

激光与光电子学进展

卫星激光通信快速反射镜研究进展及发展趋势

余子昊^{1,2}, 王栎皓¹, 汪洋¹, 刘艺晨¹, 武震宇^{1,2,3,4*}

¹中国科学院上海微系统与信息技术研究所传感技术国家重点实验室, 上海 200050;

²中国科学院大学, 北京 100049;

³上海微技术工业研究院, 上海 201800;

⁴上海大学微电子学院, 上海 200444

摘要 快速反射镜(FSM)具有响应快、精度高、分辨率高等优势,被广泛应用于卫星激光通信、激光武器、自适应光学成像、高精度激光瞄准等领域,是捕获、跟踪和瞄准(ATP)系统中的核心部件。本文介绍了ATP系统和FSM的工作原理,并从驱动方式、FSM的面形、工作带宽、扫描角度范围、控制精度、体积重量及功耗等性能指标及在卫星激光通信的应用等方面,详细介绍了国内外研究机构的多款FSM器件,从音圈电机、压电陶瓷和微机电系统(MEMS)三种驱动结构上对FSM进行了分类,并阐述了不同驱动结构FSM的工作方式及性能差异,分析了影响FSM在ATP系统中应用的关键参数,展望了FSM在激光通信中的关键技术,指出了高精度、数字化、小型化是FSM的发展趋势。

关键词 光通信; 卫星激光通信; 快速反射镜; 压电陶瓷; 音圈电机; 微机电系统

中图分类号 TN209

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP221610

Research Progress and Development Trend of Fast Steering Mirror for Satellite Laser Communication

Yu Zihao^{1,2}, Wang Lihao¹, Wang Yang¹, Liu Yichen¹, Wu Zhenyu^{1,2,3,4*}

¹State Key Laboratory of Transducer Technology, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³Shanghai Industrial μ Technology Research Institute, Shanghai 201800, China;

⁴School of Microelectronics, Shanghai University, Shanghai 200444, China

Abstract As a core component of the acquisition tracking and pointing (ATP) system, the fast steering mirror (FSM) is widely used in satellite laser communication, laser weapons, adaptive optics imaging, high-precision laser aiming, and other applications because of its fast response, high accuracy, and high resolution. This paper presents the working principles of the FSM and ATP system. Various FSM devices of global research institutions are reviewed based on several parameters, such as driving mode, FSM figure, working bandwidth, range of scan angle, control precision, volume, weight, power consumption, and applications in satellite laser communication. Three main classes of FSMs [the voice coil motor, piezoelectric ceramics, and micro-electro-mechanical system (MEMS)] are elaborated. The operating mode and performance difference of FSMs with different driving structures are described, and the critical parameters for applying FSM in the ATP system are analyzed. The key technologies of FSM in laser communication are prospected. It is concluded that high precision, digitalization, and miniaturization are the future trends of FSM.

Key words optical communication; satellite laser communication; fast steering mirror; piezoelectric ceramics; voice coil actuator; micro-electro-mechanical system

收稿日期: 2022-05-16; 修回日期: 2022-06-24; 录用日期: 2022-07-20; 网络首发日期: 2022-07-30

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB3202500)、中国科学院科研仪器设备研制项目(YJKYYQ20190026)、上海市产业协同创新项目(HCXBCY-2021-044)

通信作者: *zhenyu.wu@mail.sim.ac.cn

1 引 言

快速反射镜(FSM)作为光路发射端与接收端之间控制光束方向的精密光电仪器,集微小位移驱动技术、高精度小角度探测技术、先进控制理论等多种光、机、电技术于一身,具有响应快、分辨率高、精度高等突出优势,目前已广泛应用于空间激光望远镜、激光通信、图像稳定控制^[1-3]等多个领域。

卫星激光通信是指利用激光束作为载波在星间直接进行信息传输的一种技术。卫星激光通信基于卫星平台,结合了无线通信和光纤通信的优点,以激光为载波进行通信,具有抗干扰能力强、安全性高、通信速率高、波段选择灵活及信息容量大等优势^[4-6]。

卫星激光通信系统中的一个重要系统是捕获、跟踪和瞄准(ATP)系统^[7]。捕获即在不确定区域内对目标进行扫描和辨识,直至在视场内判断到目标光斑;跟踪则是在捕获的基础上,对目标光斑进行稳定的跟踪,克服星载平台的抖动和干扰,将视轴与光束夹角稳定在可接受的区间内;瞄准则是展开星间通信的必要条件,在可靠的跟踪过程中,不断修正发射视轴与跟踪视轴的偏差量,保证两个视轴的动态跟踪误差始终在对准精度的范围内,确保后续通信的稳定性。ATP系统通常由粗跟踪单元、精跟踪单元、控制驱动单元、粗跟踪传感器、精跟踪传感器、激光组件及通信终端组成。传感器通过探测激光组件的激光信号产生反馈信号并输入至控制驱动单元,控制驱动单元通过调节粗跟踪模块和精跟踪模块实现对激光信号的校准,当跟踪稳定且精度满足系统工作要求时,通信终端启动通信系统,建立通信链路,实现星间通信。

跟踪单元通常为一个大转角的惯性平台和小转角高精度的FSM模块组成。其中FSM模块通常承担精跟踪单元的主要工作,也是ATP系统的核心组件。在美国麻省理工学院的立方体卫星红外外交联任务中就使用微机电系统(MEMS)FSM模块对准精确指向系统的激光信号^[8],中国科学院长春光学精密机械与物理研究所为提高提供通信终端的定位精度,也将音圈电机FSM用于ATP系统的研究中^[9]。FSM模块主要由FSM、驱动电路、控制电路组成,而FSM则是FSM模块的核心部件,其跟踪瞄准精度和控制精度决定了整个通信链路的性能,直接决定了通信结果的可靠性和准确性^[8-10]。这对FSM模块提出了高精度、高分辨率、低延时、高带宽、强鲁棒性的要求^[11]。

2 FSM的原理及分类

2.1 FSM的工作原理

FSM主要由反射镜面、致动单元、支撑结构、角度传感器、驱动电路以及控制系统组成^[12-13]。以双轴FSM为例,其结构如图1所示,支撑结构、角度传感器、驱动电路等安装在底座上;致动单元与反射镜面相

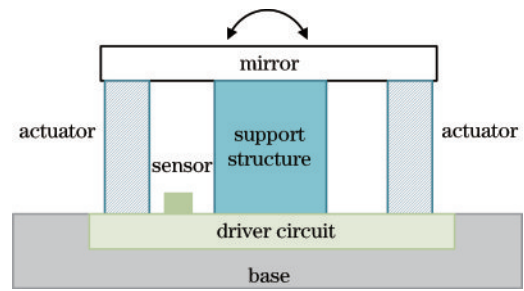


图1 FSM结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of fast steering mirror (FSM)

连,直接驱动反射镜面向两个方向旋转;角度传感器收集角度信号后反馈给控制系统并计算误差信号,控制器对误差信号进行计算并调整输出信号,可实现对FSM角度的闭环控制。

2.2 FSM的类型

FSM通常根据致动原理的不同分为压电陶瓷FSM和音圈电机FSM两类,近年来也出现了基于MEMS技术的FSM。

2.2.1 音圈电机FSM

音圈电机是利用通电导体在磁场中受到安培力的原理提供驱动力的一种致动元件,它具有行程大、驱动电压低、承载力强等特点^[14-17]。一方面,它的驱动电压较低,且输出力矩与输入电流成线性关系;另一方面,音圈电机的转子与定子间存在工作间隙,对振动、冲击等扰动的敏感度较低^[18],所以音圈电机FSM的可靠性和鲁棒性相对较强。但其工作频率较低,需结合机械结构和伺服控制系统优化,且对磁屏蔽要求更高。

2.2.2 压电陶瓷FSM

压电陶瓷是利用压电材料的逆压电效应产生的应力提供驱动力的一种致动元件,压电陶瓷FSM具有体积小、驱动力大、分辨率高、响应快等优点^[13,19-21]。而且可以配合压阻应变片等实现自身伸缩量的实时测量,符合FSM集成化、一体化的发展方向。但所需驱动电压较高,且压电陶瓷具有迟滞特性,需要复杂的驱动电路及算法进行补偿。此外,压电陶瓷行程小、抗冲击能力较弱,需要设计独特的结构增加其稳定性。

2.2.3 MEMS FSM

除了音圈电机和压电陶瓷外,在FSM集成化、小型化的发展趋势下,基于MEMS技术的FSM应运而生。MEMS FSM的致动方式有四种,分别是静电驱动、电热驱动、电磁驱动以及压电驱动。芯片化的MEMS FSM在质量、体积和功耗等方面均大幅减小,同时高集成度的MEMS FSM可进行低成本大批量生产。MEMS FSM结构设计灵活,可根据实际需求对设计参数进行相应调整。然而MEMS器件的特性导致MEMS FSM的镜面尺寸受到限制,同时MEMS FSM的高可靠气密封装也是目前亟待解决的关键问题。近几年,多家研究机构逐渐将MEMS FSM用于卫星激光通信的研究^[22-24]。

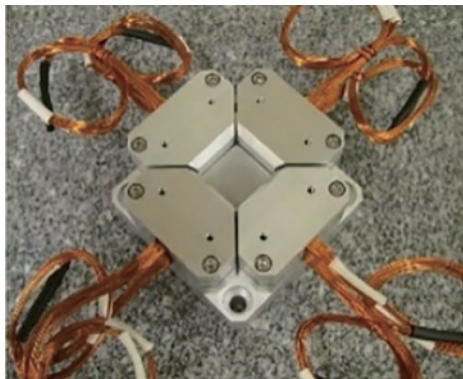
3 国内外FSM研究现状

关于FSM的研究起源于20世纪80—90年代,经过多年发展,各研究机构已经研制出各种不同驱动方式的FSM。以下介绍国内外近年来的研究进展。

3.1 音圈电机FSM

3.1.1 美国麻省理工学院林肯实验室

2012年,美国麻省理工学院林肯实验室报道了



一种双轴反射镜(HBSM)^[25],其结构示意图如图2所示。从此前的一项火星激光通信演示的项目中得到经验,采用音圈电机驱动,其采用了小型先进快速反射镜(sAFSM)设计,减小了器件尺寸,镜面直径为20 mm,利用模拟方法进行控制,转角范围可达 ± 10 mrad,采用磁通转向驱动,显著提高了响应速度,闭环带宽能达到10 kHz,角分辨率能达到 $0.87 \mu\text{rad}$,阶跃响应过渡时间为400 ms。

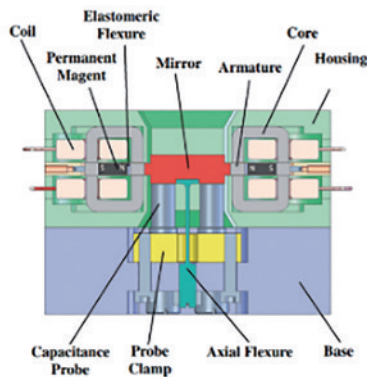


图2 HBSM结构示意图^[25]

Fig. 2 Structure diagram of high-bandwidth two-axis steering mirror (HBSM)^[25]

3.1.2 荷兰TNO公司

2017年,荷兰TNO公司报道了一款用于激光通信的高带宽小型FSM^[26],如图3所示。该FSM采用音圈电机驱动,整体尺寸为直径25 mm、高27 mm的圆

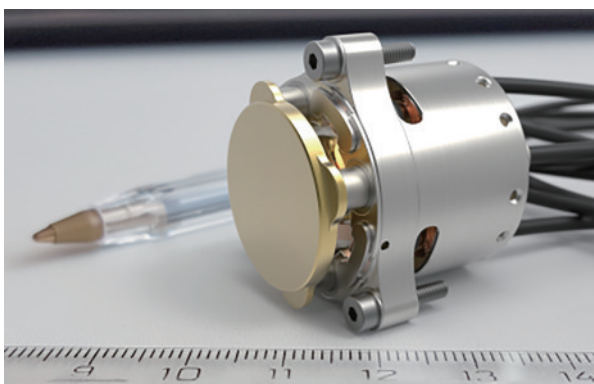


图3 TNO FSM实物图^[26]

Fig. 3 Physical diagram of TNO FSM^[26]

柱,通过两条柔性铰链正交控制两轴旋转,镜面直径20 mm,转角范围可达 $\pm 2^\circ$,重复定位精度小于 $1 \mu\text{rad}$,工作带宽为1 kHz。该FSM的设计目标是用于卫星激光通信,其小尺寸和几十毫瓦的低功耗有力地支撑了设计目标,并能实现高效的数据传输。

3.1.3 德国PI公司

20世纪90年代以来,德国PI公司的快速偏摆镜已被应用于各种地面项目和太空任务,例如,PI光束稳定系统正被用于美国宇航局与欧空局的合作项目的太阳轨道器中^[27]。2021年,PI公司发布了一款FSM产品V-931.01^[28],其结构如图4所示。该产品采用音圈电机驱动,采用紧凑型设计,整体尺寸为 $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 26 \text{ mm}$ 的长方体,通过两条柔性铰链正交控制两轴旋转,镜面直径为25.4 mm,搭配推荐控制器使用时转角范围可达 ± 35 mrad,闭环带宽为75 Hz,角分辨率能达到 $1 \mu\text{rad}$,重复定位精度为 $\pm 2 \mu\text{rad}$,阶跃响应过渡时间为20 ms,空载谐振频率为29 Hz。

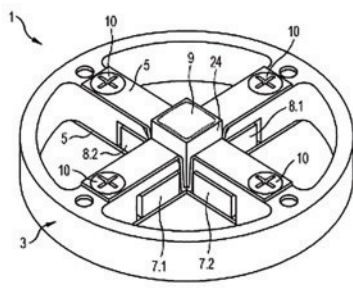
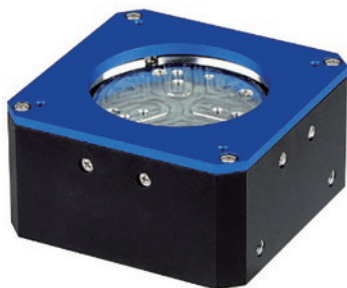


图4 V-931.01结构示意图^[28]

Fig. 4 Structure diagram of V-931.01^[28]

3.1.4 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

2021年,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所报道了一种模拟控制FSM^[29],其结构如图5所示。其采用音圈电机驱动,整体尺寸为57 mm×57 mm×63 mm的长方体,质量为470 g。镜面直径为50.8 mm,为提高激光通信系统跟踪精度和系统集成度,其采用模拟比例积分微分(PID)控制,转角范围可达±26 mrad,角分辨率能达到1 μrad,重复定位精度为±3 μrad,闭环带宽为300 Hz。

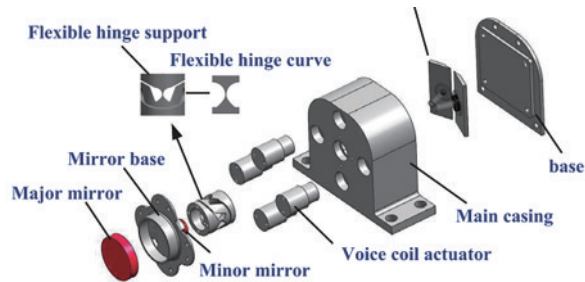


图5 模拟控制FSM结构示意图^[29]

Fig. 5 Structure diagram of simulation control FSM^[29]

3.2 压电陶瓷FSM

3.2.1 法国CEDRAT公司

2016年,法国CEDRAT公司发布了一款FSM平台PAM30^[30],如图6所示。该产品使用DTT60S-SG型号的FSM,该型号FSM采用压电陶瓷驱动,驱动器整体尺寸为63 mm×62 mm×40 mm的长方体,质量为130 g。内部包括应变片、定位传感器及其内置的调节器电路板,镜面直径为27 mm,转角范围为绕x轴±2.1 mrad、绕y轴±1.5 mrad。角分辨率能达到400 nrad,重复定位精度为±70 μrad,负载谐振频率为2 kHz。PAM30 FSM平台的定位精度非常高,但其y轴转角较小会缩小扫描范围,需要位移台进行配合,该平台计划用于美国国家航空和航天局(NASA)的Psyche任务中^[30]。

3.2.2 德国PI公司

压电陶瓷FSM较音圈电机FSM可提供更高的分辨率和带宽,PI公司除了音圈电机FSM外,针对卫星

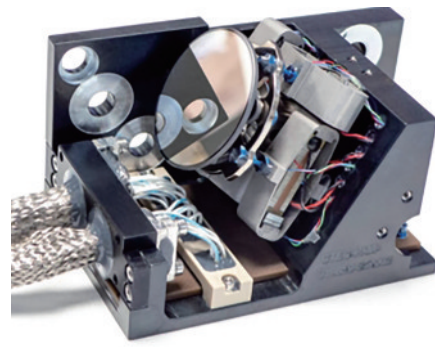


图6 PAM30压电FSM平台^[30]

Fig. 6 PAM30 piezoelectric FSM's platform^[30]

激光通信,还开发了压电陶瓷偏摆台^[27]。S3系列产品采用PICMA压电陶瓷驱动,整体结构为圆柱或棱柱^[31],如图7所示。其长宽为25~59 mm不等,高为42~96 mm不等,质量为65~700 g不等。采用柔性铰链导向,镜面直径为19~50 mm不等,搭配推荐控制器使用时转角范围为±2~±17 mrad,开环角分辨率最低能达到0.02 μrad,闭环角分辨率最低能达到0.05 μrad,重复定位精度最低能达到±0.06 μrad,闭环带宽最高能达到300 Hz,空载谐振频率最大能达到2.4 kHz。

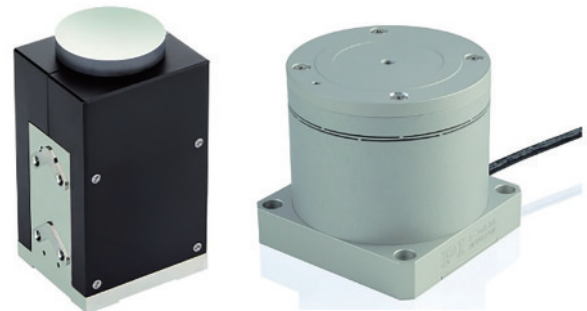


图7 S3系列压电偏摆台^[31]

Fig. 7 S3 series piezoelectric pendulum^[31]

3.2.3 西安交通大学

2016年,西安交通大学报道了一种新型压电FSM^[32],如图8所示。其采用压电陶瓷驱动,外形尺寸为小于65 mm×65 mm×60 mm的柱状结构,质量小于

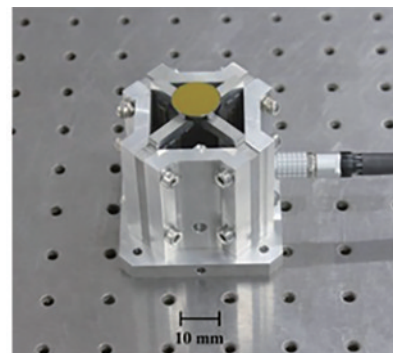
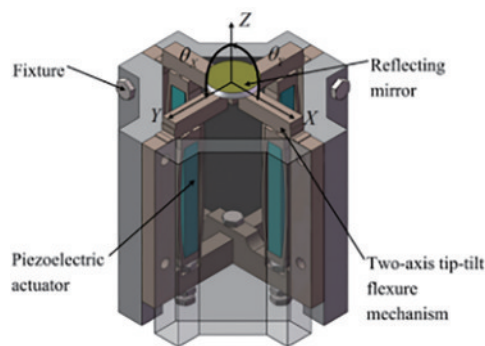


图8 FSM结构模型(左)和实物图(右)^[32]

Fig. 8 FSM structural model (left) and physical diagram (right)^[32]

400 g, 镜面直径为 20 mm, 转角范围可达 ± 52 mrad。该设计采用了两个非均匀梁, 将压电驱动器有限的线性输出转换为更大的角度输出, 但也带来了更高的功耗。

3.2.4 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

2016 年, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所报道了一种大镜面 FSM^[33], 如图 9 所示。其采用压电陶瓷驱动, 镜面直径为 100 mm, 支撑结构为柔性铰链, 转角范围可达 ± 5 mrad, 重复定位精度为 ± 3 μ rad, 闭环带宽为 300 Hz, 谐振频率为 250 Hz。该设计用于大角度和长距离的通信链路, 大镜面可以提供更大的视场, 但系统体积较大, 对平台的载荷能力有所要求。

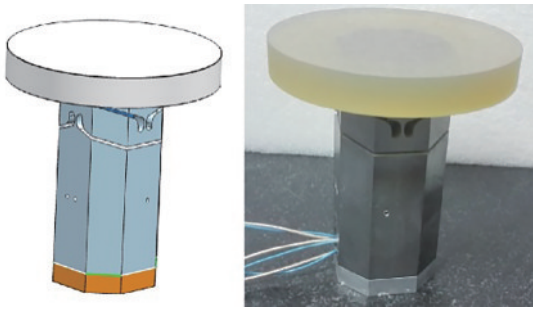


图 9 FSM 模块模型(左)和实物图(右)^[33]

Fig. 9 FSM system model (left) and physical diagram (right)^[33]

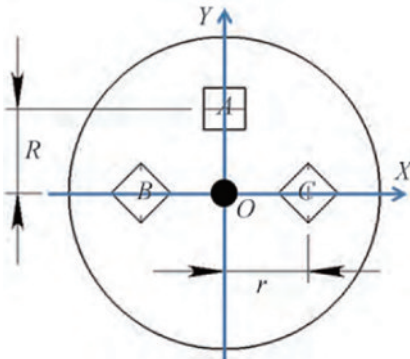


图 10 FSM 偏转几何示意图(左)^[34]和结构示意图(右)^[35]

Fig. 10 Deflection geometric graph (left)^[34] and structure diagram (right)^[35] of FSM

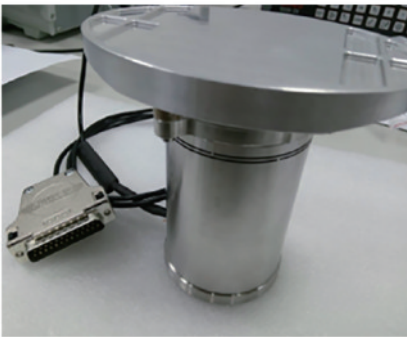


图 11 S34. T2S 结构示意图

Fig. 11 Structure diagram of S34. T2S

3.2.5 中国科学院上海技术物理研究所

2018 年, 中国科学院上海技术物理研究所报道了一种基于三点驱动的大口径 FSM^[34-35], 采用压电陶瓷驱动, 镜面为长轴 280 mm、短轴 90 mm 的椭圆镜面, 驱动器外形尺寸为直径 36 mm、高 7 mm 的圆柱, 转角范围绕短轴可达 ± 2.1 mrad, 绕长轴可达 ± 3 mrad, 重复定位精度为 ± 10 μ rad, 闭环带宽为 149 Hz。为配合椭圆形镜面, 设计了如图 10 所示的新式驱动结构, 将驱动器都放置于镜面的长轴和短轴位置, 该驱动减少了双轴耦合效应, 但也减小了短轴的偏转范围。

3.2.6 中国芯明天公司

中国芯明天公司推出了多款 FSM 产品, 其中 S34 系列也被用于卫星激光通信中的激光束对准中^[36], 其中的 S34. T2S 的结构如图 11 所示。该产品采用压电陶瓷驱动, 设计目标为航天应用中高可靠压电偏摆镜, 整体结构的圆柱直径为 59.5 mm, 长度为 56 mm, 质量为 400 g。镜面直径为 25 mm, 转角范围为 ± 1.25 mrad, 角分辨率能达到 0.02 μ rad, 重复定位精度能达到 ± 0.25 μ rad, 工作带宽为 250 Hz。芯明天公司^[37]与哈尔滨工业大学曾合作开展压电 FSM 的研究, 其压电偏摆镜系统跟随“海洋二号”卫星发射至太空并运转良好。

3.3 MEMS FSM

3.3.1 美国 Mirricle Technologies 公司

美国 Mirricle Technologies 公司多年致力于 MEMS 微镜器件的开发及产品化, 也进行了基于 FSM 产品的 ATP 系统的研究。该公司产品 A8L2.2^[38] (图 12) 被用于卫星激光通信的研发, 该产品采用静电驱动方式, 整体为长宽 7.25 mm \times 7.25 mm 的薄片, 包含镜面、梳齿致动器和电学引脚, 镜面直径为 3~5 mm, 转角范围可达 $\pm 5^\circ$, 阶跃响应过渡时间为 2.5 ms, 工作频率为 300 Hz。

2018 年, 美国斯坦福大学空间实验室使用 Mirricle Technologies 公司 A4SR8.3 型号的 FSM 搭建了星载跟踪收发系统^[23] (图 13), 实现了 MEMS FSM 在激光通信中对光信号的精确定位。同年, 美国

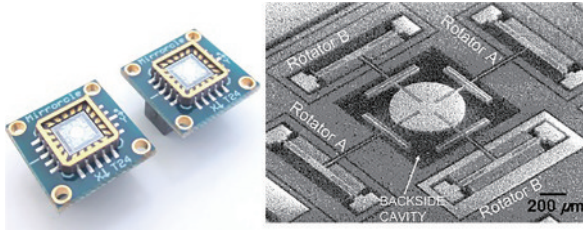


图 12 A8L2.2结构示意图^[38]
Fig. 12 Structure diagram of A8L2.2^[38]

麻省理工学院空间通信实验室使用 Mirrorcle Technologies 公司 A8L2.2 型号的 FSM 搭建了面向卫星激光通信的星载微型化系统(图 13),其闭环跟踪误

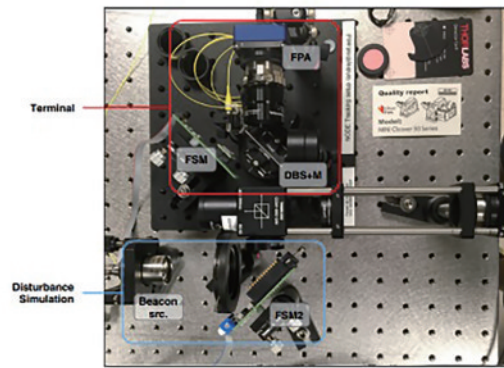
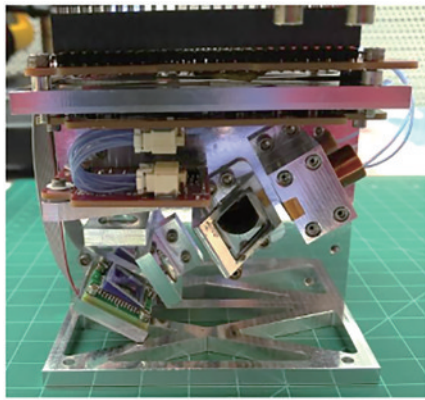


图 13 斯坦福大学(左)和麻省理工学院(右)的激光通信系统^[23]
Fig. 13 Laser communication systems of Stanford University (left) and Massachusetts Institute of Technology (right)^[23]

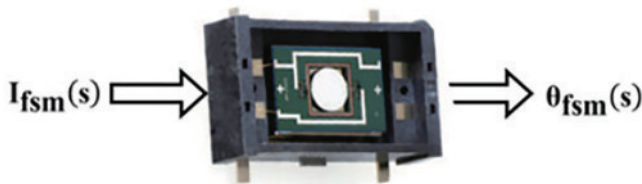


图 14 S12237-03P结构示意图^[22]
Fig. 14 Structure diagram of S12237-03P^[22]

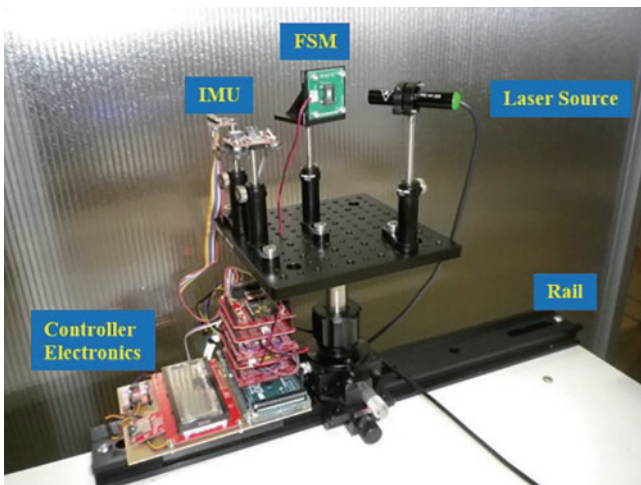


图 15 LaSEINE 实验室的激光通信系统^[22]
Fig. 15 Laser communication system of LaSEINE lab^[22]

差可以达到 $20 \mu\text{rad}$, 标准差为 $10.5 \mu\text{rad}$ ^[24]。

3.3.2 日本 Hamamatsu 公司

日本 Hamamatsu 公司是光和光电领域的龙头企业之一,近年来,Hamamatsu 公司也开发了一系列 MEMS 微振镜。其 S12237-03P 型号的反射镜被用于科学研究,该款产品整体尺寸为 $14.30 \text{ mm} \times 6.80 \text{ mm} \times 3.85 \text{ mm}$ 的长方体,镜面直径为 2.6 mm ,转角范围为 $\pm 15^\circ$,工作带宽为 100 Hz ,可以准静态模式工作。

2021 年,日本九州工业大学 LaSEINE 实验室基于滨松公司 S12237-03P 型号 MEMS FSM(图 14)搭建了星载激光通信平台^[22],如图 15 所示。

九州工业大学使用陀螺仪和加速度计构成的惯性测量单元(IMU)来提取反馈信号,设计的激光通信系统加入了外部的控制器,通过电学闭环反馈控制回路实现了对光信号的动态跟踪。

3.3.3 中国科学院上海微系统与信息技术研究所

2021 年,中国科学院上海微系统与信息技术研究所开发了一种片上集成角度传感器的芯片级 MEMS FSM,整体尺寸为 $25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$,包含镜面、MEMS 致动器和压阻式角度传感器,芯片质量小于 1 g ,气密封装模组质量小于 30 g 。镜面直径为 10 mm ,转角范围可达 $\pm 3.5 \text{ mrad}$,角分辨率为 $10 \mu\text{rad}$,谐振频率为 1 kHz 。闭环带宽可以达到 500 Hz ,开环状态下重复定位精度为 $\pm 5 \mu\text{rad}$,功耗小于 1 mW 。通过设计的电荷驱动电路对该 MEMS 压电 FSM 输入驱动信号,在开环状态下可扫描出的螺旋曲线如图 16 所示。

以上是近几年国内外主要用于卫星激光通信的 FSM 介绍,其主要参数总结于表 1。MEMS 工艺的特性决定了 MEMS FSM 的镜面直径普遍较小,故对光斑的发散角要求较高。其转角范围和闭环带宽较音圈电机 FSM 和压电陶瓷 FSM 并无太大劣势,并且 MEMS FSM 的质量和体积都较小,也被用于 ATP 系统的研究中,未来将会是卫星激光通信一个新的发展方向。

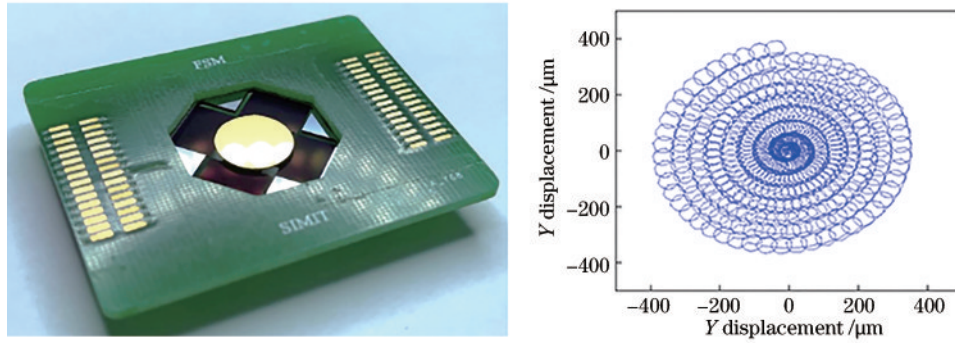


图 16 MEMS FSM 测试板实物图(左)和螺旋线扫描曲线(右)
Fig. 16 Photo of MEMS FSM test board (left) and scan curves in helix shape (right)

表 1 FSM 部分性能参数汇总
Table 1 Summary of FSMs' parameters

Company or research institution	Drive mode	Mirror diameter /mm	Angle range	Closed loop bandwidth /Hz
Lincoln Laboratory of Massachusetts Institute of Technology	Voice coil motor	20	± 10 mrad	10^4
TNO	Voice coil motor	20	$\pm 2^\circ$	10^3
Physik Instrumente	Voice coil motor	25.4	± 35 mrad	75
Beihang University	Voice coil motor	80	± 873 μ rad	—
Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences	Voice coil motor	50.8	± 26 mrad	300
CEDRAT	Piezoelectric ceramics	27	<i>x</i> axis ± 2.1 mrad, <i>y</i> axis ± 1.5 mrad	—
Physik Instrumente	Piezoelectric ceramics	<19	± 2 mrad	300
Xi'an Jiaotong University	Piezoelectric ceramics	20	± 52 mrad	—
Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences	Piezoelectric ceramics	100	± 5 mrad	300
Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences	Piezoelectric ceramics	Major axis 280, minor axis 90 elliptical	Major axis ± 3 mrad, minor axis ± 2.1 mrad	149
Harbin Core Tomorrow Science & Technology	Piezoelectric ceramics	25	± 1.25 mrad	250
Mirrorcle Technologies	MEMS	2.4	± 100 mrad	—
Hamamatsu	MEMS	2.6	$\pm 15^\circ$	100
Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences	MEMS	10	± 1.7 mrad	500

4 影响 FSM 应用的关键性能参数

ATP 系统的主要功能是快速捕获和精密跟踪。在两个具有相对运动的平台间实现对激光信号的高精度瞄准是实现卫星激光通信的前提和保障,故 ATP 系统是卫星激光通信的核心部分,也是卫星激光通信的技术难点。

ATP 系统有两种工作模式,分别是光斑捕获和光束跟踪^[39]。镜面轴向在初始位置时,需要对光斑进行开环捕获,主控系统根据引导信息驱动跟踪伺服转台,带动镜面整体转向,在不确定区域内沿预定轨迹完成扫描,直到成功捕获到目标光斑。捕获光斑后则进入

闭环跟踪工作模式。这时,利用角度传感器和位置传感器接收到的实际光斑误差,通过控制器精密调节 FSM 模块的旋转和位置,对光束进行精确的跟踪。

FSM 模块在捕获和跟踪状态下均参与 ATP 系统的工作。FSM 模块调节光路的工作原理如图 17 所示。其中光束不发生偏转时,FSM 镜面处于初始位置,此时入射光与镜面法线夹角为 45° ,出射光垂直于入射光射出。当光束偏转时,入射角发生变化,需要调整镜面,使出射光仍保持原方向射出,以保持稳定跟踪激光光束。

在卫星激光通信中,FSM 模块需搭载在卫星平台上,时时刻刻对光路进行调整,且平台存在较大幅度的

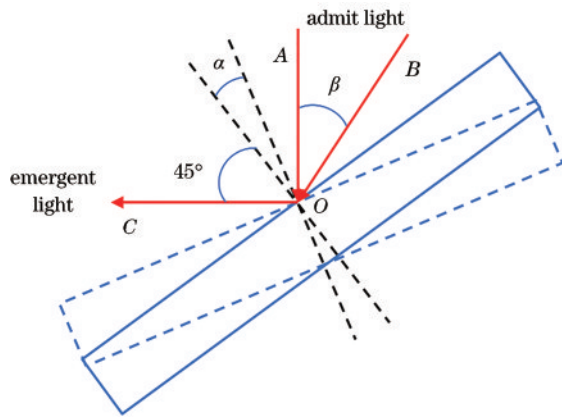


图 17 FSM 绕单轴转动时与光束的几何关系图

Fig. 17 Geometric relationship between FSM and beam when FSM rotates around a single axis

低频扰动,故需要 FSM 模块能够做到高工作频率和强可靠性。由于平台功率和载荷有限,FSM 模块的功耗和质量要尽可能小,以满足长期工作的需要。

4.1 反射镜面面形

镜面面形误差由均方根(RMS)值及峰谷(PV)值来评价,常用统计面形误差的方法有曲面拟合法和 Zernike 多项式拟合法。影响面形精度的原因主要包括镜面的机械固定和工作时的温度变化。传统快速反射镜的致动装置和镜面通常分别制备,再通过光学树脂等材料进行粘接,为了减少粘接处应力对面形的影响,镜面通常采用较厚的石英、碳化硅等衬底,并通过镜面背部的轻量化结构来减小镜面质量。而激光通信系统通常需要连续工作,当反射镜在激光长时间辐照下,镜片基体与薄膜吸收激光能量,导致温度不断升高,材料间的热失配导致镜面发生形变,一般通过增加镜面的反射率和减小镜面衬底的热阻来减小温度对面形的影响。

对于 1550 nm 的激光,通常将镜面面形控制在 $\lambda/20$ 以下来保证激光的高效传输,而在实际应用中,也需要考虑镜面高频扭转时的动态形变,并进行补偿和优化。

4.2 工作频率及过渡时间

在 FSM 系统中,过渡时间为 FSM 对输入信号的反应速度,即 FSM 在收到控制信号到稳定跟踪信号的时间。若只考虑驱动力矩和镜面转角,FSM 一般近似为二阶系统,其 98% 稳态的过渡时间为

$$t_s = \frac{4.4}{\zeta\omega}, \quad (1)$$

式中: ζ 为阻尼比; ω 为 FSM 的自然振荡频率; t_s 为阶跃响应的过渡时间,通常为毫秒量级。过渡时间指系统状态改变时,从一稳态值到达另一稳态值的动态调节时间,它决定了 FSM 系统的工作带宽^[40],一般来说,过渡时间越短,工作带宽就越高,FSM 的动态性能就越优越,是 FSM 系统的重要性能指标。

4.3 角度范围与控制精度

转角范围指 FSM 工作时所能转到的最大角度,从

应用角度考虑,转角范围必须能覆盖 ATP 系统捕获模式的扫描区间。一般来说,ATP 系统是 FSM 与一个大惯量的多维位移台组成的复合结构^[14],以同时保证大转角范围和高响应速度。

控制精度则决定了 FSM 对目标光斑的跟踪效果,控制精度主要指重复定位精度和动态调整速度。例如星载平台抖动,ATP 系统对目标光斑的跟踪产生偏移,需及时调整以修正误差信号,即 FSM 需要对控制输入信号做出响应,在极短的过程时间内调整姿态,达到新的稳态,重新完成对目标光斑的跟踪。该过程越短、对光斑误差捕获获得越精确,则控制精度越好^[14]。

以同为压电陶瓷驱动的中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的大镜面 FSM 和 PI 公司的 S-330 为例,前者的大镜面 FSM 的角度范围能达到 ± 5 mrad,重复定位精度为 ± 3 μ rad,而后者的 S-330 转角范围虽然只有 ± 2 mrad,但角重复定位精度能达到 ± 0.6 μ rad。一般来说,小镜面、角度范围小的 FSM 相较于大转角、大镜面的 FSM 而言,控制精度更高。

4.4 体积、重量与功耗

由于星载平台的载荷限制,FSM 模块的体积重量受到限制。无论是压电陶瓷驱动的 FSM 还是音圈电机驱动的 FSM,都是组装式的设计,上文提到的 PI 公司为例,其两款产品的体积都在 50~70 cm^3 之内。而 MEMS 工艺的 FSM 体积可以缩小到 5 cm^3 以下,且质量更轻,体积质量减小后,可以减轻载荷重量,提高系统的集成度,以增强 ATP 系统的扫描和跟踪能力。

功耗则是另一个影响携带能力的重要指标,音圈电机的功耗和压电陶瓷的功耗一般在瓦量级,MEMS 的功耗与具体的驱动结构有关,通常为微瓦至毫瓦量级。FSM 的功耗直接影响 ATP 系统的功耗,而低功耗能降低对燃料和电池的需求,增强 ATP 系统的可靠性,延长其使用寿命,更适合星载平台。

4.5 寿命及可靠性

在卫星激光通信中,星载平台需要长时间在轨道作业,由于远离地面,维护较为困难,故对 FSM 系统的可靠性要求极高,需要进行针对性研究^[41]。FSM 的工作环境主要为空间环境,其与地面环境的主要区别在真空度、辐射量以及温度^[42]。空间环境的真空度为 10^{-15} ~ 10^{-23} Pa,辐射剂量约为 1~2 krad/a,温度则会出现极冷与极热的情况,这对 FSM 的可靠性提出了高要求。

FSM 的可靠性通常由失效函数来确定,失效函数为

$$\lambda(t) = \frac{N_f}{T \cdot N_0}, \quad (2)$$

式中: N_f 为失效数; N_0 为测试样品数; T 为测试时间; $\lambda(t)$ 为平均失效率, $\lambda(t)$ 越小,FSM 的可靠性越好。

5 结 论

卫星激光通信技术经过不断发展,对小型化、集成化的 ATP 系统提出了高精度、快响应、大带宽的要求。为了顺应 ATP 系统的发展趋势,FSM 系统也朝着轻量化、集成化、数字化的方向发展。

在驱动方式上,音圈电机和压电陶瓷依旧是主流和首选,但 MEMS 作为一体化、集成化的技术也逐步用于 FSM 系统中。镜体、致动结构、传感器从零件化的组装逐步向着一体化的生产发展。激光通信的工作环境要求 ATP 系统具有强抗干扰能力,FSM 的控制系统也应采用更高运算速度的处理器,结合先进控制算法,以实现 FSM 系统更强的环境适应能力和更优秀的动态和静态性能。

参 考 文 献

- [1] Aoki K, Yanagita Y, Kuroda H, et al. Wide-range fine pointing mechanism for free-space laser communications [J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5160: 495-506.
- [2] Hafez M, Sidler T C, Salathé R P, et al. Design, simulations and experimental investigations of a compact single mirror tip/tilt laser scanner[J]. Mechatronics, 2000, 10(7): 741-760.
- [3] Shao B, Rong W B, Guo B, et al. Modeling and control of a novel piezoelectric actuated precision fast positioning system[J]. Smart Materials & Structures, 2008, 17(2): 025032.
- [4] 王天枢, 林鹏, 董芳, 等. 空间激光通信技术发展现状及展望[J]. 中国工程科学, 2020, 22(3): 92-99.
Wang T S, Lin P, Dong F, et al. Progress and prospect of space laser communication technology[J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(3): 92-99.
- [5] 徐森, 史浩东, 王超, 等. 空间目标多维度探测与激光通信一体化技术研究[J]. 中国激光, 2021, 48(12): 1206002.
Xu M, Shi H D, Wang C, et al. Technology for integrating space object multidimensional detection and laser communication[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(12): 1206002.
- [6] 白杨杨, 岑远遥, 孟立新, 等. 空间激光通信组网从光端机控制技术研究[J]. 光学学报, 2021, 41(14): 1406001.
Bai Y Y, Cen Y Y, Meng L X, et al. Control technology of slave optical transceiver in space laser communication network[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(14): 1406001.
- [7] Li Q, Liu L, Ma X F, et al. Development of multitarget acquisition, pointing, and tracking system for airborne laser communication[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(3): 1720-1729.
- [8] Zhang J L, Chen A H, Zhang W R, et al. Acquisition and tracking technology for space laser communication[J]. Aerospace China, 2020, 21(3): 13-21.
- [9] 倪迎雪. 空间激光通信 APT 系统中快速反射镜关键技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2018.
- [10] Ni Y X. The study of fast steering mirror in the acquisition, pointing and tracking system of the space laser communication[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2018.
- [11] Mohan S, Alvarez-Salazar O, Birnbaum K, et al. Pointing, acquisition, and tracking architecture tools for deep-space optical communications[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 8971: 89710H.
- [12] Heine F, Mühlwinkel G, Zech H, et al. LCT for the European data relay system: in orbit commissioning of the Alphasat and Sentinel 1A LCTs[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9354: 93540G.
- [13] 王震, 程雪岷. 快速反射镜研究现状及未来发展[J]. 应用光学, 2019, 40(3): 373-379.
Wang Z, Cheng X M. Research progress and development trend of fast steering mirror[J]. Journal of Applied Optics, 2019, 40(3): 373-379.
- [14] Han W W, Shao S B, Zhang S W, et al. Design and modeling of decoupled miniature fast steering mirror with ultrahigh precision[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022, 167: 108521.
- [15] 徐新行, 杨洪波, 王兵, 等. 快速反射镜关键技术研究[J]. 激光与红外, 2013, 43(10): 1095-1103.
Xu X H, Yang H B, Wang B, et al. Research on key technology of fast-steering mirror[J]. Laser & Infrared, 2013, 43(10): 1095-1103.
- [16] 张大卫, 冯晓梅. 音圈电机的技术原理[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2006, 27(3): 224-228.
Zhang D W, Feng X M. The technical principle of voice-coil actuator[J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2006, 27(3): 224-228.
- [17] Xu X H, Wang B, Han X D. Fast-steering mirror with self-aligning ball bearing supporting structure[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2012, 8418: 84180I.
- [18] 徐新行, 王兵, 韩旭东, 等. 音圈电机驱动的球面副支撑式快速控制反射镜设计[J]. 光学精密工程, 2011, 19(6): 1320-1326.
Xu X H, Wang B, Han X D, et al. Design of fast-steering mirror with spherical pair supporting structure driven by voice coil actuators[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(6): 1320-1326.
- [19] 方楚. 光束指向控制设备中快速反射镜系统设计研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2017.
Fang C. Design and research on fast steering mirror system used in beam steering control devices[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2017.
- [20] Csencsics E, Schlarp J, Schitter G. High-performance hybrid-reluctance-force-based tip/tilt system: design, control, and evaluation[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2018, 23(5): 2494-2502.
- [21] Shao S B, Tian Z, Song S Y, et al. Two-degrees-of-freedom piezo-driven fast steering mirror with cross-axis decoupling capability[J]. Review of Scientific Instruments, 2018, 89: 083101.

- 2018, 89(5): 055003.
- [21] Yun H, Liu L, Li Q, et al. Investigation on two-stage vibration suppression and precision pointing for space optical payloads[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2020, 96: 105543.
- [22] Ishola F, Cho M. Experimental study on photodiode array sensor aided MEMS fine steering mirror control for laser communication platforms[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 100197-100207.
- [23] Taylor M, Roychowdhury A, Maldonado S, et al. Polar Orbiting Infrared Tracking Receiver(POINTR)[C]//2019 IEEE Aerospace Conference, March 2-9, 2019, Big Sky, MT, USA. New York: IEEE Press, 2019.
- [24] Čierny O, Cahoy K L. On-orbit beam pointing calibration for nanosatellite laser communications[J]. *Optical Engineering*, 2018, 58(4): 041605.
- [25] Kluk D J, Boulet M T, Trumper D L. A high-bandwidth, high-precision, two-axis steering mirror with moving iron actuator[J]. *Mechatronics*, 2012, 22(3): 257-270.
- [26] Kuiper S, Crowcombe W, Human J, et al. High-bandwidth and compact fine steering mirror development for laser communications[EB/OL]. (2017-09-20) [2022-05-16]. <https://esmat.su/esmatpapers/pastpapers/pdfs/2017/kuiper.pdf>.
- [27] Physik Instrumente. Why fast steering mirrors are used in laser communication/free space optical communication[EB/OL]. [2022-04-17]. https://www.pi-china.cn/zh_cn/knowledge-center/blog/fast-steering-mirrors-for-deep-space/.
- [28] De B K. Method of controlling at least two interacting piezoelectric actuators: Germany, WO2021190953[P]. 2021-09-30.
- [29] 张兴亮, 王威, 吴佳彬. 激光通信系统中快速反射镜控制技术[J]. *半导体光电*, 2021, 42(2): 289-294, 300. Zhang X L, Wang W, Wu J B. Research on fast steering mirror control technology of laser communication system [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2021, 42(2): 289-294, 300.
- [30] Hugi S, Maillard T, Baillus A, et al. Fine steering mirror based on piezo actuators: a point ahead mechanism (PAM30) for deep space optical communication module of the psyche mission[J]. *Proceedings of SPIE*, 2021, 11852: 118525N.
- [31] Physik Instrumente. Piezo flexure tilting mirrors[EB/OL]. [2022-04-18]. https://www.pi-china.cn/zh_cn/products/nanopositioning-piezo-flexure-stages/piezo-flexure-tilting-mirrors/.
- [32] Jing Z J, Xu M L, Feng B. Modeling and optimization of a novel two-axis mirror-scanning mechanism driven by piezoelectric actuators[J]. *Smart Materials and Structures*, 2015, 24(2): 025002.
- [33] 付锦江. 基于椭圆弧柔性铰链支撑的高性能FSM优化设计[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2016. Fu J J. Design and optimization on high performance fast steering mirror with flexible platform composed by elliptical hinge[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2016.
- [34] 刘重飞. 大口径与大转角压电快速控制反射镜设计与研究[D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2018. Liu C F. Design and research on piezoelectric fast steering mirror with large aperture and deflection angle [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, 2018.
- [35] 刘重飞, 贾建军, 谢永. 基于新式三点驱动的大口径快速控制反射镜分析[J]. *科学技术与工程*, 2018, 18(13): 68-73. Liu C F, Jia J J, Xie Y. Analysis on large aperture fast steering mirror based on new type of drive method[J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, 18(13): 68-73.
- [36] 芯明天. 产品应用[EB/OL]. [2022-04-18]. <http://www.coremorrow.com/proappshow-55-7-1.html>.
- [37] 芯明天. 关于芯明天[EB/OL]. [2022-04-18]. <http://www.coremorrow.com/about-72-1.html>.
- [38] Milanovic V. MEMS actuators with improved performance and cooling: US11111133[P]. 2021-09-07.
- [39] 赵雪. 空间激光通信APT初始捕获及误差分析[D]. 长春: 长春理工大学, 2012: 1-56. Zhao X. The apt initial capture and error analysis of space laser communication[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2012: 1-56.
- [40] 艾志伟. 快速反射镜结构分析与控制系统设计研究[D]. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2017. Ai Z W. Structure analysis and research on the design of control system for fast steering mirror[D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2017.
- [41] Ferrer E M, Pandian M S, Uranga A, et al. Reliability study on thin film capped monolithic CMOS-MEMS resonator with standard plastic packaging[C]//2018 IEEE Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), January 21-25, 2018, Belfast, UK. New York: IEEE Press, 2018: 555-558.
- [42] 董美香. 卫星光通信中快速偏转镜工作寿命特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016. Dong M X. Research on operating life characteristics of fast steering mirror in satellite optical communication[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.