)x^2$$

其中 e^2 面形参数，用来校正像差的自变量； r 为镜面顶点的曲率半径。对于望远镜系统，其物体位于无限远，同时一般光阑与主镜重合，因此有

$$l_1 = \infty, u_1 = 0$$

定义两个与外形尺寸有关的参数

$$\alpha = \frac{l_2}{f'_1} = \frac{2l_2}{r_1} \approx \frac{h_2}{h_1}$$

$$\beta = \frac{l_2}{f'_2} = \frac{u_2}{u'_2}$$

根据高斯公式，还可以写出

$$r_2 = \frac{\alpha \cdot \beta}{1 + \beta} \cdot r_1$$

式中， α 表示次镜的遮光比； β 表示次镜的放大倍数。

RC 系统的特点是主镜的口径远超过透镜的极限尺寸，镀反射膜后，使用波段很宽，没有色散，同时采用非球面后，有较大的消像差的能力。因此，系统结构比较简单，成像质量好。但是，RC 望远系统也有一些缺点，例如不容易大视场，次镜会引起中心遮拦，有时遮拦还比较大，非球面制造难度大，但现在非球面加工技术越来越成熟，因此在空间光学系统中，RC 望远系统仍然是一个很好的选择。

3.3.1 R-C 系统理论计算公式

RC 卡塞格林系统在设计之前，通常需要提前确定理论计算的所需的设计要求，通常包括系统焦距、F 数、系统伸长量和系统的口径。主镜相对孔径数值（F 数的倒数）的确定需要综合几方面的因素来考虑，常取 1:3 左右^{[17]2}。

²李林，黄一帆，王涌天著. 现代光学设计方法. 北京：北京理工大学出版社，2015.04.

系统焦点的伸出量 Δ , α 和 β 。 α 、 β 、 Δ 之间, 它们的关系为

$$\begin{cases} l_2 = \frac{-f'_1 + \Delta}{\beta - 1} \cdot r_1 \\ \alpha = \frac{l_2}{f'_1} \end{cases}$$

主镜和次镜之间的间隔以及次镜的半径为

$$\begin{cases} d = f'_1(1 - \alpha) \\ r_2 = \frac{\alpha \cdot \beta}{\beta + 1} \times r_1 \end{cases}$$

主镜的半径为

$$r_1 = 2 \times \frac{\text{主镜口径}}{\text{主镜的相对孔径}}$$

3.3.2 R-C 系统设计

设计一个用于自由空间光通信的 R-C 系统, 系统口径为 94mm, 系统的焦距为 1000mm, 系统伸长量为 140mm, 系统 F 数为 1.2, 要求镜头长度尽可能短。

系统的相对孔径为 1:1.2, 主镜的相对孔径我们也选择 F 数为 1.2, 保证系统能量尽可能传输到后面的探测器, 经过计算, 主镜的焦距为 112.80mm, 顶点曲率半径为-225.6mm, 从主镜到系统焦点的距离为 $112.80 + 140 = 252.80$ (mm), 因此

$$r_1 = -1000$$

$$\begin{aligned} f'_1 &= -1000 \\ \beta &= \frac{1000}{-112.8} = -8.865 \end{aligned}$$

次镜的放大率为 8.865 ($\beta = -8.865$), 故次镜离主镜焦点的距离为

$$l_2 = \frac{-f'_1 + \Delta}{\beta - 1} = \frac{-(-112.80) + 140}{-8.865 - 1} = \frac{252.80}{-9.865} = -25.62595$$

而

$$\alpha = \frac{l_2}{f'_1} = \frac{-25.62595}{-112.8} = 0.227175$$

同时根据消球差和慧差的条件, 有

$$\begin{aligned} e_1^2 &= 1 + \frac{2\alpha}{(1 - \alpha)\beta^2} = 1 + \frac{2 \times 0.227175}{(1 - 0.227175) \times (-8.865)^2} = 1.00748 \\ e_2^2 &= \frac{\frac{2\beta}{1-\alpha} + (1 + \beta)(1 - \beta)^2}{(1 + \beta)^3} = \frac{\frac{2 \times (-8.865)}{1-0.227175} + (1 - 8.865)(1 + 8.865)^2}{(1 - 8.865)^3} = 1.62038 \end{aligned}$$

将所有参数输入 Zemax 软件, 取视场角为 0.1° , 系统图如 3.4 所示。

点列图如图 3.5 所示, 像差非常大。下面利用 ZEMAX 软件的像差优化功能对系统进行优化, 优化变量只取两个二次曲面系数, 优化结果为:

3.3.3 MATLAB 自动化生成 RC 望远镜尺寸参数

具体 MATLAB 代码在后面附录给出。

透镜数据编辑器						
表面:类型		标注	曲率半径	厚度	玻璃	半直径
OBJ	标准面		无限	无限		无限
*	标准面		无限	120.000		47.000
2*	标准面		-225.600	-87.174	MIRROR	47.201
3	标准面		-57.767	87.174 P	MIRROR	10.120
4	标准面	系统伸出量	无限	140.055 M		4.157
IMA	标准面		无限	-		8.859

图 3.3 卡式系统的理论计算数据

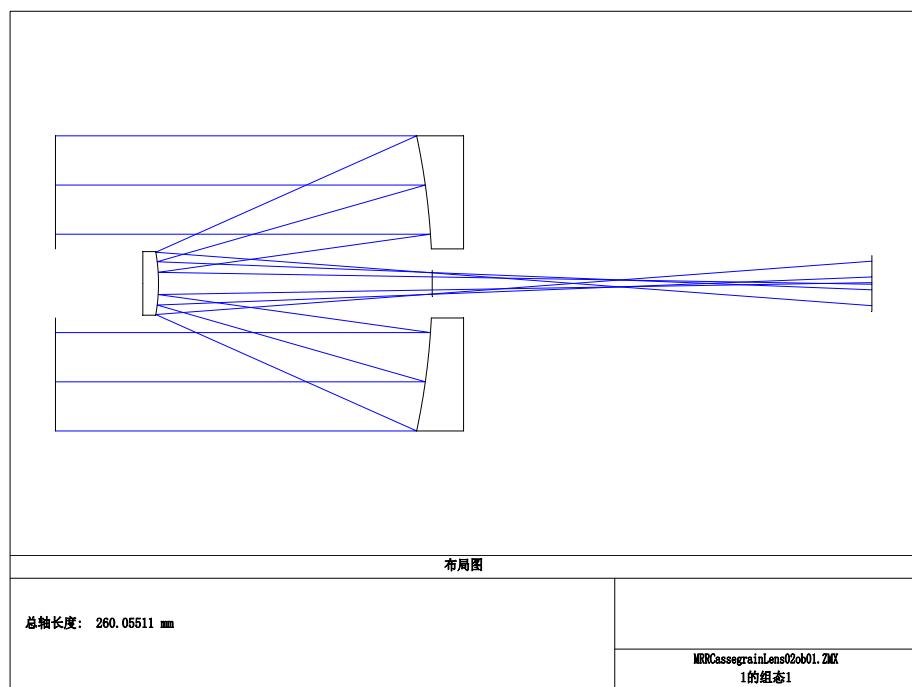


图 3.4 卡式系统的优化前系统图

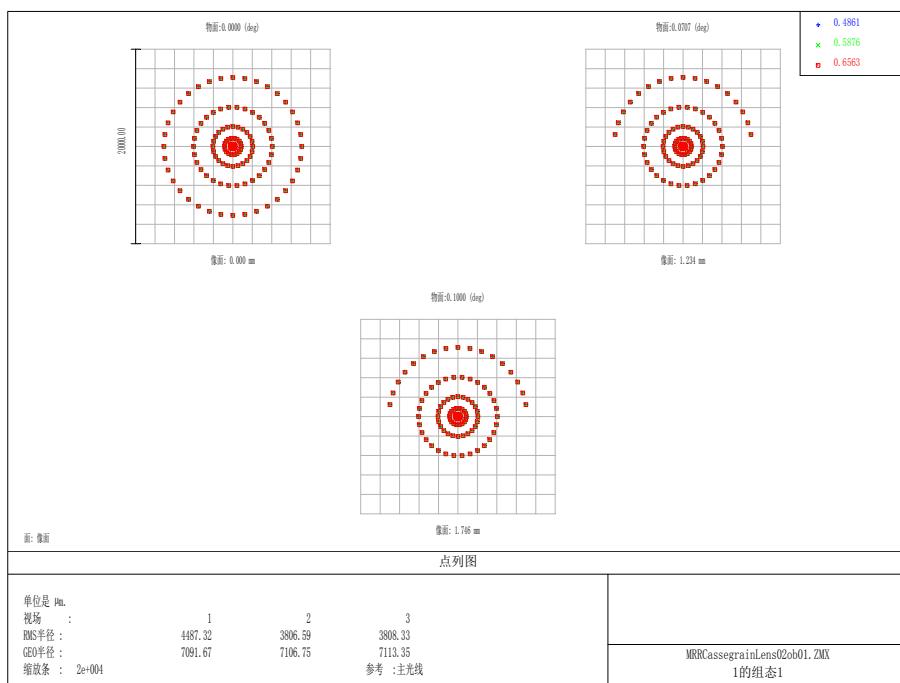


图 3.5 未优化前的点列图

透镜数据编辑器						
编辑 求解 查看 帮助						
表面:类型	标注	曲率半径	厚度	玻璃	半直径	圆锥系数
OBJ	标准面	无限	无限		无限	0.000
*	标准面	无限	95.000		47.000	0.000
2*	标准面	-225.600	-87.174	MIRROR	47.000 U	-1.008 V
3*	标准面	-57.767	87.174 P	MIRROR	11.000 U	-1.620 V
4	标准面	系统伸出量	140.055 M		7.382	0.000
IMA	标准面	无限	-		8.300 U	0.000

图 3.6 卡式系统优化参数设置

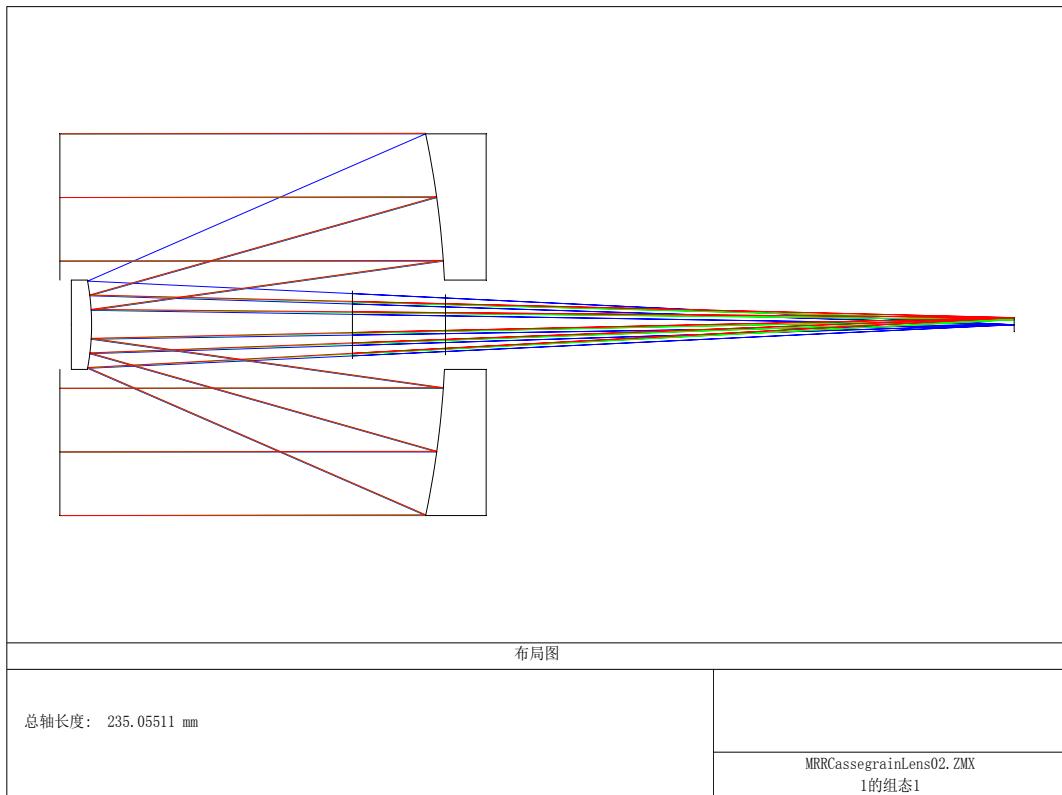


图 3.7 卡式系统的优化后系统图

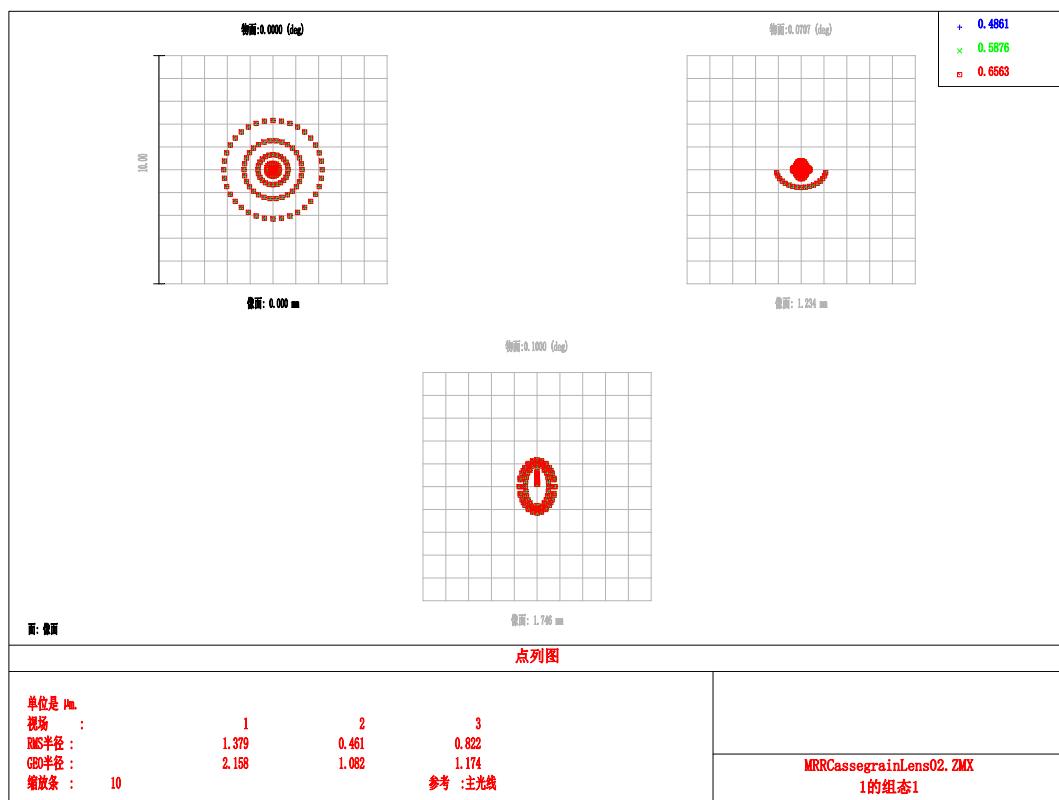


图 3.8 优化后的点列图

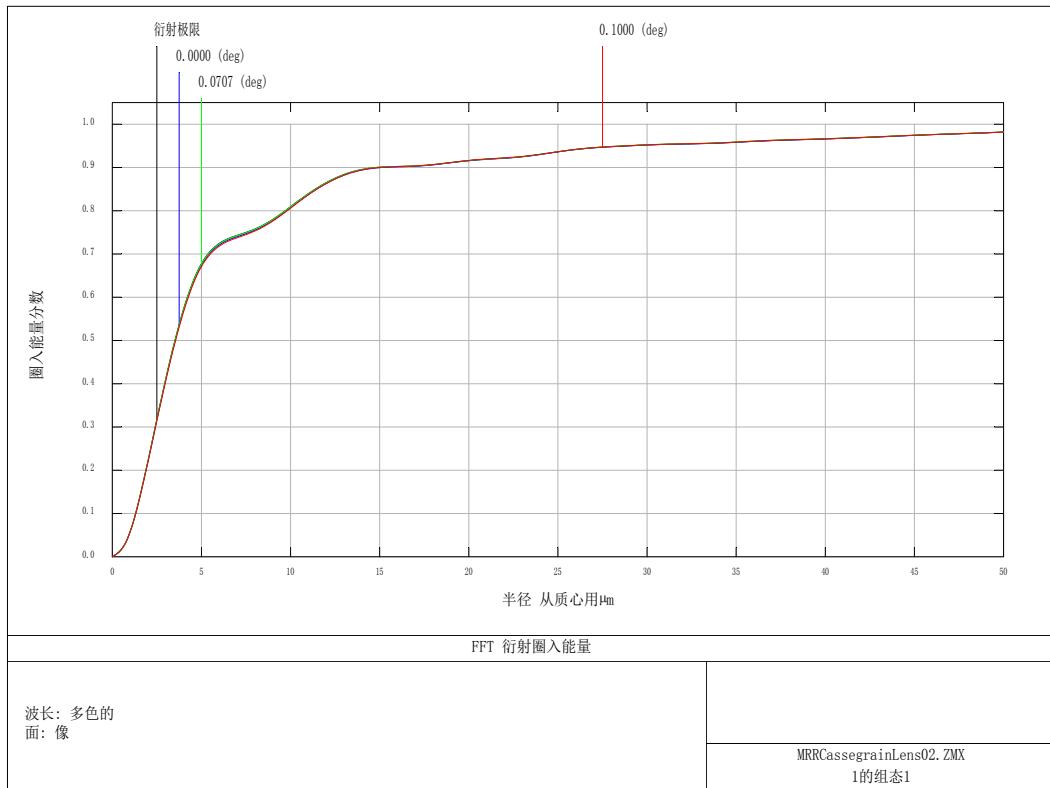


图 3.9 优化后的圈内能量图

```
命令行窗口
>> cassegrain
请依次输入系统口径、系统焦距、伸出量和F数
请输入系统口径:94
请输入系统焦距:1000
请输入伸出量:140
请输入F数:1.2
计算主镜焦距f1'
```

图 3.10 输入给出的系统参数

```
1 这是输入的参数
2 系统口径D= 94
3 系统焦距f= 1000
4 系统伸出量= 140
5 系统F数= 1.2
6 这是计算的数值
7 遮光比a= 0.227175
8 放大率= -8.86525
9 面型系数e1^2= 1.00748
10 面型系数e2^2= 1.62038
11 主镜的半径r1= -225.6
12 次镜的半径r2= -57.7667
13 主次镜距离d= -87.1747
14
```

图 3.11 计算得出的数据

3.4 光机系统遮光结构设计

3.4.1 遮光机械结构设计

虽然本课题《基于 MEMS 逆向光通信系统设计》不是成像系统，属于非成像系统（能量系统），对杂散光要求不算高，但是由于激光通信通常主动端有粗瞄准和精瞄准系统，因为数据误码率跟杂散光有一定的影响，为了提高数据的准确，所以有必要设计针对卡塞格林系统的遮光结构。除此之外，由杂散光引起的回波效应，有可能会对灵敏度较高的探测器产生自激效应，系统造成干扰，所以也必须设计遮光结构来避免该现象的发生。卡氏系统完整结构如图 3.12。

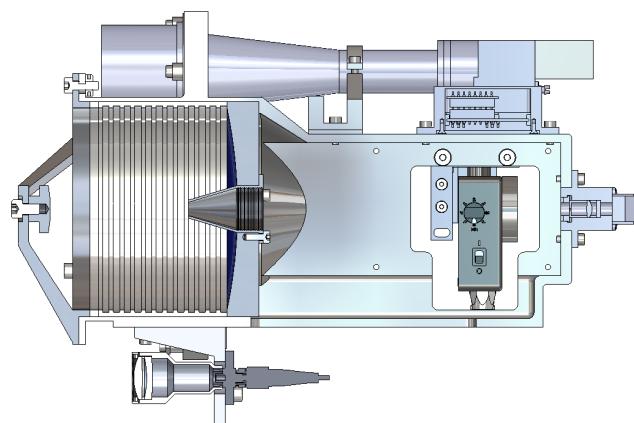


图 3.12 RC 卡塞格林系统

在采取上述措施的同时，激光通信光学系统中的结构件表面全部涂以黑色消光漆，以便吸收大部分杂光，降低杂光能量。杂散光的抑制常常被忽视，一经发现为时已晚，而且解决这个问题既成本高又费时。

学习杂散光抑制技术的最好方法是理解下面例子：反射式卡塞格林望远镜。

前面讨论过的卡塞格伦望远镜始终需要一个有效的杂散光挡板。如果没有挡板，则通常会有从物空间到传感器的直接杂散光路径，这是一个严重的问题。通常使用两个挡板：一个是从次反射镜边缘沿极限成像光束向后延伸的圆锥形挡板，另一个是从主反射镜中心孔向前延伸的管状挡板。

通过一个设计来说明消除卡塞格伦望远镜杂散光的方法。该设计是入瞳直径为 94mm、全视场 0.1° 的 F1.2 系统。所加挡板的目的在于，使刚好掠过前述两个挡板的极限光线不能直接射到像面。为了快速而有效地得到解决方法，给计算机模型增加中心遮拦，并在每一个视场向入瞳追迹 500 条光线，如图 3.13 和 3.14。

如图 3.15(a)。黑色区域完全被光线占据，而从次镜向后延伸和从主镜向前延伸的光亮区域可以为挡板所用，该图还显示刚好通过两个挡板端点并到达像面的极限光线。

图 3.15(b) 示出这种挡板的实现，增加了本章前面所提出的叶片型挡板和带有内部挡板的外镜筒组件。

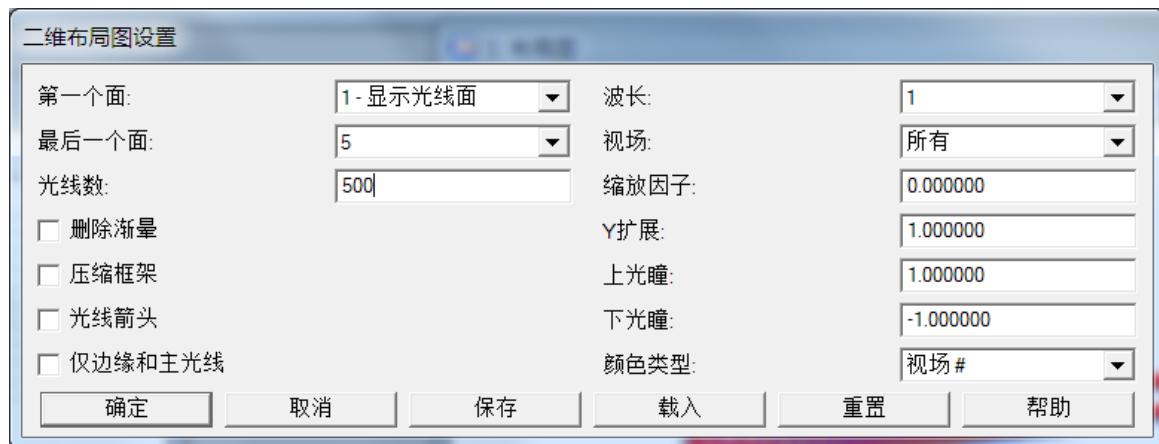


图 3.13 ZEMAX 系统图设置追迹光线数量

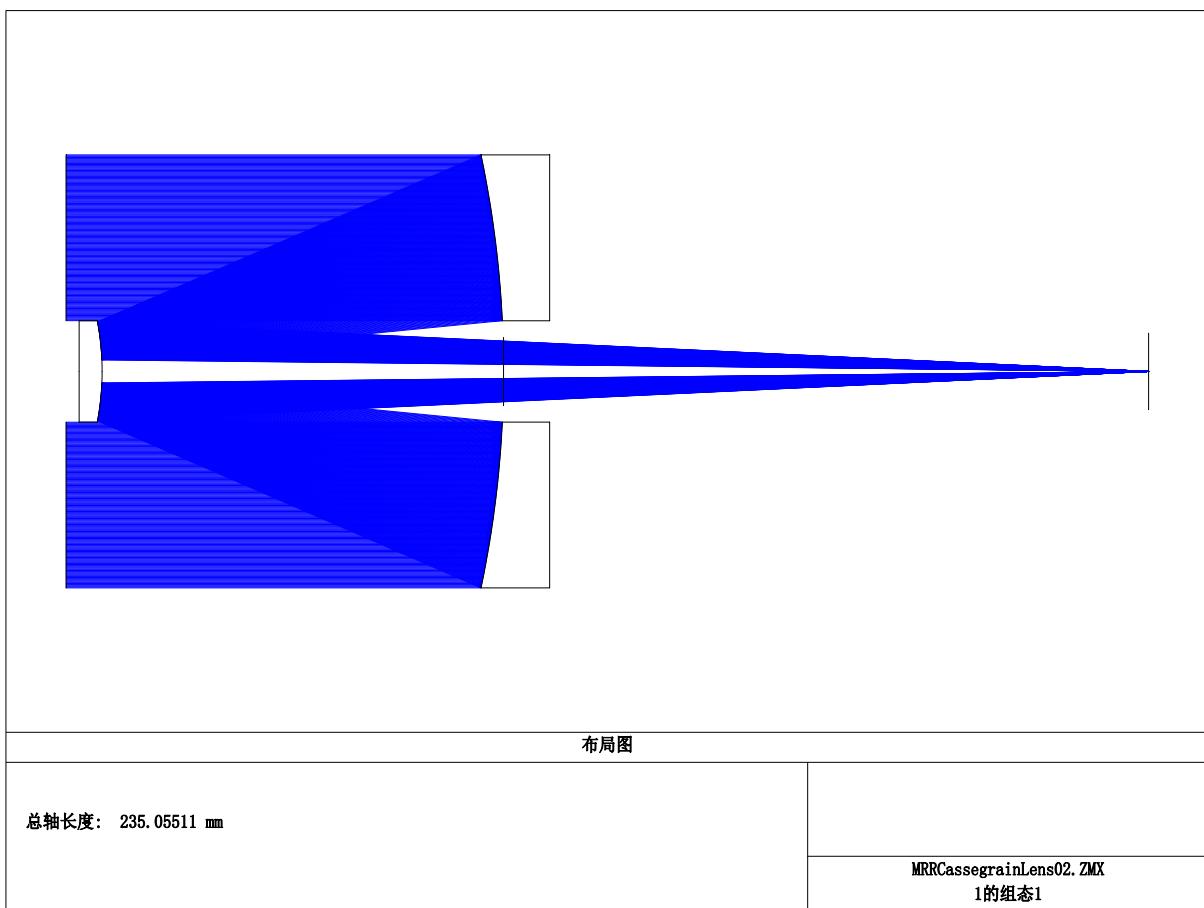


图 3.14 设置追迹光线后的效果图

良好的专业知识和专注的工作通常会提供有效的杂散光抑制方法，认识到这一点很重要。如果需要特殊的消光因素，则需要使用杂散光软件包。比如，在空间应用中，系统可能正在观察太阳几度范围内的黑色天空，需要 105 或更高量级的杂散光抑制。

法国天文学家李奥发明了适于有效地消除杂散光的结构。这个系统是一个三反射镜结构，由主反射镜、次反射镜和第三反射镜组成。在空间太阳几度范围内观察

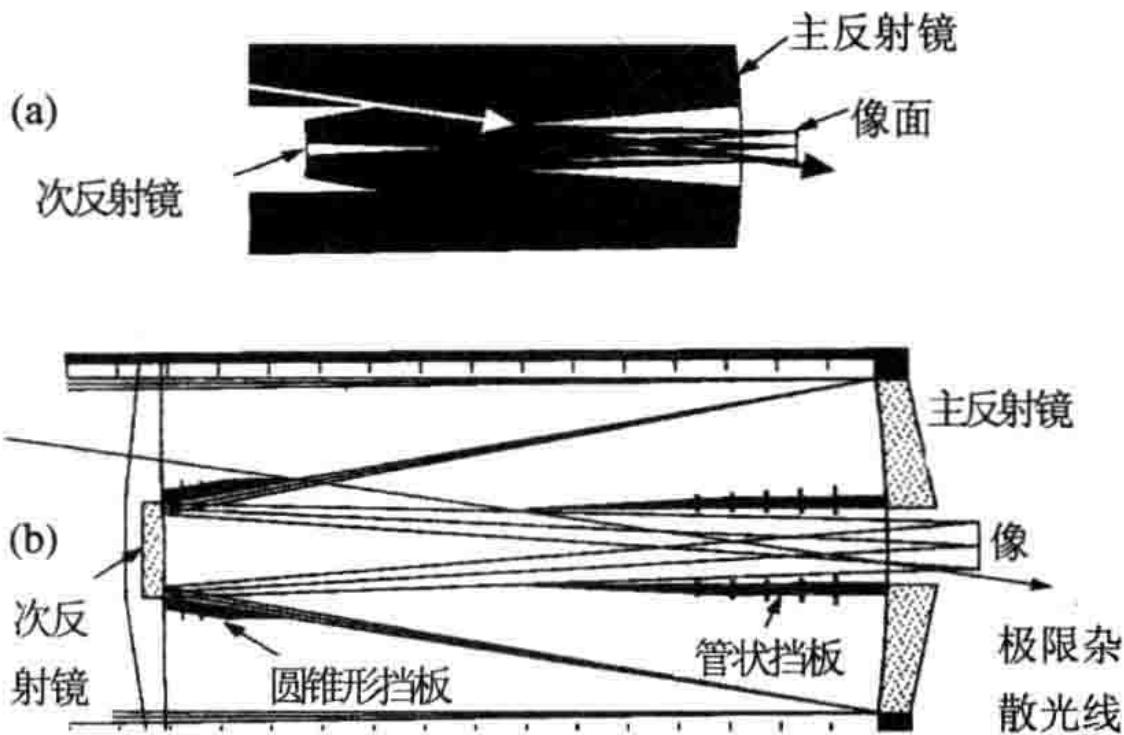


图 3.15 杂散光线的消除

黑色天空时，主反射镜的边缘会散射和衍射大量的光，因为它接收直接的太阳辐射。如果在系统后部主反射镜的像面位置处再放一个光阑，光阑的尺寸略小于主反射镜的像尺寸，则来自前面通过系统的光受到有效的阻挡。这就是以法国天文学家李奥的名字命名的李奥光阑，如图 3.16。

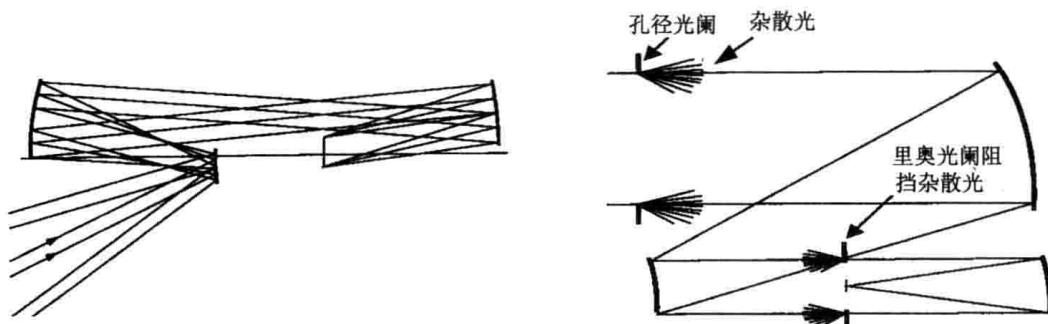


图 3.16 里奥光阑用于杂散光抑制的三反射镜反射系统

3.5 光学机械设计

支撑成像光学系统的机械结构设计非常重要^{[18]3}。与光学机械有关的设计问题如下：

³ Yoder, P., 约德, 周海宪, & 程云芳. (2008). 光机系统设计. 机械工业出版社.

(1) 机械结构支撑系统中的透镜和/或反射镜。为了将像质保持在规定范围内，必须将每个光学元件保持在要求公差内的位置上，公差来源于公差分析和系统性能误差预算。

(2) 机械结构和光学元件在工作温度下，能保持良好的特性。

(3) 保持整个温度范围内的聚焦主要取决于光学元件和机械结构，也可能需要进行无热化设计。

(4) 机械结构必须满足规格书所要求的体积空间指标和质量目标。

(5) 机械结构必须能有效的抑制杂散光。

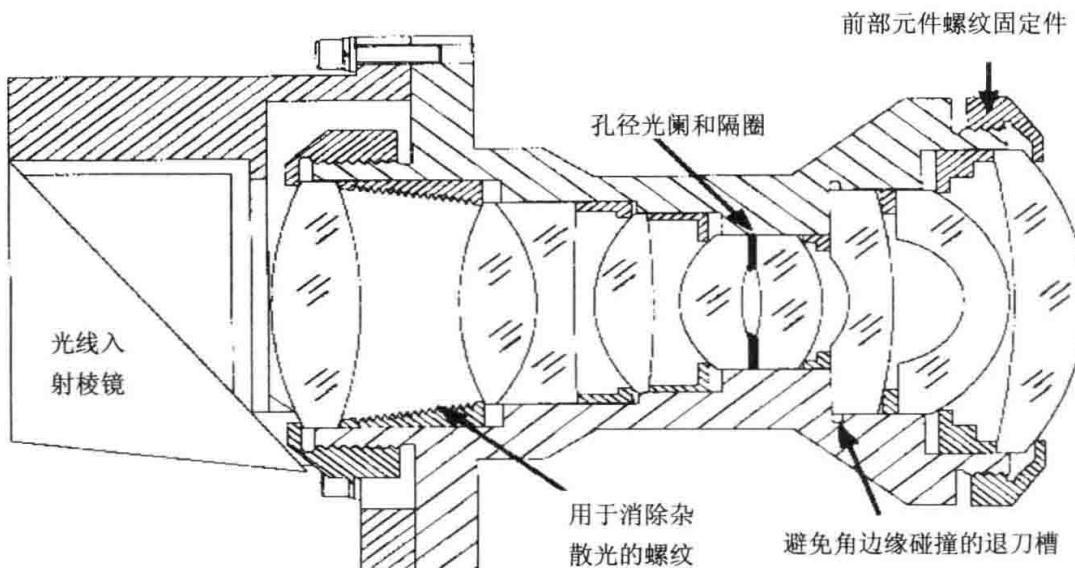


图 3.17 典型镜头镜筒

图 3.17 示出投影镜头的典型镜筒。使用时，反射式显示装置位于光入射棱镜的左边。显示装置上的像被投射到系统右边的屏幕上。该镜筒结构设计的部分重要特征是：

(1) 孔径光阑位于两片较小的元件之间，隔圈作为物理孔径光阑。

(2) 元件由前螺纹压圈和后螺纹压圈限制位置。

(3) 最左面的两片有光焦度元件之间的锥形隔圈使用了螺纹结构。该螺纹消除入射到镜筒的杂散光。

图 3.18 示出一个不同的镜筒以便参考。在这个镜头中，有两个粘结剂注入孔，这样左边的两片透镜被粘结到镜筒上。粘结剂一般是半屈服性的环氧树脂或 RTV。使用粘接剂可以防止振动和冲击对镜头造成不良影响。透镜定中心使用薄垫片或通过在精密空气轴承上旋转镜筒来确保镜筒和透镜的跳动符合公差要求。

3.5.1 主镜固定的机械结构设计

RC 望远系统主镜的设计主要在铁镍合金机械结构上镀高反射膜，并用螺钉紧固在主镜外筒上。如图 3.19a 和 3.19a 所示。

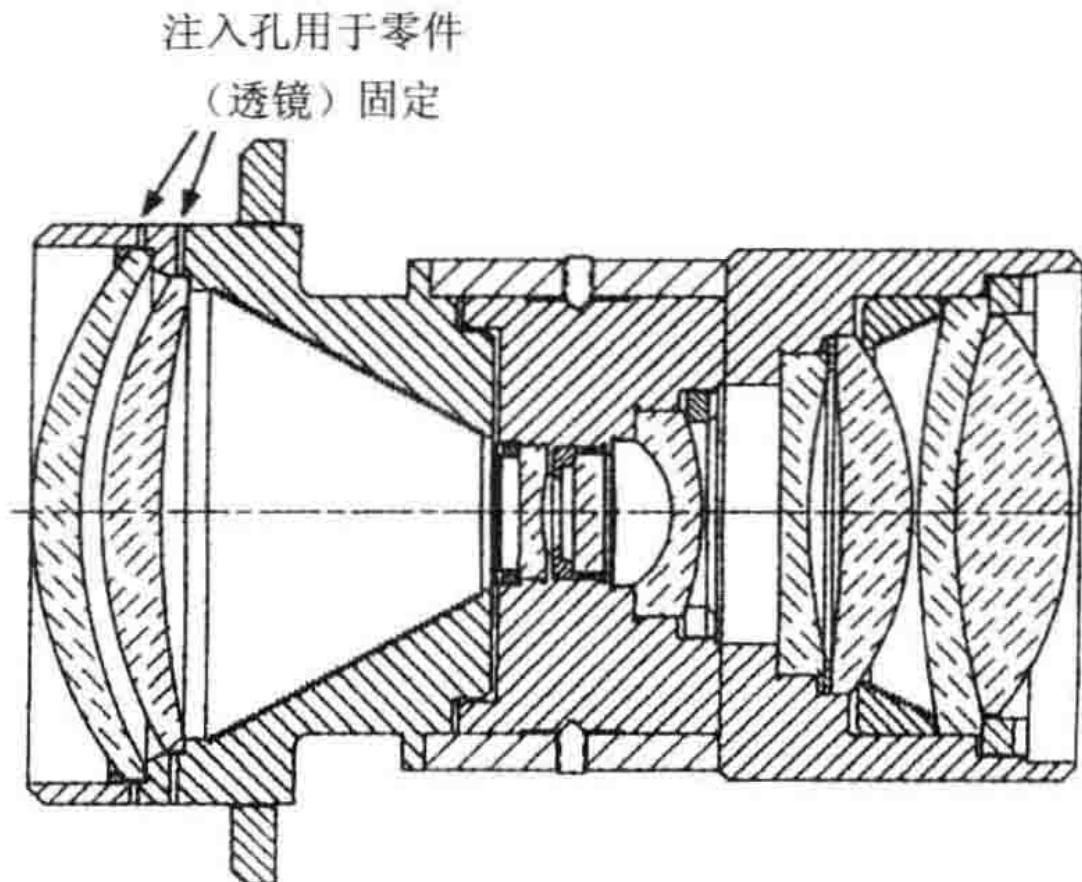


图 3.18 典型镜头镜筒

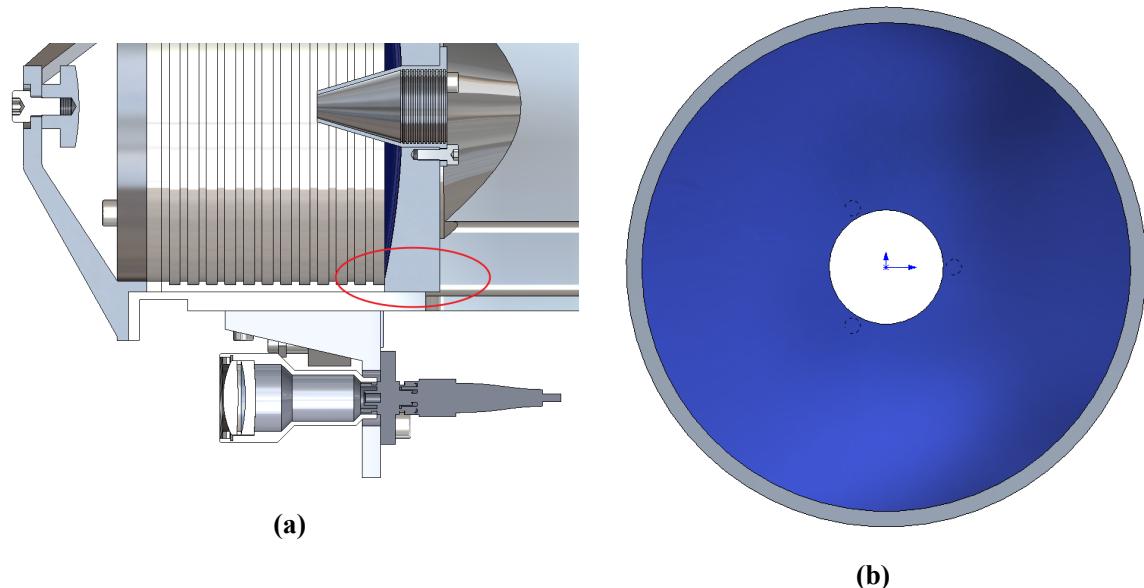


图 3.19 主镜光机结构。(a) 主镜光机结构剖面图, (b) 主镜光机结构图

Figure 3.19 Primary Mirror Optical Machine Structure.(a) Cross-Section Drawn , (b) Machine Structure

3.5.2 次镜固定的机械结构设计

RC 望远系统次镜的设计主要在铁镍合金机械结构上镀高反射膜，并用弹性压圈把次镜压在次镜外筒上。如图所示3.20a和3.20b。

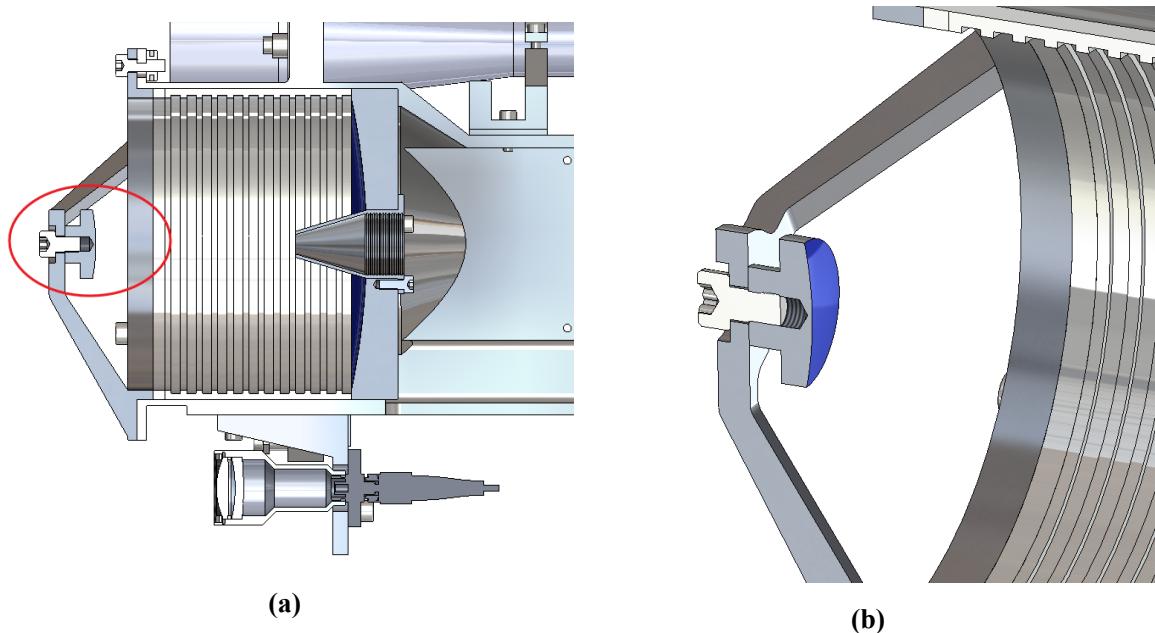


图 3.20 次镜光机结构。(a) 次镜光机结构剖面图, (b) 次镜光机结构图

Figure 3.20 Primary Mirror Optical Machine Structure.(a) Cross-Section Drawn , (b) Machine Structure

3.6 装配误差

载荷望远单元一定要考虑飞行器在地面操作、发射和飞行工作阶段的热环境和机械环境下的公差。热离散和热梯度、材料变形、飞行器和光端机内部机械振动是引起光机装置轴线偏离的主要原因。在飞行工作阶段，热稳定性和机械稳定可以确保近衍射极限角工作状态。对准敏感度的大部分信息可以通过光学设计软件获得。它包括了倾斜、间距、望远镜主镜和次镜的中心误差等。

在充分掌握热模型和结构模型后，辨别在不同环境条件下机械运动的角度，对光学对准偏差和波阵面误差预算就迎刃而解了。

为了使机载系统具有良好的稳定性，在光机装置在热设计和机械设计后，还要考虑位置公差要求，可以定量估计波前均方根误差（代表部分波长）。轴线偏差可以分为三类：单纯轴向偏差（如离焦）；单纯横向偏差（如三级彗差）；单纯倾斜偏差（也经常引入彗差）。在离焦时，光学主镜和次镜的轴线保持对准，仅是镜子间隔变化了。在横向偏差时，光学轴线不再重叠，而镜子间隔保持不变。后者的次镜轴线相对于主镜的轴线存在不同程度的倾斜和离心。

温度变化 (ΔT) 引起镜子材料的局部非弹性变化为 $\alpha \Delta T$ ，其中 α 是热膨胀线性系数 (CTE)。整个光机装置内部的平均温度变化使镜子的焦距 (f) 根据公式

$\Delta f = f\alpha\Delta T$ 改变 Δf 。局部温度变化（梯度）导致局部表面变形，从而引发波前像差。

3.7 光学系统的稳定性和轻小型化

光机系统的微位移（几微米）会使成像质量达不到衍射极限。由于没有复杂系统的热模型，很难评价光学系统的热梯度影响。适当的热散可以减轻局部产生的热负载。由于整个光机系统可能经历很大的温度变化，如飞行器绕地球在轨运行（或另一个太阳系对象），太阳阴影和加热器常用于保持系统维持在恒定温度附近。望远镜口径越大，通过孔径的热梯度变化越明显，且很难在孔径内达到平衡。考虑空间使用要求（发射和接收），较大的光学孔径仅采取被动热稳定是不够的。

保持主一次镜的分离和重叠是避免受温度变化影响的一个关键设计因素。含有主动聚焦元件（尽管不可取）是一种降低光学轴线偏差的方法。同时，利用具有高导热系数的材料作为镜子的基底和结构也将减小热致轴线偏离。在这种情况下，太阳光照射在此结构上，反射光的热负荷会迅速传导出去。此外为了减少热效应，可选择热膨胀系数小的材料，如 ULE、CER-VIT、CFRP、ZERODUR 和 SiC。例如，使用以碳化硅为基底材料的望远镜作为绝缘系统，它对热变化和梯度不敏感。热膨胀的残差造成离焦，可以采用适当热膨胀系数的材料（如一个特殊钢钢支架）来改变主一次镜子间的间隔从而进行补偿。

第4章 激光单元

4.1 激光器概述

对于近地激光通信光端机，若采用直接探测模式，则要有高效、多吉比特每秒带宽调制能力、中等平均功率发射水平和高质量空间光束的激光发射能力，而某些光纤放大器和半导体二极管激光器是最佳选择。目前，已有的非定制的激光发射器可达到近地面激光通信链路对输出功率和光束质量的要求。除了在抗辐射性和真空中的环境下应用尚未验证之外，而 Telcorida 的商用激光器满足几乎所有的机载和星载任务的指标要求。需要改善的是提高整体工作效率（激光驱动器和抗热性）以及执行 10~15 年持久任务的寿命。激光通信中波长主要集中在 810m、1064m 和 1550m。其中最常用的波长为 1550nm，不仅是 1550mm 激光的商品化率高，而且此波段的大气衰减和对人眼的危害也比 800nm、1064mm 波长要小得多，安全性高。考虑到链路预算和波长之间的关系，波长的大小对其影响更明显。总之，激光的选择依据主要考虑器件可用性、足够大功率并易于调制。

目前，利用光放大器如掺铒光纤放大器的半导体激光器可将输出数据传输速率超过 10Gb/s，输出功率从 1mW 提高到数千毫瓦。振荡器以多吉比特每秒的速率输出调制光信号之后经光放大且保持其较好的光束质量特性。激光发射单元的设计包括波长、输出功率、增益、增益系数、增益波动、噪声系数和带宽等参数。图 4.1 是一个多级振荡一放大器框图

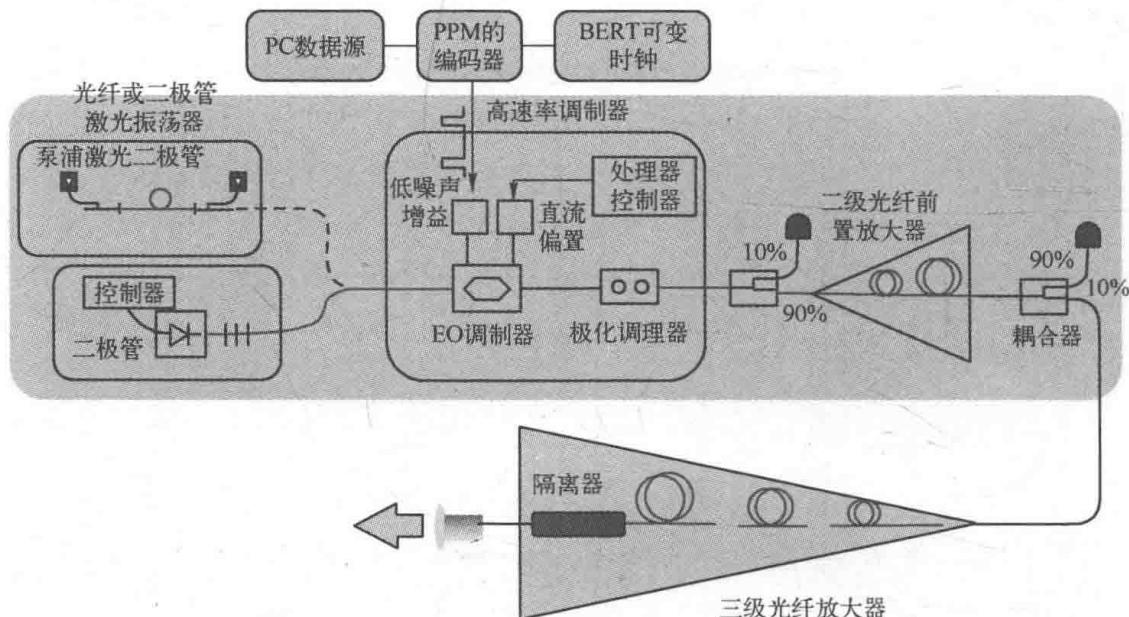


图 4.1 几十 dBm 调制激光功率的多级放大器，输出功率根据放大器级数扩展

4.2 激光束瞄准和稳定

对于运动平台间的自由空间激光通信，激光束指向和对准是最具挑战性的技术之一。激光通信指向在一般情况下可以分解成光轴稳定和提供正确的接收器位置。后者由接收端信标光完成，前者通过使用高带宽的控制回路来正确感应平台抖动。近地激光通信系统接收端的强信标光同时可完成以上两功能。

4.3 激光单元的实验设备理论计算和选型

4.3.1 理论计算

实验采用的激光器是科乃特公司的 1.55um 系列光纤激光器。



图 4.2 VFLS-1550-B 光纤激光器

由光纤激光器输出的激光束散角太大，导致传输距离有限，且能量损失严重，所以必须在光纤输出端加光纤准直器，光纤准直器通过光纤尾纤与透镜精确定位而成，把光纤内的传输光变为准直光耦合到单模光纤内。

查询科乃特公司 (connet laser) 的 1.55um 系列连续光纤激光器的技术文档可知，如图 4.3 所示，单模光纤是采用康宁公司最常见的 SMF28 系列的，连接器为 APC 结构，设计和选型时需要注意。

输出光纤类型 ⁴		SMF-28单模光纤
输出光纤长度	m	> 1
输出光纤连接器		FC/APC，其他可选
规格尺寸	mm	19英寸2U或者3U

图 4.3 1550nm 连续光纤激光器的技术文档

查询 Corning 公司 SMF-28e+ 光纤的技术手册可知，如图 4.4。

具体的光学指标，如模场直径([MFD])、色散和数值孔径(NA)如图 ??、图 ?? 和 4.7 所示，这些参数主要用于设计光纤准直透镜时会用到。

Corning® SMF-28e+® 光纤 产品信息



康宁SMF-28e+®光纤是单模光纤的行业领导者，被广泛应用于城域网、接入网中。它是符合ITU-T G.652.D标准的单模光纤，并能后向兼容传统的标准单模光纤。SMF-28e+®光纤秉承康宁光纤优异的质量及出色的性能表现。自从40年前我们制造了世界上第一根光纤，康宁在单模光纤上的技术创新一直保持行业领先地位。

图 4.4 Corning-SMF28E 技术文档

模场直径

波长 (nm)	模场直径 (μm)
1310	9.2 ± 0.4
1550	10.4 ± 0.5

图 4.5 Corning-SMF28e+ 的模场直径

色散

波长 (nm)	色散值 [ps/(nm·km)]
1550	≤ 18.0
1625	≤ 22.0

零色散波长 (λ_0): $1304 \text{ nm} \leq \lambda_0 \leq 1324 \text{ nm}$

零色散斜率 (S_0): $\leq 0.092 \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$

图 4.6 Corning-SMF28e+ 色散

根据输出光束直径(7mm)估算准直器的焦距,如图4.8,所用激光波长为1550nm,公式如下

$$f \approx \frac{\pi d[MFD]}{4\lambda} \approx \frac{\pi \times 7 \times 10.4 \times 10^{-6}}{4 \times 1.55 \times 10^{-6}} \approx 36.89 \text{ mm}$$

根据单模光纤估算其发散角(全角),焦距取37mm,公式如下

$$\theta \approx \left(\frac{[MFD]}{f} \right) \left(\frac{180}{\pi} \right) = \left(\frac{10.4 \times 10^{-6}}{37 \times 10^{-3}} \right) \left(\frac{180}{\pi} \right) = 0.0161^\circ$$

纤芯直径	8.2μm
数值孔径	0.14 数值孔径是在1310nm一维远场扫描之百分之一功率水平处的测量。
有效群折射率 (N_{eff})	1310nm: 1.4674 1550nm: 1.4679
抗疲劳参数 (N_d)	20
涂层剥除力	干: 0.6 磅 (3N) 湿 (室温下14天) : 0.6 磅 (3N)
Rayleigh 反向散射系数 (脉冲宽度为1 ns)	1310nm: -77 dB 1550nm: -82 dB

图 4.7 Corning-SMF28e+ 数值孔径 NA

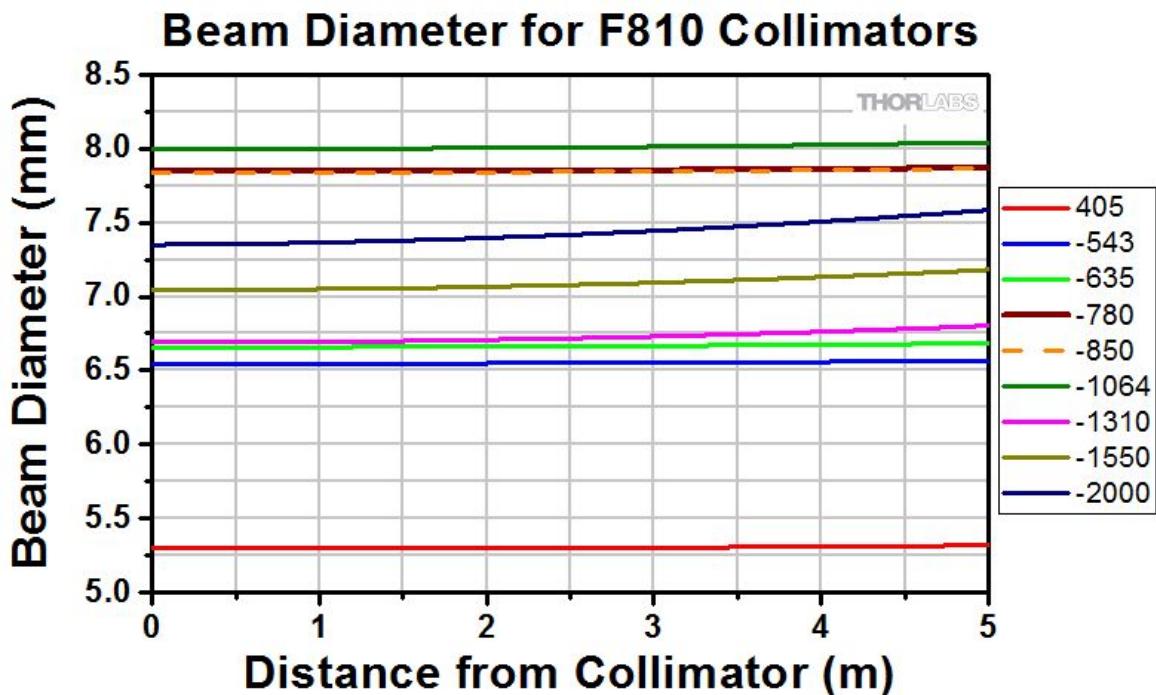


图 4.8 光纤激光准直器的光束直径

维持准直，激光束束腰距离透镜最远的距离，根据计算公司，可知

$$z_{\max} = f + \frac{2f^2\lambda}{\pi[MFD]^2} = 37 \times 10^{-3} + \frac{2 \times (37 \times 10^{-3})^2 \times 1.55 \times 10^{-6}}{\pi \times (10.4 \times 10^{-6})^2} \approx 12.527m$$

4.3.2 准直透镜设备选型

根据上述的计算，在 THORLBAS 公司的空气隙双合透镜准直器产品选型即可，如图4.10和图4.9。



图 4.9 带准直器的光纤激光器

空气隙双合透镜准直器，1550 nm

Item #	Alignment Wavelength ^a	Lens AR Coating ^b	Waist Diameter ^c	Waist Distance ^d	Full-Angle Divergence ^e	Theoretical Divergence NA	Focal Length at Alignment Wavelength	Damage Threshold	L	Diagram ^f	Connector Type
F810APC-1550	1550 nm	1050 - 1620 nm	7.0 mm	37.20 mm	0.016°		0.24	37.13 mm	-		FC/APC
F810FC-1550	1550 nm	1050 - 1620 nm	7.0 mm	37.20 mm	0.016°		0.24	37.13 mm	-		FC/PC
F810SMA-1550	1550 nm	1050 - 1620 nm	7.0 mm	37.20 mm	0.016°		0.24	37.13 mm	-		SMA

a. 如要获得最优准直效果，应在对准波长下使用这些准直器。对于有些应用来说，它们也可能在增透膜范围内的其他波长下使用。如要定制其他波长下的准直器，请联系技术支持techsupport-cn@thorlabs.com。

b. 有关Thorlabs的准直增透膜数据，请看上面的倍透镜示意图。

c. 距离透镜一倍焦距处的 $1/e^2$ 直径理论值；使用[SMF-28e](#)光纤在对准波长下计算所得。

d. 从准直器外壳前面测得。

e. $1/e^2$ 理论光束发散角；使用[SMF-28e](#)光纤在对准波长下计算所得。

f. 这些准直器兼容[AD15F](#)和[AD15NT](#) Ø15 mm转接件。

图 4.10 选型

4.3.3 准直透镜 ZEMAX 仿真

根据计算的参数选型，将模型导入 ZEMAX 仿真。

准直透镜参数如图 4.11 所示。

准直透镜布局图如图 4.12 所示。

准直透镜圈内能量图如图 4.13 所示。

准直透镜的光线扇形图如图 4.14 所示。

准直透镜的点列图如图 4.15 所示。

ZEMAX 透镜数据编辑器

表面:类型		标注	曲率半径	厚度	玻璃	半直径	圆锥系数
OBJ	标准面		无限	0.000		0.000	0.000
1	标准面	F810APC-1550	无限	30.663		0.000	0.000
*	标准面	F810APC-1550	115.450	2.700	N-SF6	10.000 U	0.000
3*	标准面		42.660	1.847		10.000 U	0.000
4*	标准面		153.820	4.000	N-SF6	10.000 U	0.000
5*	标准面		-23.660	50.000		10.000 U	0.000
IMA	标准面		无限	-		5.194	0.000

图 4.11 准直透镜参数

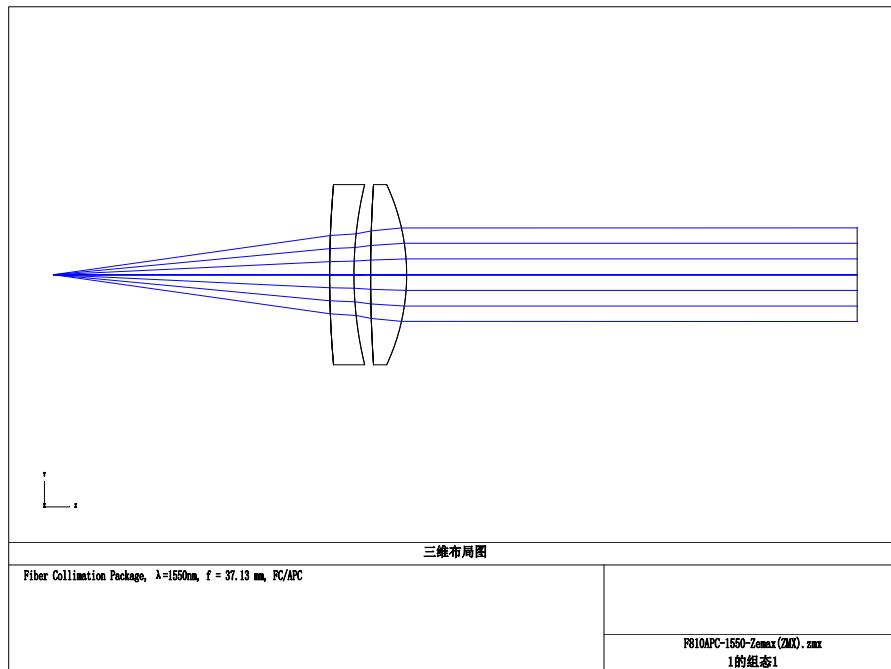


图 4.12 准直透镜 ZEMAX 布局图

4.3.4 激光准直器在光学基台的安装

图 4.17 显示的是激光准直器接上光纤激光发射器后，是如何安装在光学基台上

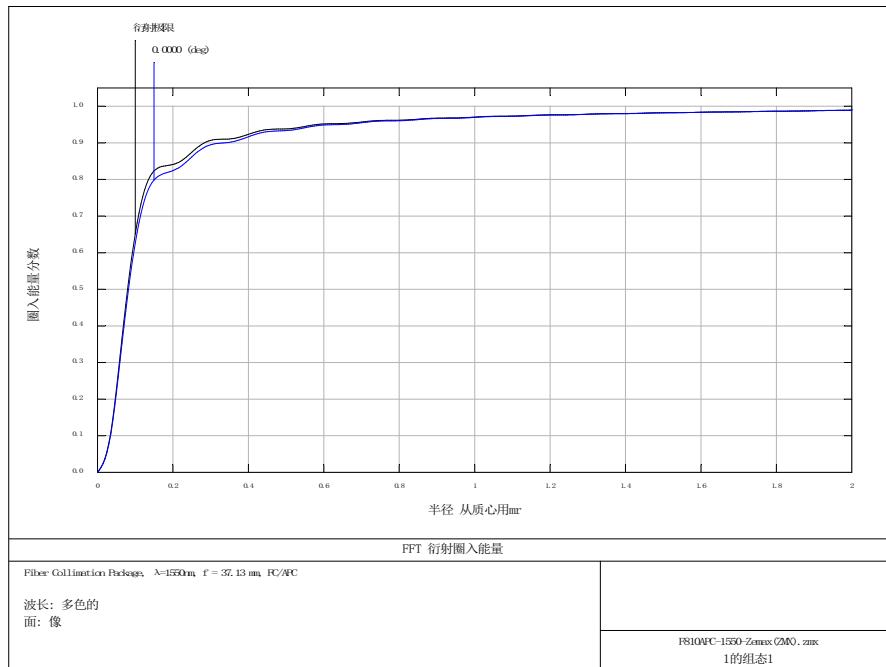


图 4.13 准直透镜圈内能量图

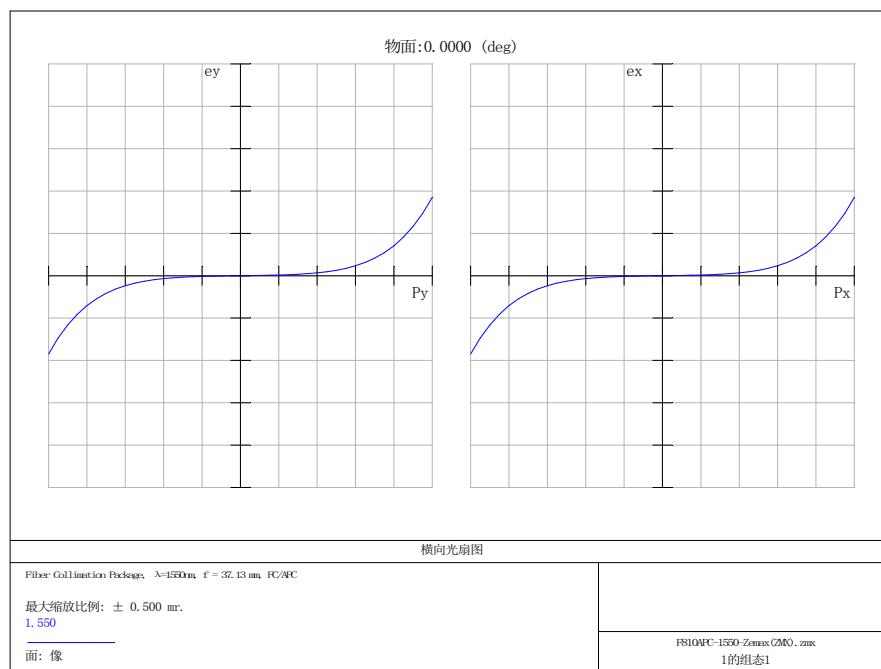


图 4.14 准直透镜的光线扇形图

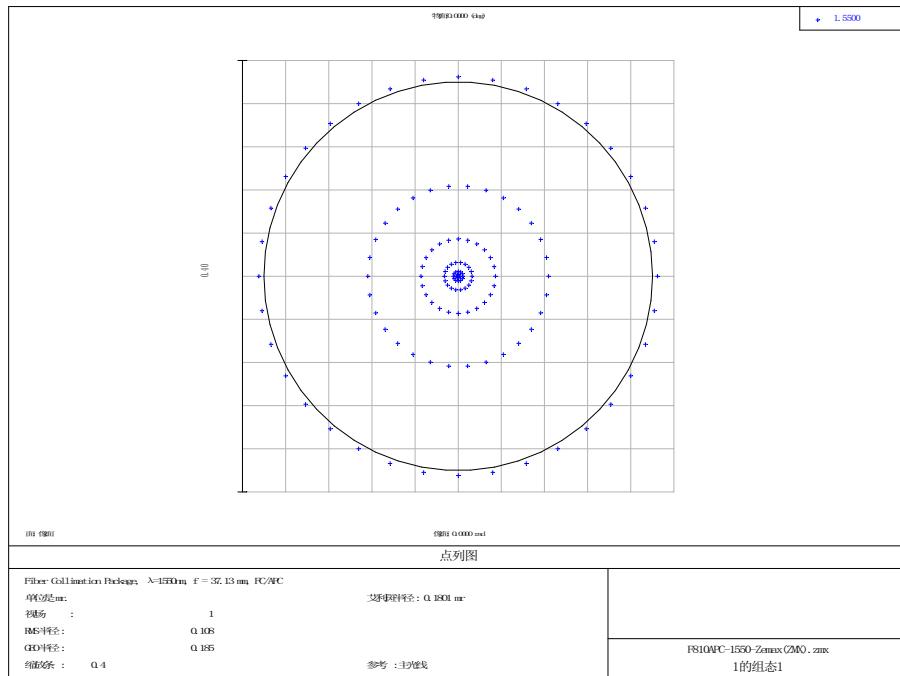


图 4.15 准直透镜的点列图

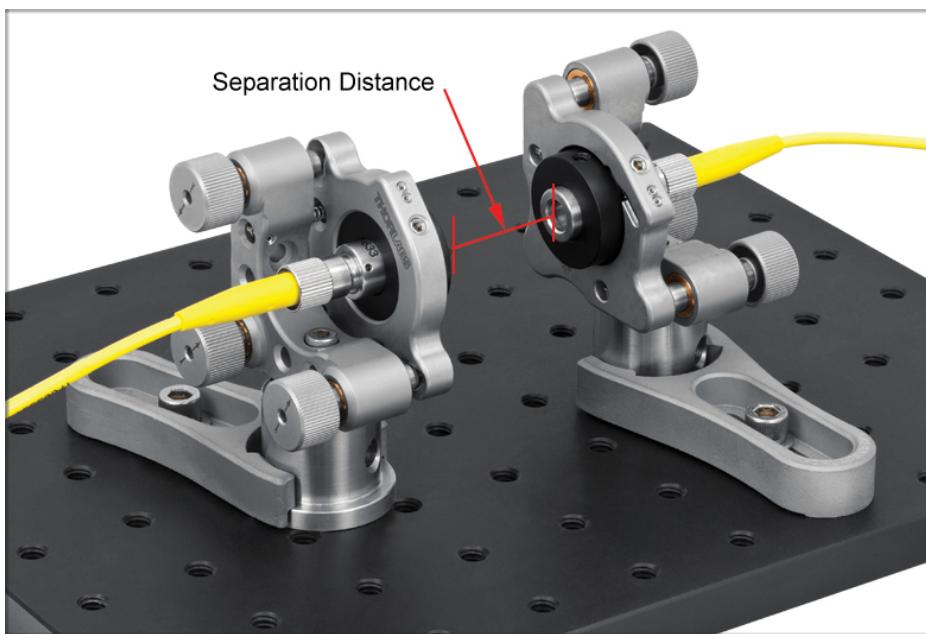


图 4.16 带准直器的光纤激光器安装图

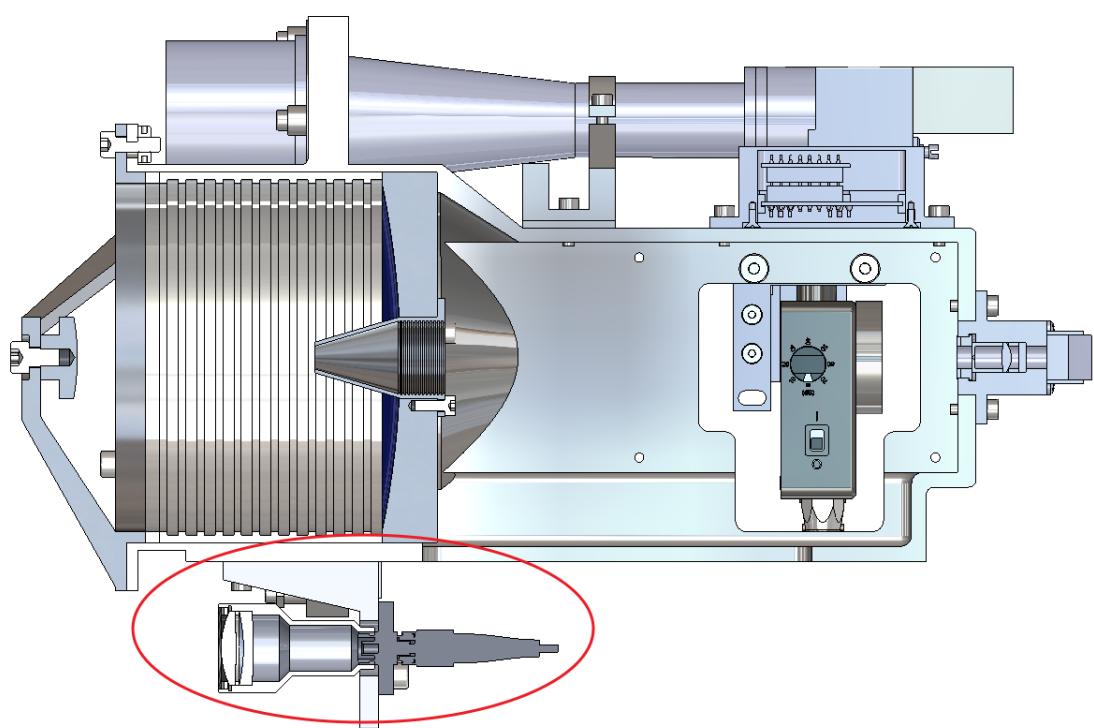


图 4.17 激光准直器在光学基台的安装

第5章 光电探测器单元

光电探测器的作用是对通信反射回来的激光束进行检测，将光能量转换为电能量，方便后续电路进行信号处理。

5.1 自由光通信主要使用的探测器类型

对于自由空间光通信系统，常用的探测器类型为光电二极管和雪崩二极管，雪崩二极管可以对十分微弱的信号进行检测，但是缺点是容易受环境噪声的影响。光电二极管是从原有的 PN 结基础上改良过来的，虽然没有灵敏度有所下降，但是其工作带宽高，常常应用于光纤通信系统，或使用在速率比较高的激光通信系统。

因为大气信道对激光有衰减效应，所以存在特定的大气通信波长窗口，如 800nm 和 1550nm 等，只有在该波长附近的光束才能传输更远的距离。这就要求选择对这些波长更为灵敏的光学材料，因为本课题采用的波长为 1550nm，对于该波长比较灵敏的材料是铟镓砷，所以在后面选型的时候就要选择该材料作为探测单元的探测器。

5.2 通信接收单元的信号处理

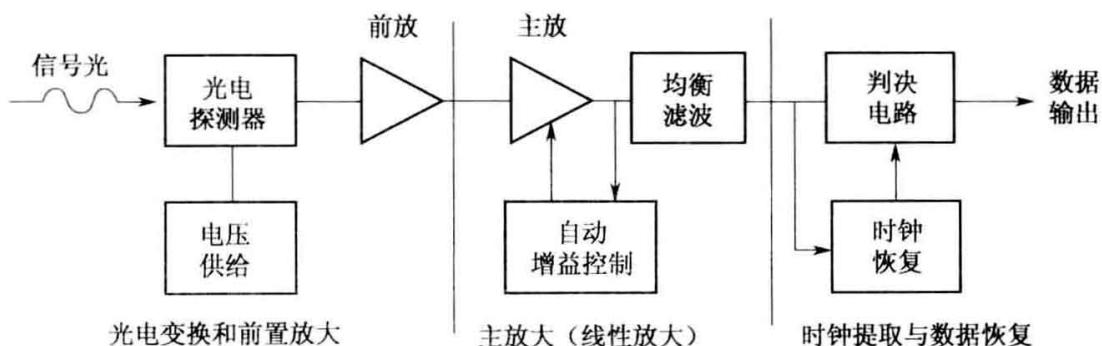


图 5.1 数字光接收机组成原理图

在自由光通信系统中，由于现有激光器的功率在体积较小的情况下，基本不能做的很大，所以有激光器发射出来的光束能量本来就很弱，在大气传输后，进一步削弱，导致探测器检测到信号的时候，已经非常微弱了，基本在毫伏和微伏量级，这就对探测器接收电路设计提出了更高的要求。

为了匹配现有的 TTL 电平标准，需要对信号进行放大，通常需要设计两级放大器进行信号的放大。探测器的材料一般基于光电导效应，探测材料经激光照射后，其导电率会发生变化，或者反映为电流的变化，所以第一级放大电路一般为电流电压转换型放大器，进行小信号放大，推荐使用跨阻放大器作为前端放大器；第二级放大器推荐使用线性放大器，对前置放大器进行补偿和校正，稳定输出电压。

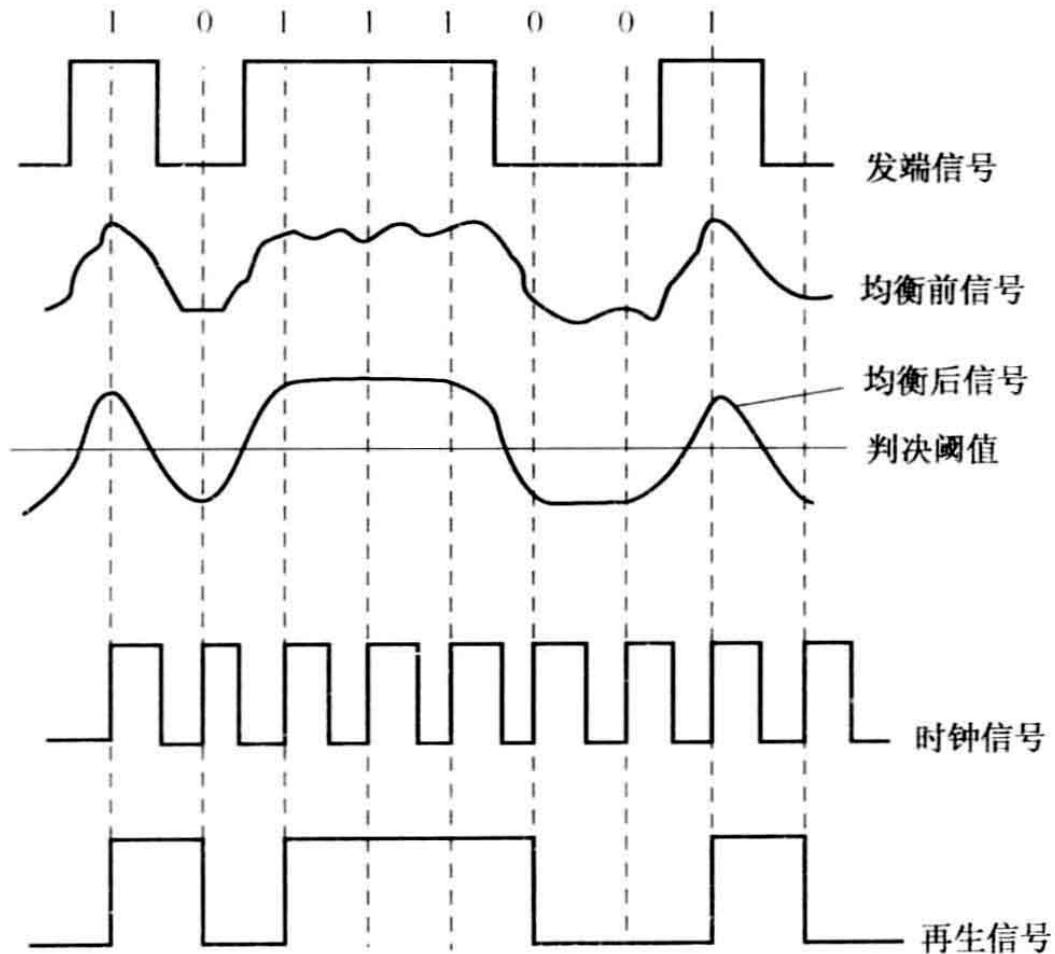


图 5.2 判决与再生过程

经过两级放大器放大后，信号幅值可以达伏级左右，但是因为在放大过程中，一并把噪声信号也进行了同等级别的放大，所以在进行时钟提取和数据恢复（如图 5.2）时，需要先经过均衡滤波，即先经过滤波，去掉不需要的高频信号，提高信号检测的可靠性，如图 5.1 为一般激光通信系统光接收机的组成结构图。

5.3 实验所用的探测器简介

因为选用的激光是 1550nm 波长，所以探测器的材料优先选择 InGaAs，该材料对该波长的激光比较灵敏，响应较快。实验采用的是 THORLABS 公司的铟镓砷光电探测器（自由空间型，带放大），型号为 PDA20CS(-EC)，带 8 档的增益可调节按钮。该公司提供了多种铟镓砷 (InGaAs) 自由空间型带放大的光电探测器，用于探测近红外波段的光。Thorlabs 带放大光电探测器采用了内置低噪声跨阻放大器 (TIA) 的设计。

对于 PDA20CS 探测器的增益问题，需要注意的问题是，在平常在设计激光接收电路的时候，探测器后面需要有前置放大器，AGC 放大器，最后还需要时钟提取和数据判决电路，但是 PDA20CS 已经集成了前置放大器和 AGC 放大器。

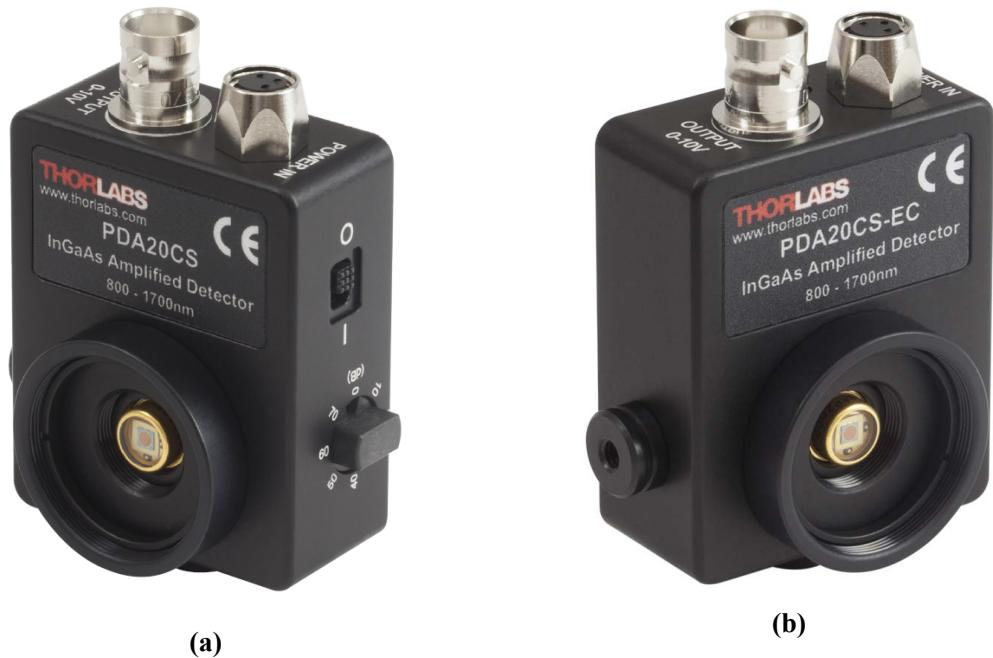


图 5.3 探测器。(a) 右侧图, (b) 左侧图

Figure 5.3 Detector.(a) right , (b) left

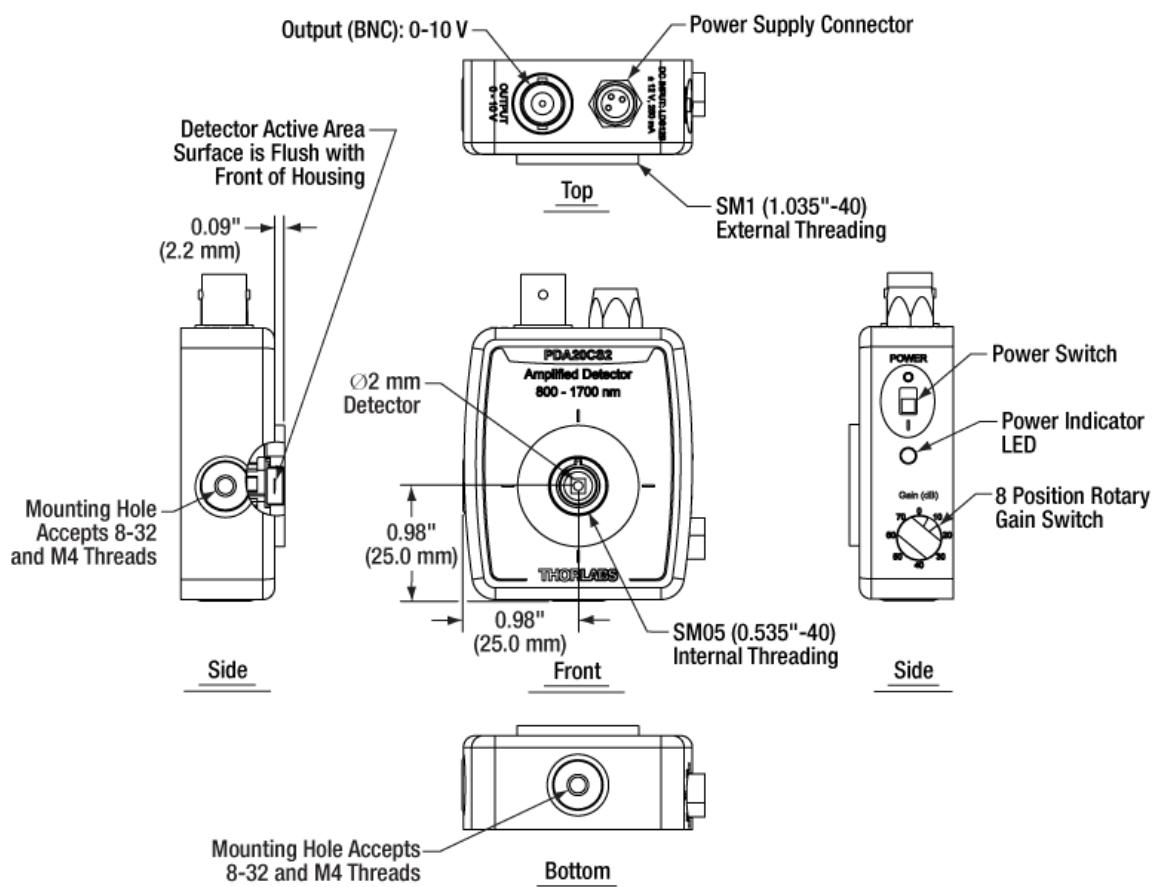


图 5.4 PDA20CS 安装尺寸图

PDA和PDF系列探测器

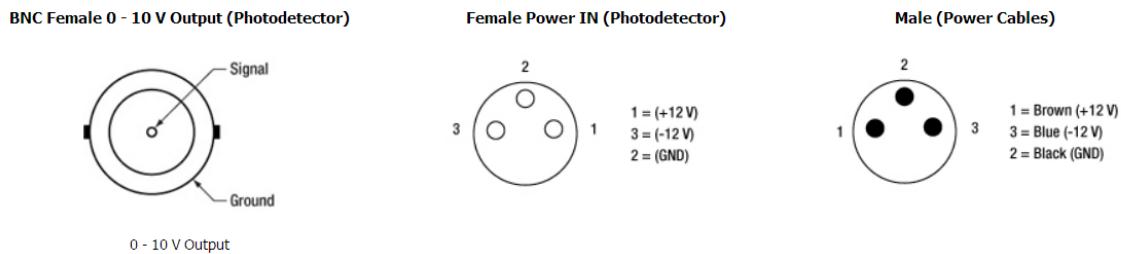


图 5.5 PDA20CS 信号输出和电源管脚图

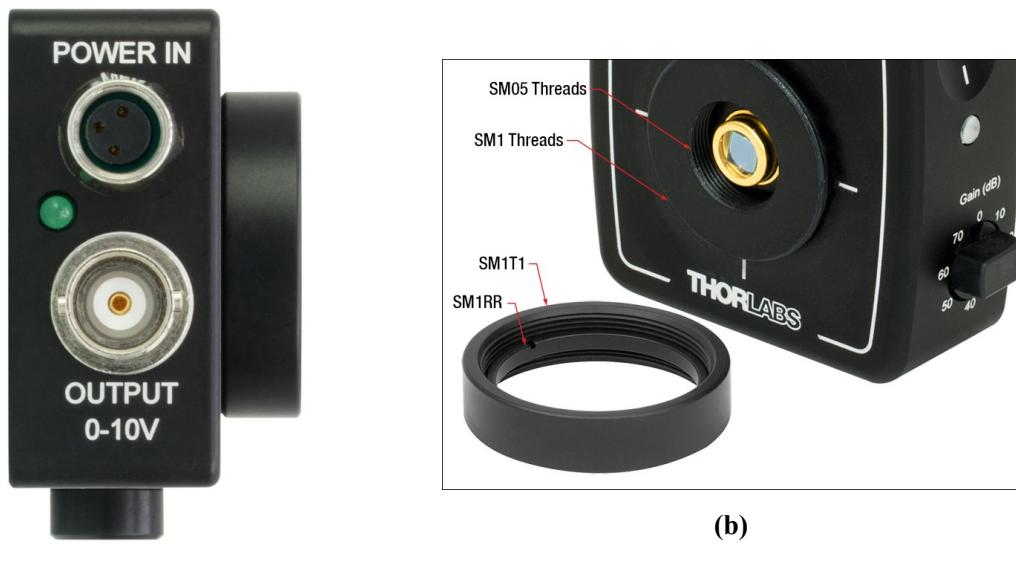


图 5.6 探测器。(a) PDA20CS 顶视图, (b) PDA20CS 正视图

Figure 5.6 Detector.(a) TOP VIEW , (b) FRONT VIEW

虽然图5.8表格说明了 PDA20CS 在高阻态使用（接示波器）的时候，可以输出 0~10V 的电压变化，而在输出口接 50Ω 负载电阻可以输出 0~5V 的电压变化量，但实际上这个电压输出最大值并不是每一个档位都能输出这个动态范围，比如，如果使用连续激光源和检测器增益为 1 (0 dB) 设置时，高阻态最大输出电压为 2V，而带 50Ω 负载时最大输出电压为 1V；如果使用连续激光源和检测器增益为 10 dB 设置时，高阻态最大输出电压为 7V，而带 50Ω 负载时最大输出电压为 3.5V，所以在后续的时钟提取和数据提取电路需要设置相应的过压保护电路。

Item #	Wavelength Range	Bandwidth	NEP
Fixed Gain			
PDA015C(/M)	800 - 1700 nm	DC - 380 MHz	20 pW/Hz ^{1/2}
PDA05CF2	800 - 1700 nm	DC - 150 MHz	12.6 pW/Hz ^{1/2}
PDF10C(/M)	800 - 1700 nm	DC - 25 Hz	7.5 x 10 ⁻³ pW/Hz ^{1/2}
PDA20C(/M)	800 - 1700 nm	DC - 5 MHz	22 pW/Hz ^{1/2}
PDA10D(-EC)	800 - 2600 nm	DC - 15 MHz	35 pW/Hz ^{1/2}
FPD510-F	850 - 1650 nm	DC - 250 MHz	3.2 pW/Hz ^{1/2}
FPD610-FS-NIR	950 - 1650 nm	DC - 600 MHz	6.6 pW/Hz ^{1/2}
Switchable Gain			
PDA20CS(-EC) ^a	800 - 1700 nm	DC - 10 MHz	1.14 - 51.2 pW/Hz ^{1/2}
PDA10CS(-EC) ^a	900 - 1700 nm	DC - 17 MHz	1.25 - 60 pW/Hz ^{1/2}
FPD310-FS-NIR ^b	950 - 1650 nm	1 - 1500 MHz	14.1 pW/Hz ^{1/2}

- a. Switchable with 8 x 10 dB steps.
- b. Switchable with 2 steps, 0 and 20 dB.

图 5.7 PDA20CS 增益和带宽

Switchable Gain

Item #	Gain Step	Gain w/ HI-Z Load ^a	Gain w/ 50 Ω Load ^a	Bandwidth	Noise (RMS)	NEP ^b	Offset (±)	Output Voltage w/ HI-Z Load	Output Voltage w/ 50 Ω Load
PDA20CS	0	1.51 kV/A	0.75 kV/A	10 MHz	365 μV	51.2 pW/Hz ^{1/2}	5 mV (10 mV Max)	0 to 10 V ^c	0 to 5 V ^d
	10	4.75 kV/A	2.38 kV/A	4 MHz	500 μV	31.1 pW/Hz ^{1/2}	6 mV (10 mV Max)		
	20	15 kV/A	7.5 kV/A	1.87 MHz	340 μV	6.54 pW/Hz ^{1/2}	6 mV (10 mV Max)		
	30	47.5 kV/A	23.8 kV/A	660 kHz	490 μV	3.04 pW/Hz ^{1/2}	6 mV (10 mV Max)		
	40	151 kV/A	75 kV/A	200 kHz	590 μV	1.14 pW/Hz ^{1/2}	6 mV (10 mV Max)		
	50	475 kV/A	238 kV/A	67 kHz	670 μV	2.91 pW/Hz ^{1/2}	6 mV (10 mV Max)		
	60	1.5 MV/A	0.75 MV/A	25 kHz	880 μV	1.76 pW/Hz ^{1/2}	6 mV (10 mV Max)		
	70	4.75 MV/A	2.38 MV/A	4 kHz	1.33 mV	5.89 pW/Hz ^{1/2}	8 mV (12 mV Max)		

图 5.8 PDA20CS 增益参数表

第6章 光信号调制原理与技术

自由光通信通常采用的调制方式为开关键控和频率调制，大多采用强度调制直接检测方式，通过光学系统后方的光电探测器来检测。比较典型的调制方式有开关键控（OOK）调制脉冲位置调制（PPM）和数字脉冲间隔调制（DPIM）。

6.1 开关键控调制（OOK）

在 OOK 调制方式中，通过开或关两种方式来传送数据。最大比特率直接依赖光源所能达到的开关速率。。OOK 调制工作原理示意图如图 6.1 所示

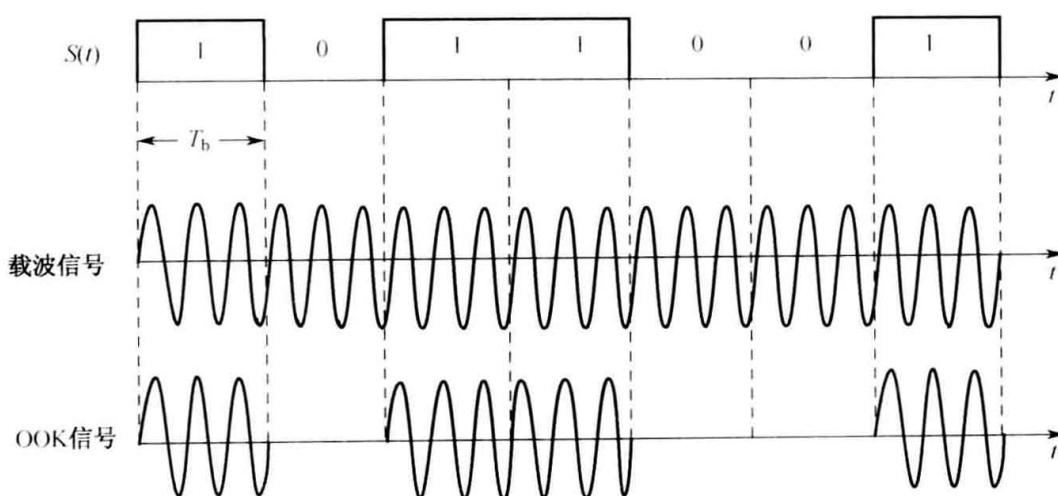


图 6.1 OOK 调制工作原理小意图

6.2 脉冲位置调制（PPM）

PPM 主要在特定的脉冲信息宽度中，通过控制在这个宽度中不同位置来实现不同信息的传送。例如，当 $M=2$ 时，OOK 调制与 PPM 的对应关系如图 6.2 所示。PPM 抗干扰能力强，对激光器发射功率的要求低，适用于传输速率不高、峰值功率较大的通信系统，如深空激光通信系统和对潜激光通信系统。

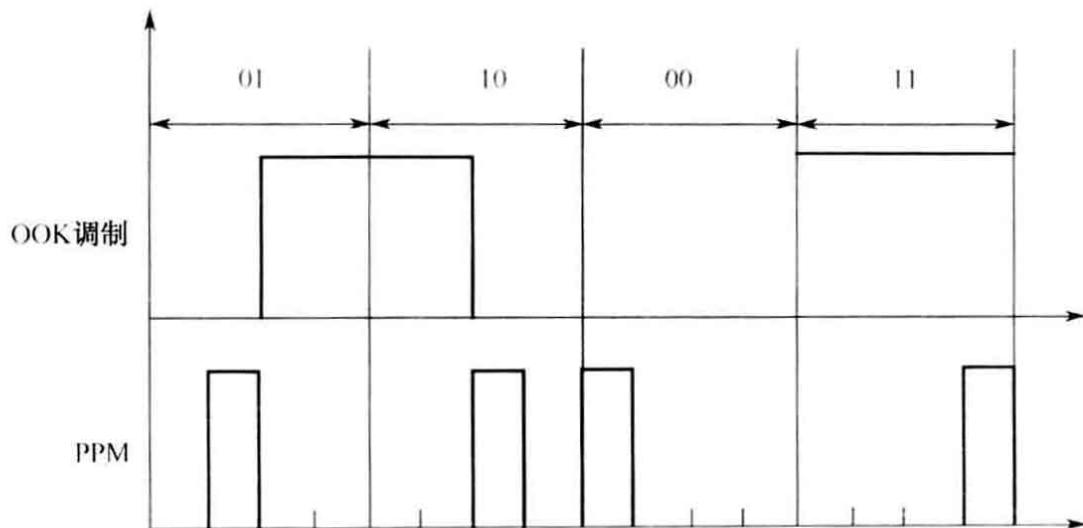


图 6.2 OOK 调制与 PPM 的对应关系

6.3 数字脉冲间隔调制 (PIM)

PIM 调制就是在两个高电平之间插入不同低电平的数量来实现不同信息的传输，其有点是传输信息量少，缺点是误码率很高。

图 6.3 给出了在几种调制方式下信息码字与传送码字的对应关系^[19]¹。图 6.4 显

信 息 码 字	OOK (NRZ)	4-PPM	4-DPPM	4-DPIM
00	00	1 000	1	10
01	01	0 100	01	100
10	10	0 010	001	1 000
11	11	0 001	0 001	10 000

图 6.3 信息码字与传送码字的对应关系

示三种调制方式的码字波形对比图。

¹ 王佳著. 光纤通信与空间光通信技术. 北京: 电子工业出版社, 2013.02.

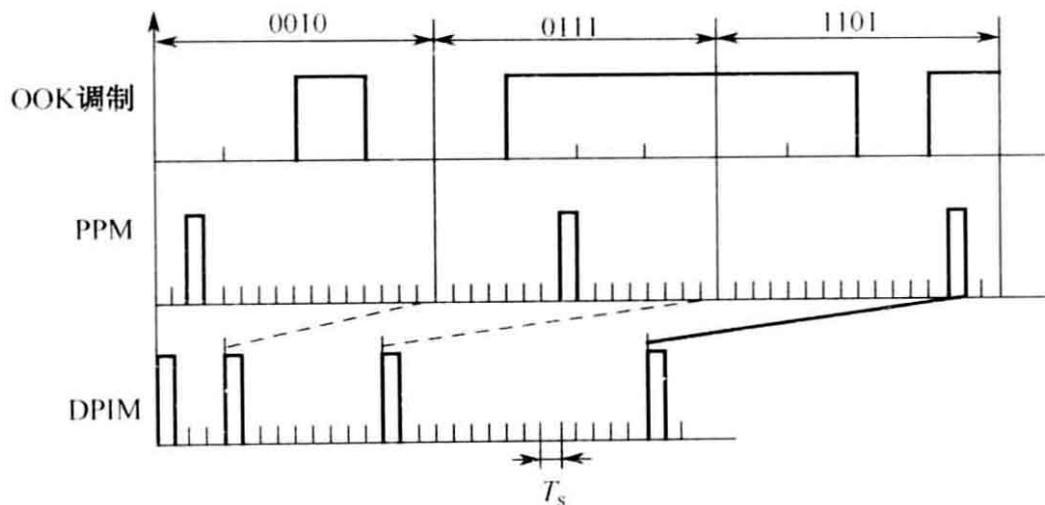


图 6.4 OOK (NRZ) 调制、PPM 和 DPIM 三种调制方式的码字波形图

6.4 几种调制方式的性能比较

6.4.1 发射功率

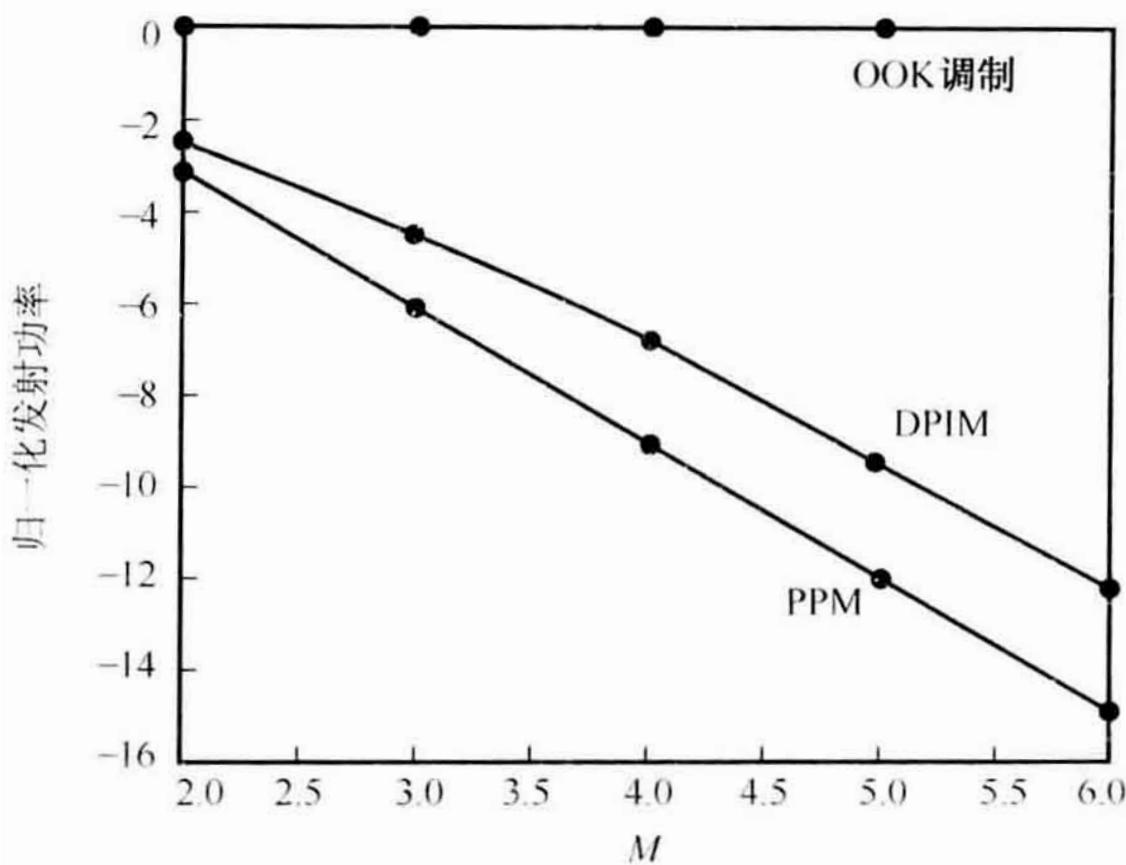


图 6.5 DPIM、PPM 与 OOK 调制的发射功率比较

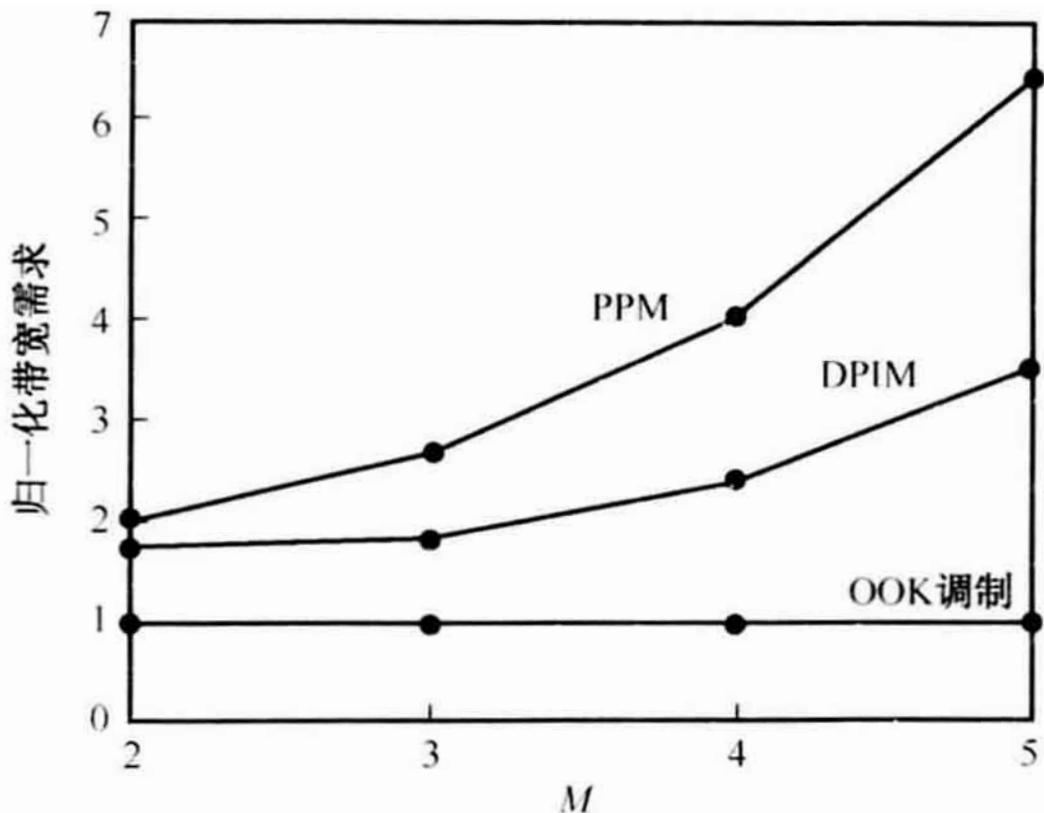


图 6.6 DPIM、PPM 与 OOK 调制的占用带宽比较

6.4.2 带宽

综上所述，OOK 调制实现电路简单，但误码率较高，通信带宽较低。PPM 可以用更小功实现 OOK 相同的数据传输速率，误码率较低，高速红外自由光通信、光纤通信等场合得到应用，它需要功率较低，需要时隙同步。

第 7 章 电路设计

本课题设计的电路要求如下，设计一个音频采集电路、音乐文件解码播放电路和单片机与 MEMS 逆向光调制电平匹配电路，如图 7.1。

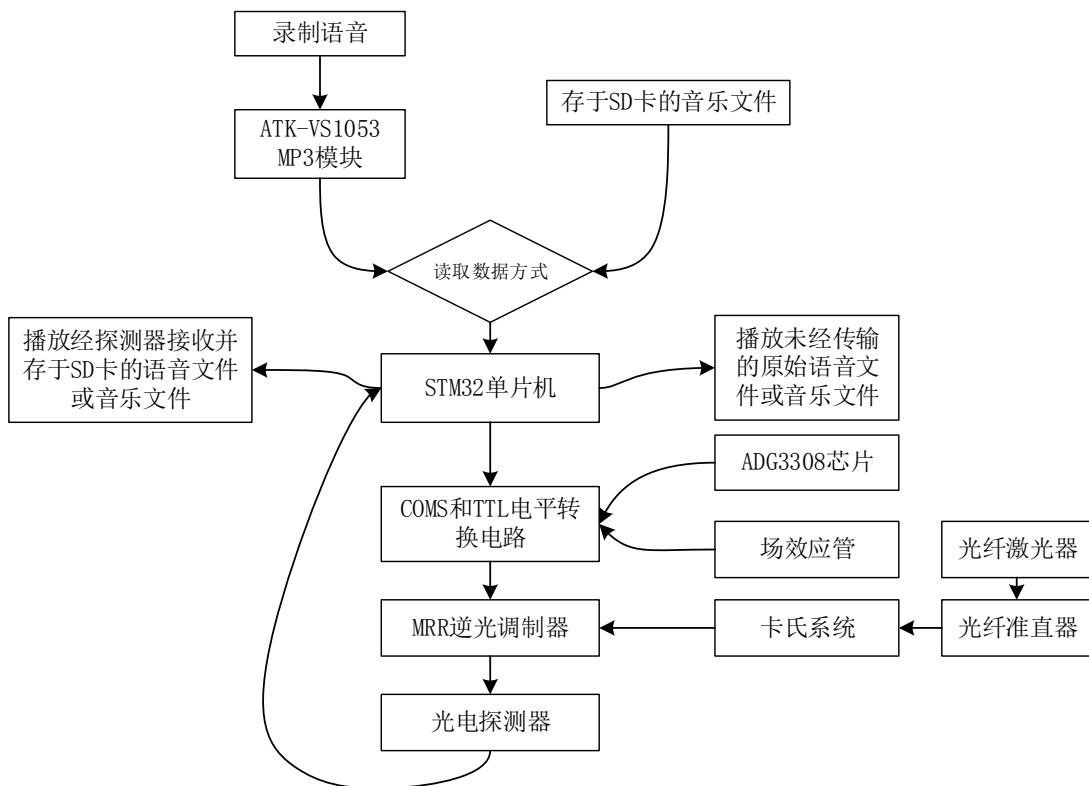


图 7.1 电路工作流程图

7.1 录音电路和音频解码

音频采集电路和音频解码电路采用的是正点原子公司推出的以 VS1053 为核心的 MP3 音频解码模块，支持大多数常用的音频播放格式，支持对语音进行录制，经过模块编码之后，以 WAV 文件格式存储于 SD 卡中，方便后续 STM32 进行读取，经电平匹配电路，然后传送至 MEMS 调制器进行信息的发送。STM32 单片机通过 SPI 协议即可控制该模块，兼容 5V 或 3.3V。

STM32F103 中的音频编解码芯片的原理图如图 /refMEDIA-DECODER.pdf 所示。

VS1053 是一颗单片 OGG/MP3/AAC/WMA/MIDI 音频解码器，通过加载官网中的补丁文件就可以实现 FLAC 的解码、OGG 编码。这样我们可以通过麦克风录制语

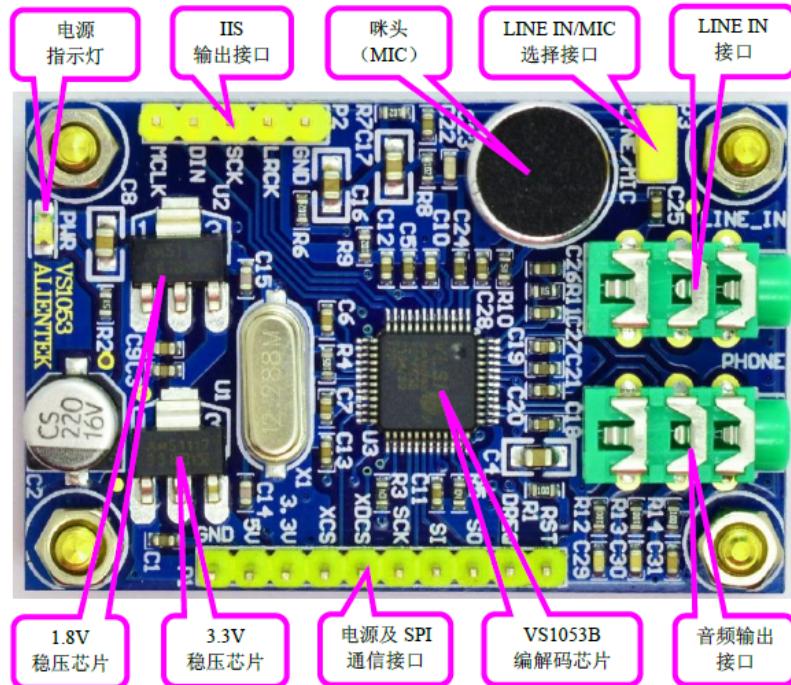


图 7.2 ATK-VS1053 MP3 模块资源图

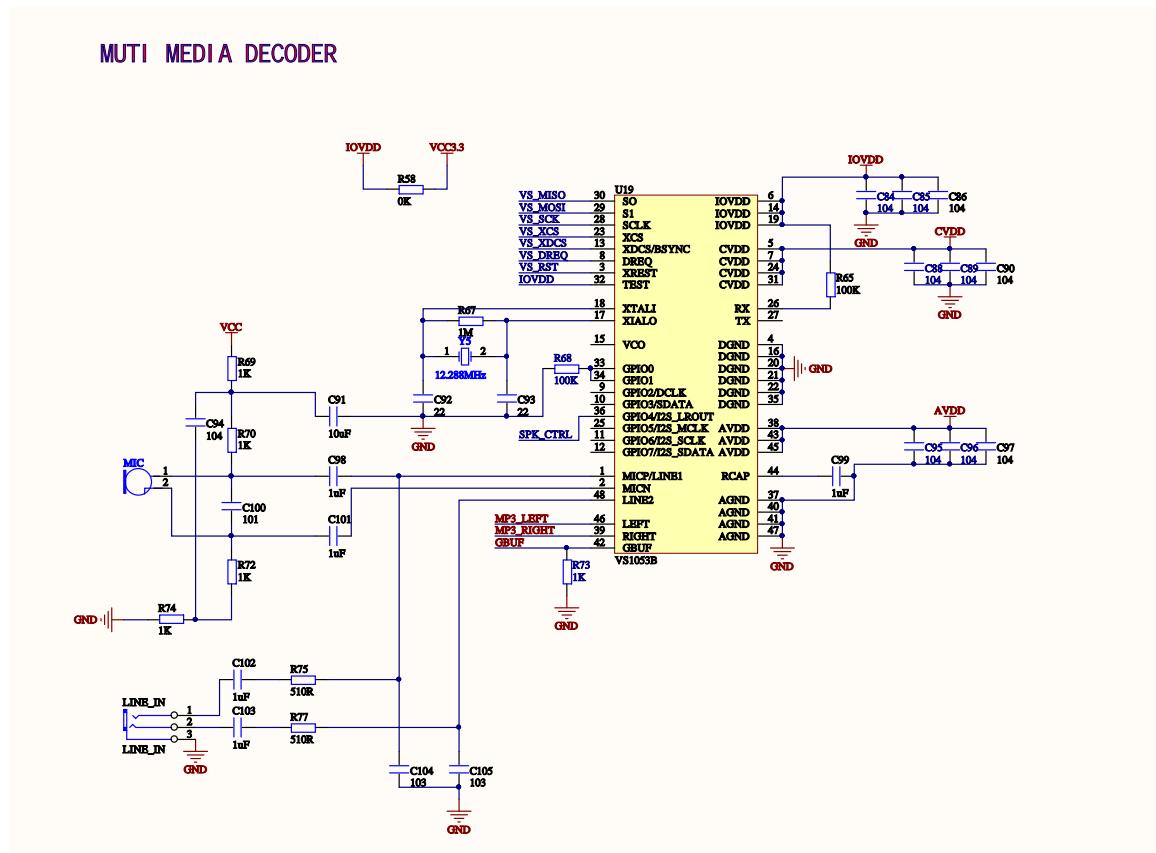


图 7.3 MEDIA DECODER

音，经该芯片编码之后，得到与音乐文件类似的格式存储于介质中，方便后续读取。相比它以前的产品，该芯片的音质上也有很大地提高，还可以设置空间效果，这样

我们可以录制完语音文件，直接接后面的功放电路驱动小喇叭播放，看语音效果如何，以便和经过激光传输后接收的语音信息播放效果对比。

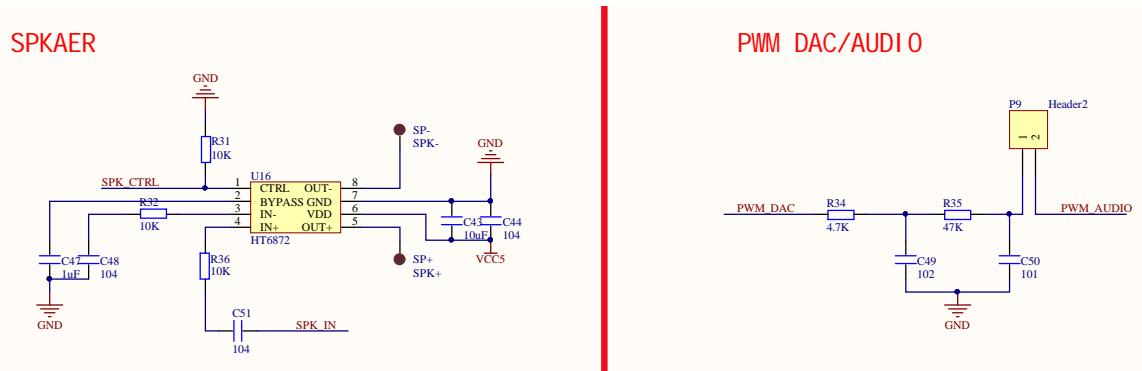


图 7.4 SPEAK 和 PWM DAC

如图

refSPEAK-PWMDAC.pdf 为采用型号为 HT6872 的 D 类音频功率放大器的电路设计，采用它来驱动板载喇叭。有了板载喇叭，我们就可以直接通过板载喇叭欣赏开发板播放的音乐或者其他音频了，更加人性化。图 7.5 是单片机与 VS1053 连接的典型应用电路。

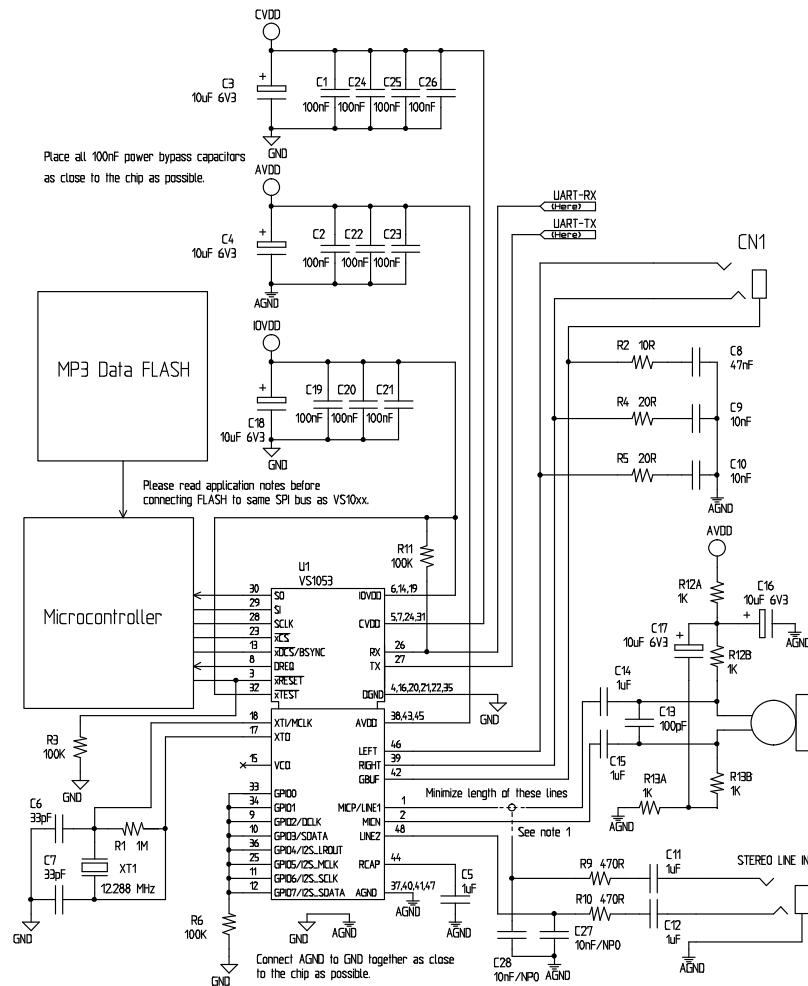


图 7.5 单片机和 VS1053 芯片典型连接电路

7.2 常用的逻辑电平介绍

从图 7.6第三列可以看出标准的 5V TTL 的电平标准，注意其输入和输出时，高低电平对应的电压是不同的。

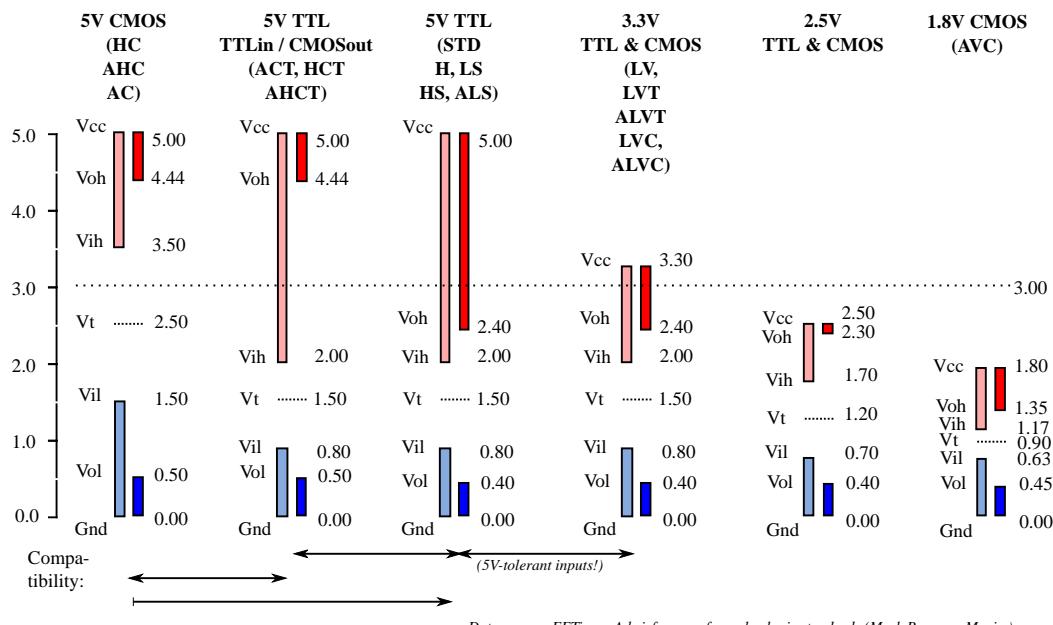


图 7.6 常用逻辑电平

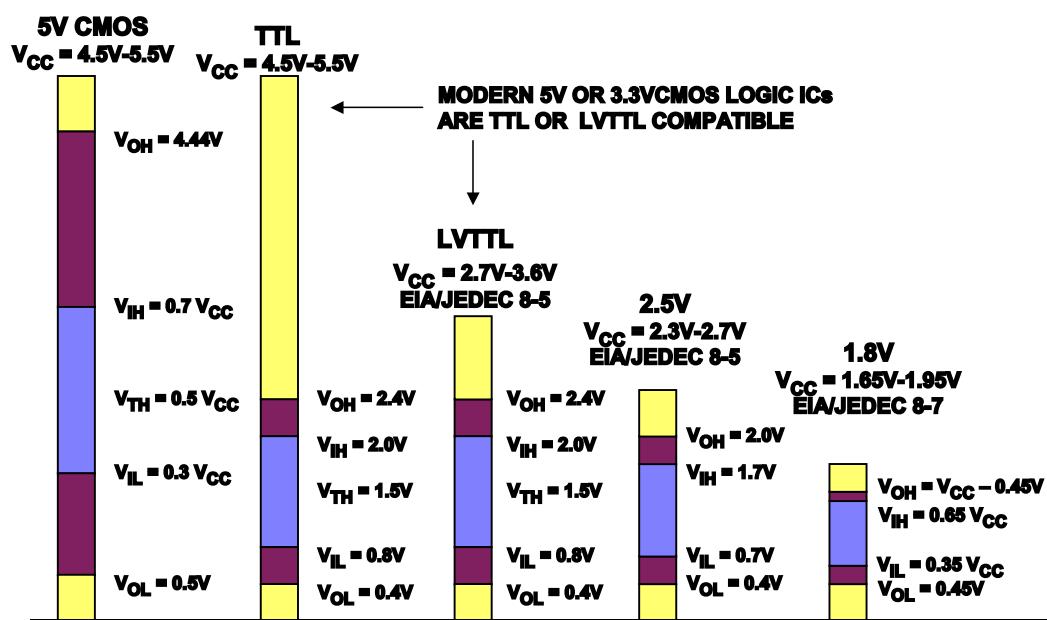


图 7.7 逻辑电平家族对比图

7.3 电平匹配电路

STM32F103ZET6 单片机的电平标准为 COMS 电平，大多数引脚支持 TTL 电平输入输出，但是为了安全起见，设置了 CMOS 和 TTL 电平信号双向转换电路，这里提供了两种方案用于电平转换。

7.3.1 方案一：使用集成电路芯片 ADG3308 实现

ADI 公司提供了一系列的电平转换器，这里我选择数据传送速率达 50Mbps 的 8 路电平转换器，型号为 ADG3308。

Part Number	Function	Specifications				Characterization Voltages (V_{DD})					Level Translation
		$R_{on, Typ}$ (Ω)	Propagation Delay Max (ps)	Bus Enable Typ (ns)	Data Rate (Mbps)	Single	Dual				
Bus Switches/Level Translators											
ADG3241	1-bit bidirectional	4.5	225	3.2	1500	•					Down
ADG3242	2-bit bidirectional	4.5	225	3.2	1500	•					Down
ADG3243	2-bit bidirectional	4.5	225	3.2	1500	•					Down
ADG3245	8-bit bidirectional	4.5	225	3.2	1244	•					Down
ADG3246	10-bit bidirectional	4.5	225	3.2	1244	•					Down
ADG3247	16-bit bidirectional	4.5	225	3.2	1244	•					Down
ADG3248	1-bit 2:1 bidirectional	4.5	225	3.2	1244	•					Down
ADG3257	4-bit 2:1 bidirectional	2	100	5	933	•					Down
Level Translators											
ADG3231	1-bit unidirectional	N/A	4000	N/A	4	•					Up/down
ADG3233	1-bit bypass unidirectional	N/A	3500			•					Up/down
ADG3123	8-bit CMOS to HV unidirectional	N/A	8000		0.2			•	•		Up
ADG3301	1-bit bidirectional	N/A	5000	1000	50	•					Up/down
ADG3304	4-bit bidirectional	N/A	5000	1000	50	•					Up/down
ADG3300	8-bit bidirectional	N/A	5000	1000	50	•					Up/down
ADG3308/ADG3308-1	8-bit bidirectional	N/A	5000	1000	50	•					Up/down

图 7.8 选自 ADI 电平转换芯片选型手册

图 ?? 是 ADG3308 芯片工作原理图。通过控制使能引脚 EN 可以实现三态操作，引脚 EN 高电平有效。需要注意的是，ADG3308 的供电范围是 $1.15V \leq V_{CCA} < V_{CCY}$ ；

FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM

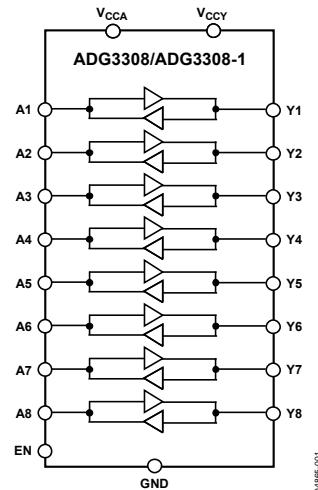


图 7.9 ADG3308 功能框图

$1.65V \leq V_{CC} \leq 5.5V$ 。

7.3.2 方案一：使用分立元件场效应管来实现（Multisim 软件仿真）

通过合理配置与场效应管搭配的电阻实现信号电平转换。
1. 未加载信号之前
2. 加载 5V 信号之后
3. 加载 3.3V 信号之后

电路原理图如图 ??

VOLTAGE_DUAL_TRANSFER

电平转换电路一：
适用于3.3V和5V电平信号的双向转换；
本模块已将引脚以排针引出，方便对外接线；
注意VCCY供电电压不小于VCCA。

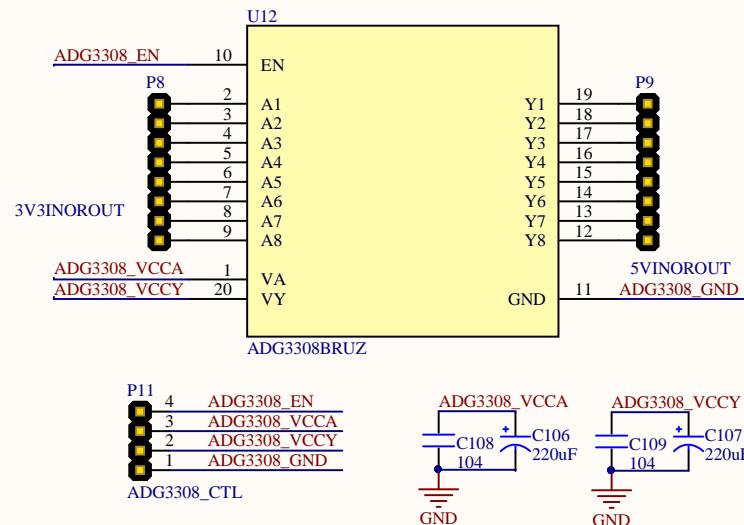


图 7.10 ADG3308 原理图

3.3V和5V电平双向转换仿真电路

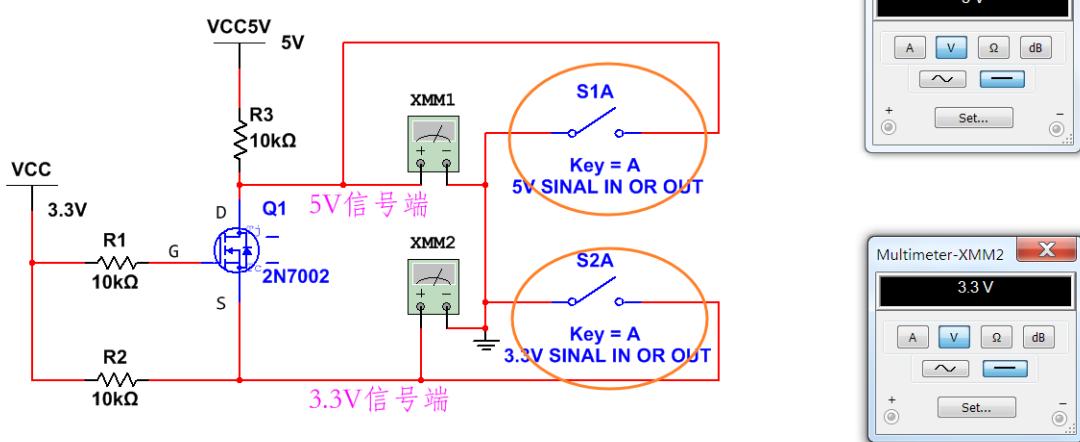


图 7.11 未加载信号之前

3.3V和5V电平双向转换仿真电路

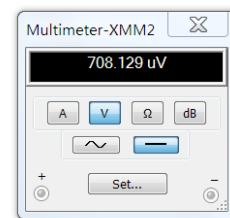
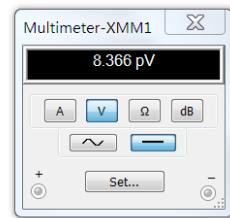
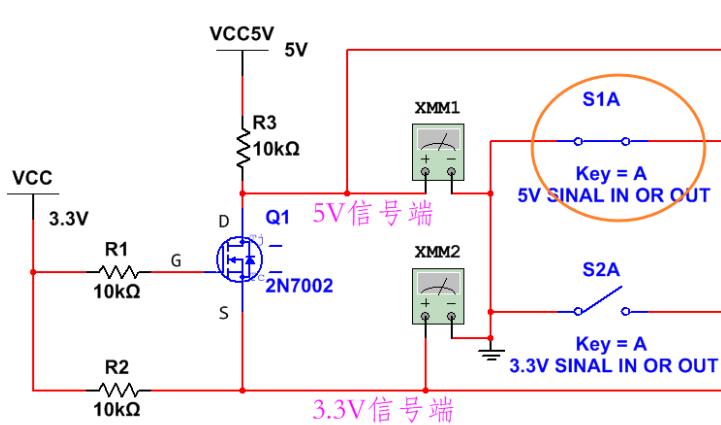


图 7.12 加载 5V 信号之后

3.3V和5V电平双向转换仿真电路

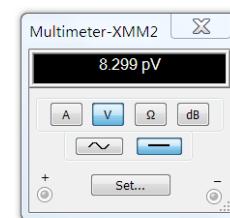
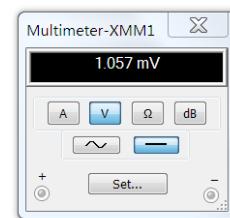
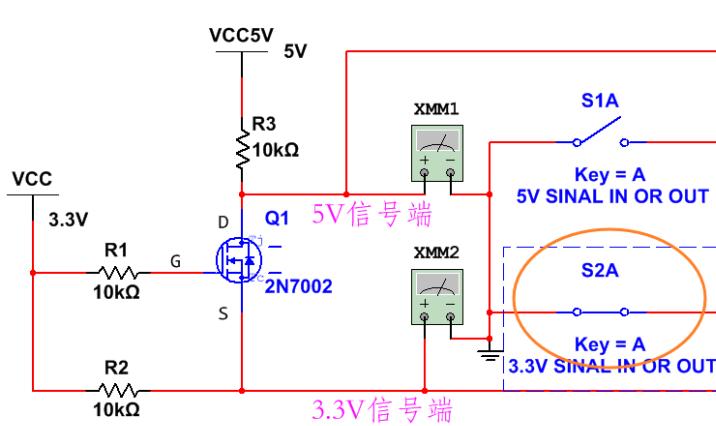


图 7.13 加载 3.3V 信号之后

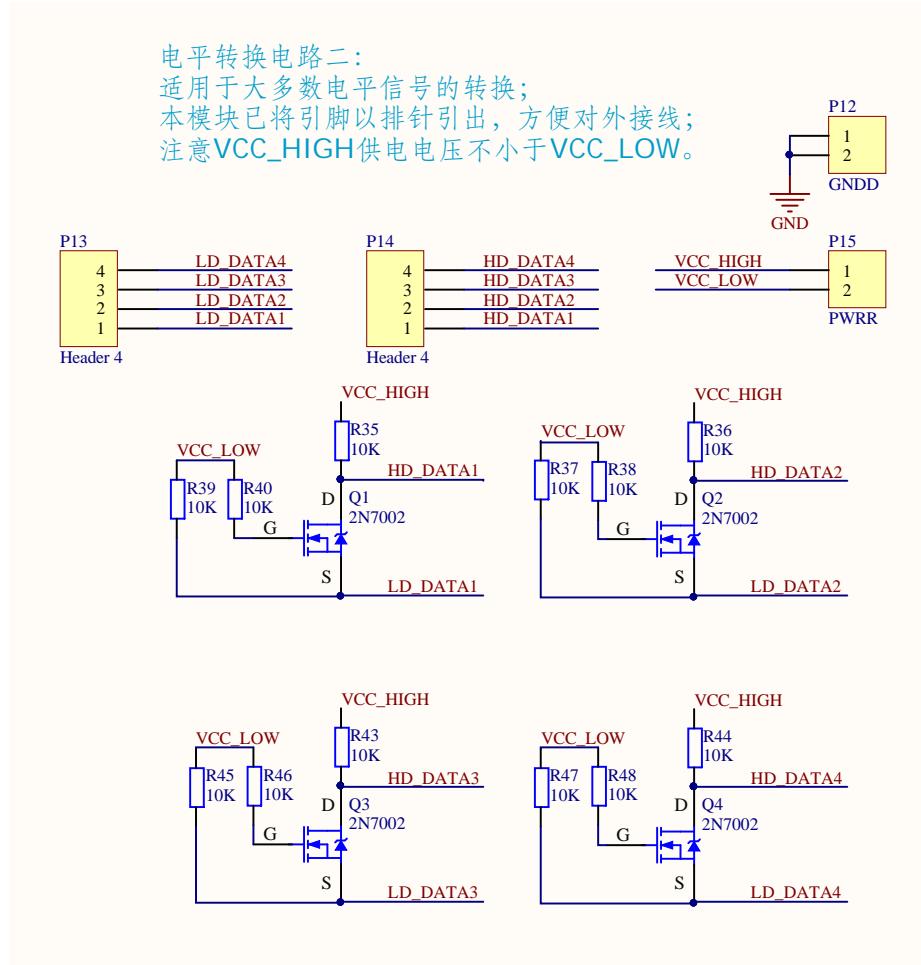


图 7.14 使用分立元件场效应管来实现的原理图

第8章 光机结构设计

这一章，我将介绍激光通信系统主动端的二自由度（俯仰轴和方位轴）回转平台的工作原理、光学基台是如何安装在俯仰回转平台上的、光学基台的组成和 MEMS 逆向光调制器的机械安装装置。

8.1 主动端二自由度回转平台组成



图 8.1 二自由度回转平台

主动端的回转平台共有两个自由度，一个是垂直于水平面的方位轴，另一个是平行于水平面的俯仰轴，如图 8.1 所示。

从回转平台的爆炸图可以看出，如图 8.2，方位控制和俯仰控制都采用直流力矩电机进行驱动，为了保证系统的抗干扰性和转向的准确，两个自由度上都采用了光栅进行角度测量，实时进行角度误差的校正，保证旋转的精度。

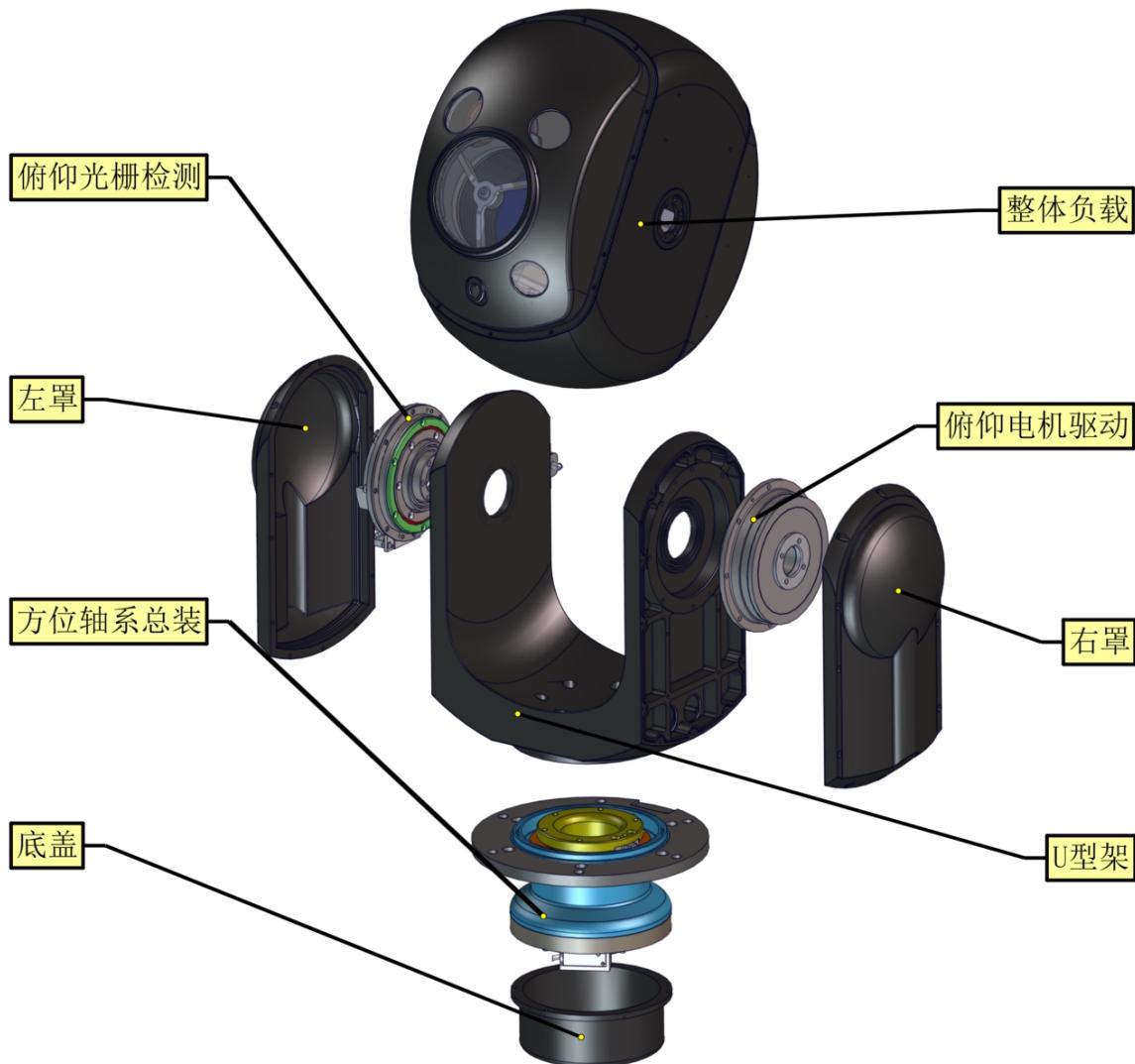


图 8.2 二自由度回转平台爆炸图

8.1.1 方位转台设计

方位转台设计采用了两个角接触轴承，将其安装在轴套里面，对 U 型架进行支撑。从图 8.3 可以看出由读数头和光栅组成的角度检测装置，对方位角进行实时的测量。

图 8.4 展示的是去掉 U 型架之后，方位轴总装的顶视图，图中有动静两个限位块对方位角进行限制，所以说主动端并不能 360° 的旋转，有一定的范围。

8.1.2 俯仰转台设计

俯仰方向也是采用直流力矩驱动电机作为动力源，也是两端分别采用两个角接触轴承进行支撑，将光学平台和前后罩组成的负载的重量传递给 U 型架，如图 8.5。

从图 8.6 可以看出俯仰轴也采用了光栅进行角度检测和都两个动静限位块组成的行程控制机构。

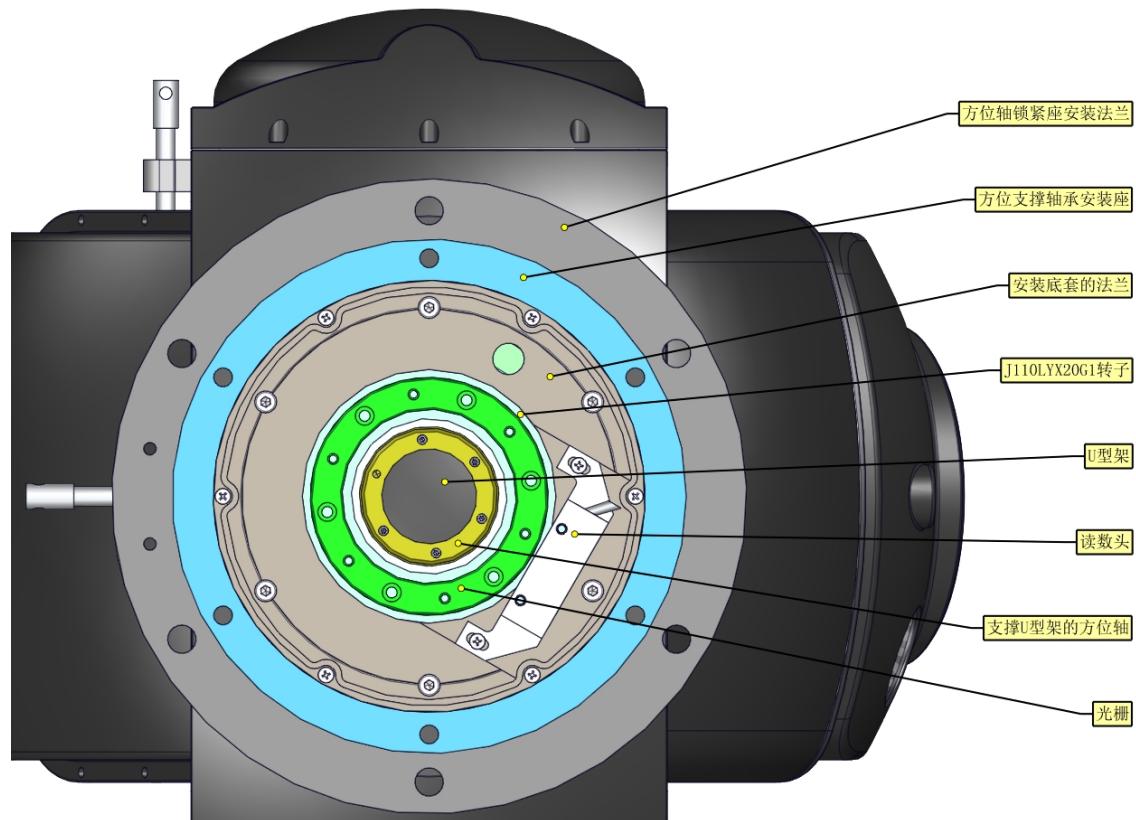


图 8.3 方位轴角度检测光栅

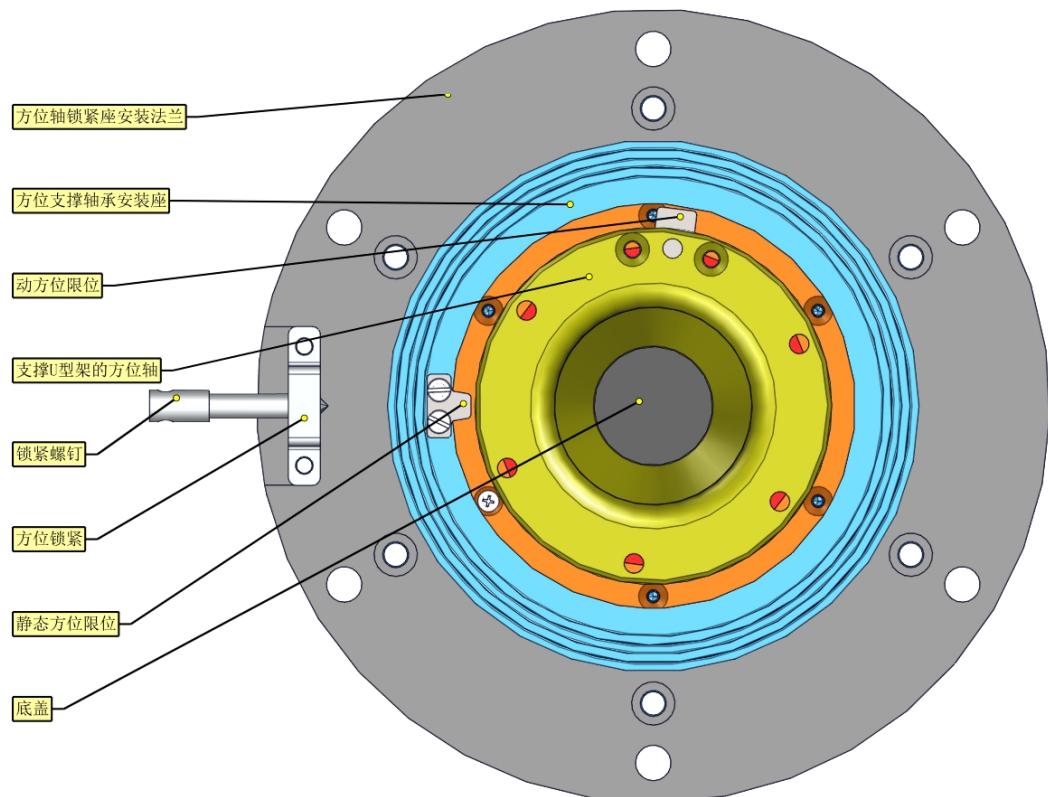


图 8.4 方位轴直流力矩驱动电机

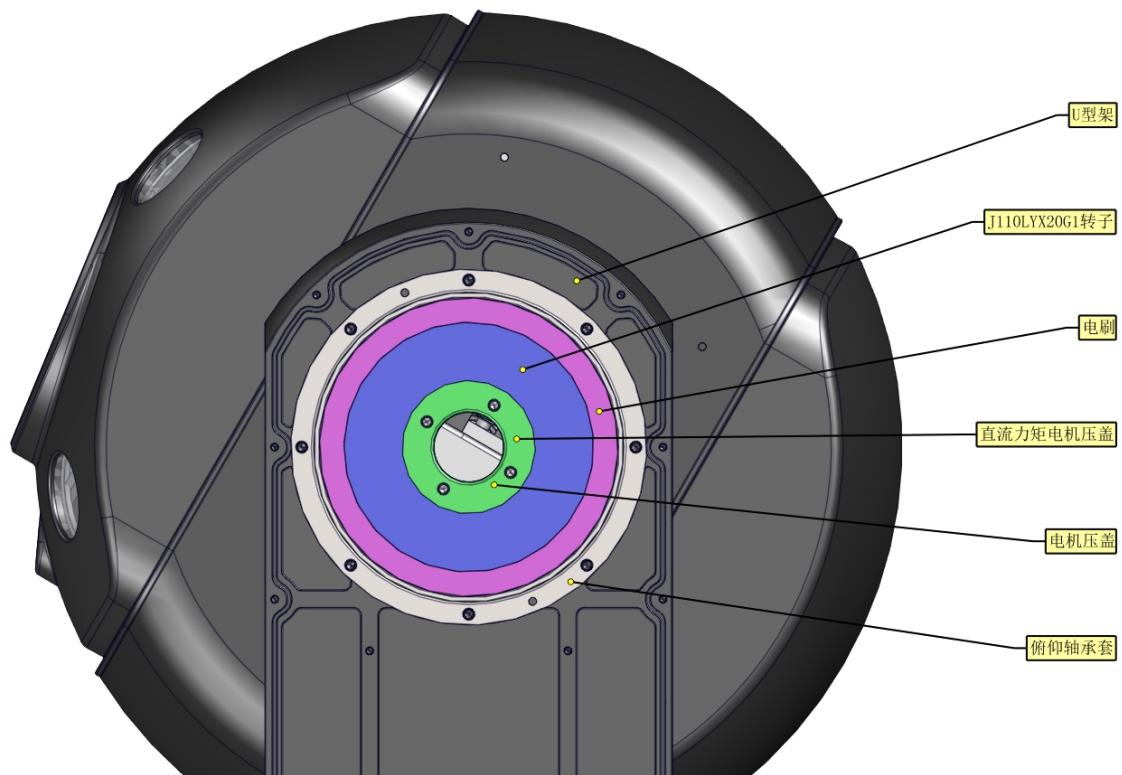


图 8.5 倾仰轴直流力矩驱动电机

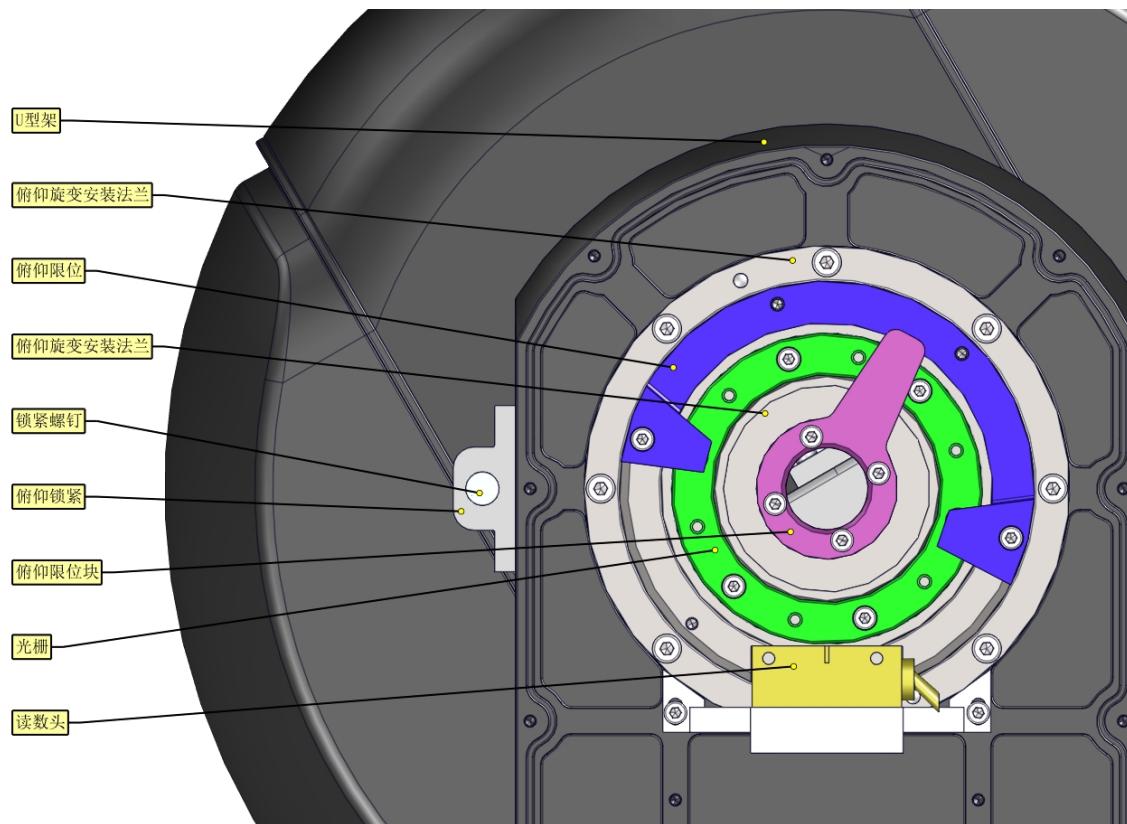


图 8.6 倾仰轴角度检测光栅

8.1.3 光学平台设计

光学平台作为逆向光通信系统的核心部分，对机械安装精度非常高，而且组成部分十分复杂，如图 8.7 和 8.8。

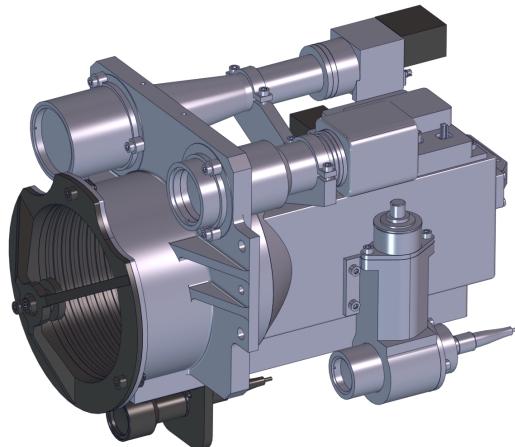


图 8.7 光学平台前视图

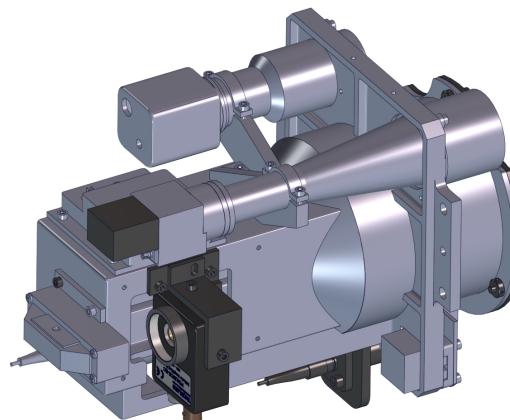


图 8.8 光学平台后视图

从图 8.9 可以看出，已调制信息的激光，经卡塞格林系统接收后，先经过光束整形光组，对光束进行压缩和近准直，减少能量的损失，最后经过棱镜转向后，光束到达光电探测器，完成信息的接收。

从图 8.10 可以看出，主动端的激光通信系统由询问激光发射器、信标光发射器、信标光接收器、靶标相机、卡塞格林系统、光束整形和转向光组和探测器组成。

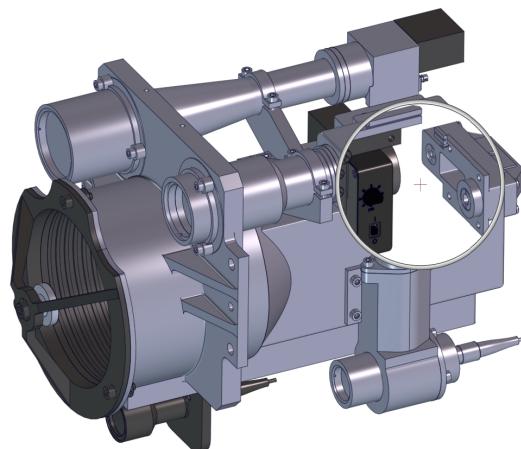


图 8.9 光学平台探测器安装位置

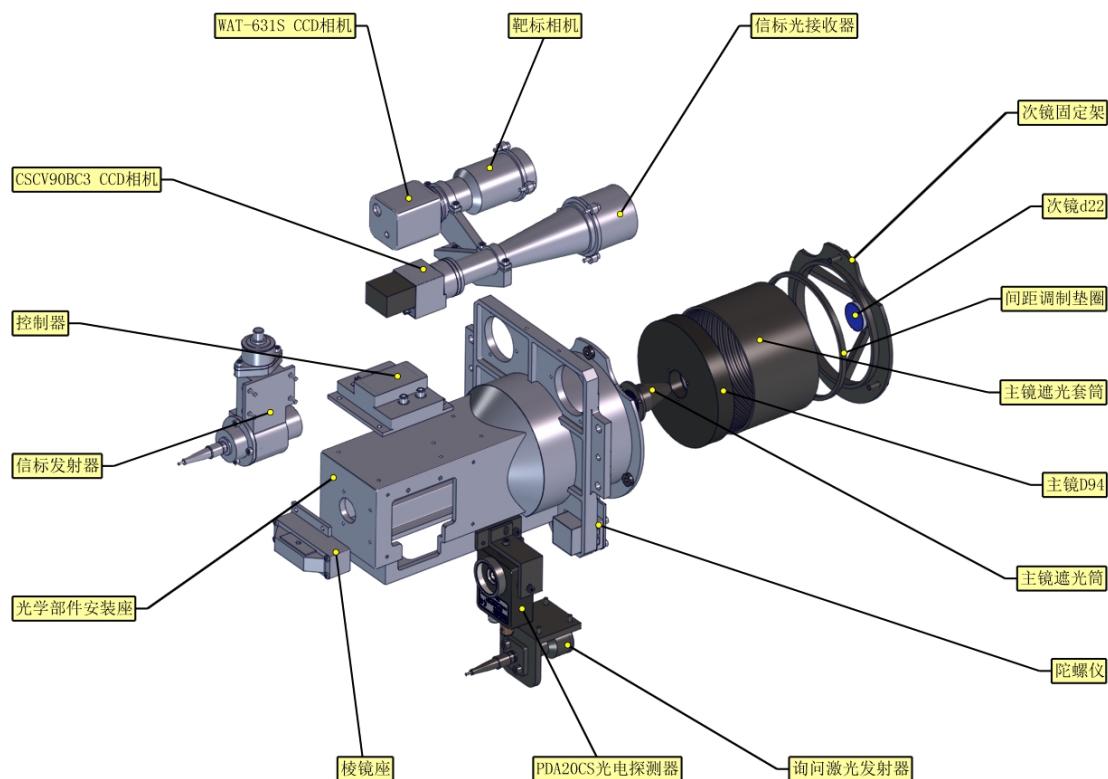


图 8.10 光学平台的爆炸视图

8.2 MEMS 逆向光调制器（角反棱镜式）机械结构设计

MEMS 调制器外形特别小。实际应用时除了有 MEMS 调制器外，还需要电源模块和电路控制模块等，所以需要设计额外的机械结构对调制器、电源模块和相应的电路模块进行固定，方便后续实际工程测试的时候能固定在轻小型平台上，所以设计了如图 8.11 的机械结构。

如图 8.12 为 MEMS 调制器机械固定结构的爆炸图，分别设计了 MRR 安装前盖

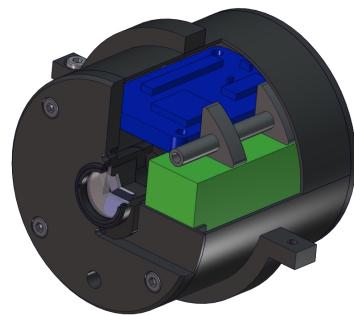


图 8.11 MEMS 调制器机械安装结构

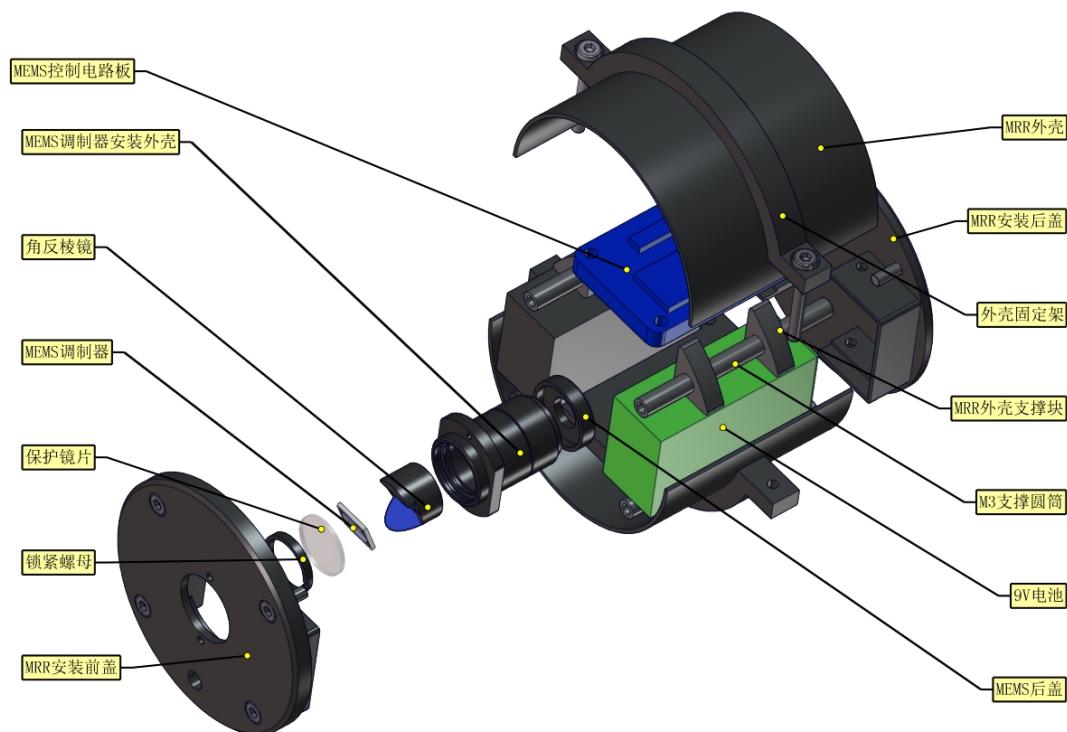


图 8.12 MEMS 调制器爆炸图

和后盖的模槽对 MEMS 调制器和电池组进行固定，然后电路板固定采用螺钉直接固定在 MRR 安装后盖上，然后在电池组上放置支撑块，对 MRR 外壳进行支撑，最后用外壳固定架固定即可。

第9章 成本预算

9.1 实验所需设备

本项目研究的课题是《基于 MEMS 逆向光通信系统设计》，主要用到的设备有

- 激光准直器
- 光纤激光器
- 主动端的激光通信系统
- MEMS 调制器
- 示波器
- 信号发生器
- 正点原子 STM32 战舰版单片机
- ALIENTEK VS1053 的 MP3 模块
- ST-Link 调试模块
- 4.3 寸 TFT 电容触摸屏
- 信号电平匹配芯片
- 若干分立元件（场效应管；电阻；电容；稳压二极管）

9.2 费用估算

现已将主要用到的设备列于下表 9.1，并标明了价格。

表 9.1 实验设备费用统计

设备	是否需要采购	采购的费用 (元)
激光准直器	否	0
光纤激光器	否	0
主动端的激光通信系统	否	0
MEMS 调制器	否	0
信号发生器	否	0
示波器	否	0
正点原子 STM32 战舰版单片机	是	348
ALIENTEK VS1053 的 MP3 模块	是	66
ST-Link 调试模块	是	55
4.3 寸 TFT 电容触摸屏	是	188
信号电平匹配芯片	是	2 × 14
若干分立元件	是	28
合计		713

参考文献

- [1] Honghui J, Hongwei Y, Hailiang Z, et al. Study on the heterodyning scattering of retroreflective free-space optical communication with optical heterodyning[J]. Journal of the Optical Society of America A Optics Image Science & Vision, 2013, 30(11):2286-2290.
- [2] 白帅, 王建宇, 张亮, 等. 空间光通信发展历程及趋势[J/OL]. 激光与光电子学进展, 2015(07): 7-20. DOI: [10.3788/LOP52.070001](https://doi.org/10.3788/LOP52.070001).
- [3] 姜会林, 安岩, 张雅琳, 等. 空间激光通信现状、发展趋势及关键技术分析[J]. 飞行器测控学报, 2015(03):207-217.
- [4] 李展, 彭仁军, 吴健, 等. 光学逆向调制技术[J]. 激光与光电子学进展, 2007(11):47-51.
- [5] 孙华燕, 张来线, 赵延伸, 等. 逆向调制自由空间激光通信技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(04):33-41.
- [6] 邱灏, 汪井源, 徐智勇, 等. 逆向调制光通信技术[J]. 军事通信技术, 2015, 36(02):29-33.
- [7] 李展. 大视场“猫眼”结构光学逆向调制器研究[D]. 电子科技大学.
- [8] 魏宾. 基于声换能器的“猫眼”逆向光调制技术及应用[D]. 电子科技大学.
- [9] 任建迎, 孙华燕, 张来线. “猫眼”逆向调制自由空间光通信技术[J]. 激光与红外, 2017, 47(01): 98-102.
- [10] 曾智龙, 黄海洋, 王侠, 等. 逆向调制空间激光通信技术研究进展[J]. 光通信技术, 2017, 41 (12):16-19.
- [11] 胡放荣, 熊显名. MEMS 空间光调制器的研究现状与发展趋势[J]. 半导体光电, 2010(05): 665-669+676.
- [12] 江伦, 胡源, 王超, 等. 一点对多点同时空间激光通信光学系统研究[J]. 光学学报, 2016(05): 37-43.
- [13] 张雅琳, 安岩, 姜会林, 等. 空间激光通信一点对多点光学原理与方法的比较研究[J]. 兵工学报, 2016, 37(1):165-171.
- [14] Jiang Huilin 姜会林, Hu Yuan 胡源, Ding Ying 丁莹, 等. Optical Principle Research of Space Laser Communication Network[J/OL]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(10):1006003. DOI: [10.3788/AOS201232.1006003](https://doi.org/10.3788/AOS201232.1006003).
- [15] Majumdar A K. Springer series in optical sciences: volume 186 Advanced free space optics (fso): A systems approach[M]. New York, NY: Springer, 2015.
- [16] Yao W t. Na mi guang tong xin ji shu yu ying yong[M]. Bei jing: Guo fang gong ye chu ban she, 2011.
- [17] Li L, Huang Y, Wang Y. Xian dai guang xue she ji fang fa: Modern optical design[M]. Di 2 ban ed. Beijing: Bei jing li gong da xue chu ban she, 2015.
- [18] Yoder P R. Optical science and engineering: volume 105 Opto-mechanical systems design[M]. 3. ed. ed. Bellingham, Wash. and Boca Raton: SPIE Press and CRC, Taylor & Francis, 2006.
- [19] 王佳. Xin hao yu xin xi chu li ji shu cong shu: 光纤通信与空间光通信技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2013.02.

致 谢

在本文的撰写过程中，孟立新老师作为我的指导老师，从论文选题到搜集资料，从开题报告、写初稿到反复修改，给予了我很多的帮助，给了提供了很多宝贵的建议。

在光机系统设计过程中，孟老师结合其自身的工程实践经验，对我设计的卡塞格林的光机系统从材料选择到结构优化提出很多修改建议，让我受益匪浅。

我通过这次课题《基于 MEMS 逆向光通信系统的设计》的研究和学习，了解并熟悉光机结构系统的设计流程，对激光通信有了更深的认识，对研究课题的方法步骤有深刻的体会和认识，在这次学习过程之后，无论是从理论知识（光学，光机设计，光通信），还是工程设计方面（Solidworks,Zemax,CAD,Altium designer），有了更深的领悟和体会。

感谢赵洪刚学长给我提供了很多帮助，在毕设中给我提供了很多阅读材料，使我能快速找到研究方向，并带领我初步做了实验，大致了解了实验流程，使我在后面资料收集中更得心应手，也给我解答了很多问题。

最后我十分感谢孟立新老师在毕业设计过程中，给予我极大的帮助，使我对整个毕设的思路有了总体的把握，孟老师很耐心的帮我解决了很多实际的问题，使我有了很大的收获，孟老师在整个设计过程中提出了很多建设性的建议，并给我解决了一些专业性问题。