

文章编号:1002-2082(2018)04-0460-06

基于 2D 微电子机械系统(MEMS)镜全向激光雷达光学系统设计

李启坤,邱琪

(电子科技大学 光电信息学院,四川 成都 610054)

摘要:为了满足全向激光探测的需求,提出一种基于 2D MEMS 镜扫描的激光雷达结构。激光器通过 1×6 高速光开关分时地给 6 个扫描子系统提供光信号,6 个扫描子系统探测视场叠加起来可实现 360° 激光探测。每个扫描子系统的扫描范围为 $60^\circ \times 30^\circ$, 其中包含一个扩展 MEMS 镜扫描角度的发射光学天线和一个大视场有增益的接收光学天线。发射光学天线将 MEMS 镜 $\pm 10^\circ$ 的扫描角扩展到 $\pm 30^\circ$, 发散度小于 0.2 mrad; 接收视场内的激光回波经过接收天线在探测器上所成的半像高小于 1 mm, 接收增益为 3.65。通过计算修正后的激光雷达方程可得到发射功率 20 W 的激光束在工作距离 100 m 内的回波功率 ≥ 1 nW, 结果表明该光学系统可适用于激光雷达系统。

关键词:激光雷达;发射光学天线;宽视场接收光学天线;2D MEMS 镜

中图分类号:TN958.98

文献标志码:A

DOI:10.5768/JAO201839.0401003

Design on omnidirectional optical system of lidar based on 2D MEMS mirror

Li Qikun, Qiu Qi

(School of Opto-Electronic Information, University of Electronic Science and Technology of China,
Chengdu 610054, China)

Abstract: In order to satisfy the omnidirectional laser detection, a structure of lidar based on 2D micro-electro-mechanical systems (MEMS) mirror scanning was proposed. The laser provides light signals to 6 scanning subsystems through a 1×6 high speed optical switch and it realizes 360° horizontal scanning by adding the field of view of 6 scanning subsystems together. The scanning range of each scanning subsystem can reach $60^\circ \times 30^\circ$, including a transmitting optical antenna that expands the MEMS mirror scanning angle and a large field of view(FOV) receiving optical antenna with gain. The transmitting optical antenna extends the scanning angle of the MEMS mirror from $\pm 10^\circ$ to $\pm 30^\circ$, and the divergence is less than 0.2 mrad. The half image height of the laser echo in the receiving field angle passing through the receiving antenna on the detector is less than 1 mm and the gain of the receiving optical antenna is 3.65. By calculating the corrected lidar equation, the laser beam with a transmitting power of 20 W can achieve an echo power of ≥ 1 nW within a working distance of 100 m, and the result shows that the optical system can be applied to lidar system.

Key words: lidar; transmitting optical antenna; wide FOV receiving optical antenna; 2D MEMS mirror

收稿日期:2018-01-16; 修回日期:2018-04-02

基金项目:国家自然科学基金(61271030)

作者简介:李启坤(1992—),男,重庆人,硕士研究生,主要从事激光雷达方面的研究工作。E-mail:lqk20509@163.com

引言

激光雷达是一种以发射激光光束来探测目标的位置、大小等特征量的雷达系统, 其常见扫描方式包括光机扫描、电光扫描、声光扫描等^[1]。机械旋转式扫描是目前应用最广泛的大角度扫描方式, 它的优点是扫描方式简单、成本低、覆盖角度广, 但是由于步进电机性能的限制, 其耐用性不高并且体积和质量都较大。近年来随着微电子、微机械、光电子技术的迅猛发展与领域结合, 利用微加工工艺可以将微光学器件、控制电路等完整地集成在一块芯片上, MEMS 扫描芯片也应运而生。基于这种扫描结构的激光雷达灵活性高、可控性强, 缺点是 MEMS 镜扫描角度较小, 其驱动电路的偏置电压较高。随着光学技术、电子技术水平的不断提升以及环境侦查、目标识别跟踪、无人驾驶等应用需求的增加, 这种小体积、高精度、高灵活性的扫描方式在军用和民用领域^[2]的应用定将更加广泛。

激光雷达利用 Mirrorcle 技术公司^[3]的双轴旋转 MEMS 微镜器件, 通过垂直梳齿静电驱动的方式使镜面绕中心点进行旋转。旋转制动器由驱动电压控制, 改变驱动电压可以使 MEMS 镜产生一系列的角度变化, 稳态的驱动电压产生稳态的旋转角, 且具有高度的重复性。MEMS 镜的镜面直径为 2 mm, 每个轴的机械偏转角度范围为 $-5^\circ \sim +5^\circ$, 驱动器可以提供 14 位以上的驱动精度, 偏转角的分辨率可达 0.6 mrad。本文根据这种 MEMS 器件的扫描特性设计了激光雷达的发射光学天线, 并且根据全向的探测需求研究出满足大视场有增益的接收光学天线。

1 激光雷达结构

激光雷达采用脉冲测距体制, 其结构如图 1 所示。来自控制系统的触发信号驱动激光器产生窄脉冲激光发射到光纤中, 同时控制光开关, 按照设定时序驱动光开关切换通道将脉冲激光分配到各个发射路径上以扫描不同的角度区域。每路激光输出尾纤都配有准直器, 以产生足够窄的平行光束来匹配 MEMS 反射镜的直径。控制系统通过操控 MEMS 镜面进行 x 和 y 轴方向上转动使反射光束偏转从而实现扫描。经 MEMS 镜反射的光通过发射光学天线进入目标场景进行探测, 遇

到物体反射后, 通过接收光学天线被光电探测器捕获, 再经过信号处理完成场景探测。

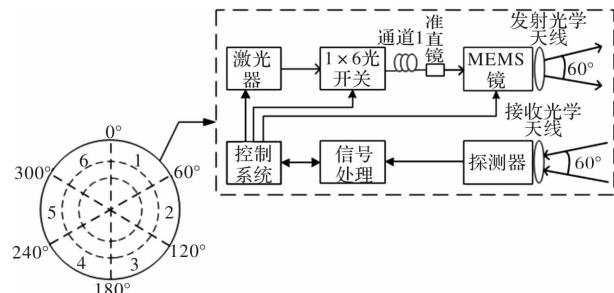


图 1 激光雷达示意图

Fig. 1 Schematic diagram of laser radar

激光雷达每一个扫描子系统最大扫描范围为 $60^\circ \times 30^\circ$, 具体的扫描角度可以根据场景需求通过编写控制系统的程序来实现。这里采用重复频率 200 kHz 的脉冲光纤激光器, 用于 6 通道扫描可以实现每秒钟每个通道 256×128 像素的场景探测。通过高速光开关分时复用可以使系统使用更少的激光器完成多个方向的探测。

2 光学系统设计

2.1 发射光学天线

2.1.1 基本结构

因 MEMS 镜每个轴的机械转动角度较小, 仅为 $-5^\circ \sim +5^\circ$ ^[4], 对应的光束扫描角度为 $-10^\circ \sim +10^\circ$, 所以在实际应用中常采用添加视场扩展光学系统的方式^[5-7]增加扫描角度。这里采用平场聚光透镜^[8]以及负透镜组成扩展扫描角的光学系统, 其原理结构如图 2 所示。

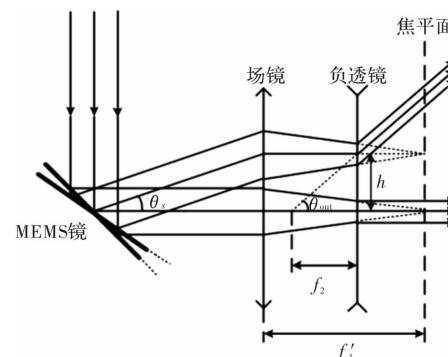


图 2 扫描角扩展原理图

Fig. 2 Schematic diagram of scanning angle expansion

平场聚光透镜放置在 MEMS 镜后, 保持 MEMS 镜的中心在入射光路的光轴上, 在出射光路上放置负透镜, 使平场聚光透镜后焦面与负透

镜后焦面重合。光束经过场镜汇聚在负透镜的物方焦平面上, 其出射光也能保持平行。光束经过 MEMS 镜反射后的偏转角度为 θ_s , 平场聚焦透镜、负透镜的焦距分别为 f_1 、 f_2 , h 为主光线通过平场聚焦透镜后在负透镜上的入射高度, 扩展后的光束扫描角为 θ_{out} , 根据光学原理可得如下关系:

$$h = \tan \theta_s \cdot f'_1 \quad (1)$$

$$\tan \theta_{out} = -\frac{h}{f_2} \quad (2)$$

根据(1)式、(2)式可以得到 θ_{out} 和 θ_s 的映射关系:

$$\theta_{out} = \arctan\left(\frac{\tan \theta_s}{-f_2} \cdot f'_1\right) \quad (3)$$

光束偏转角 θ_s 是光线出射方向与光轴的夹角, 可分解为水平方向偏转量 θ_x 和垂直方向偏转量 θ_y , 则 θ_s 与 θ_x 、 θ_y 关系如下:

$$\theta_s = \arctan \frac{\sqrt{\sin^2 \theta_x + \tan^2 \theta_y}}{\cos \theta_x} \quad (4)$$

将(4)式代入(3)式, 可得:

$$\theta_{out} = \arctan \frac{f'_1 \cdot \frac{\sqrt{\sin^2 \theta_x + \tan^2 \theta_y}}{\cos \theta_x}}{-f_2} \quad (5)$$

根据(5)式绘制出整个扫描视场下对应的出射角关系, 如图 3 所示。

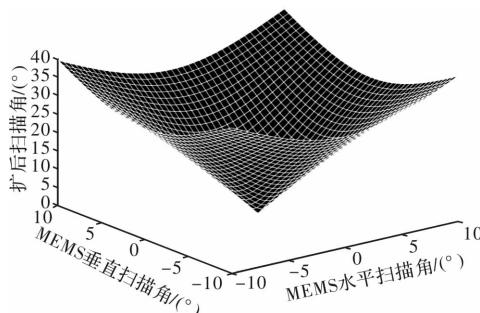


图 3 出射角与入射角对应关系图

Fig. 3 Relation diagram of incident angle corresponding to emergence angle

2.1.2 系统设计以及光学特性

经 2D MEMS 镜反射后的激光入射角为 $-10^\circ \sim 10^\circ$, 设计平场聚焦透镜组, 控制焦距为 100 mm; 设置优化函数使得各入射角通过场镜后的出射角到达像面时的角度趋近于 0° 并且控制光线通过平场透镜组后得到的像面场曲尽量小。由(1)式可得平场透镜的半像高为 17.476 mm, 想要得到出射角为 30° 的平行光, 负透镜的焦距应满足:

$$f_2 = -\frac{h}{\tan \theta_{out}} = -\frac{17.476}{\tan 30^\circ} = -30.267 \text{ mm} \quad (6)$$

控制场镜与负透镜的焦面重合, 拼接后的结构如图 4 所示。

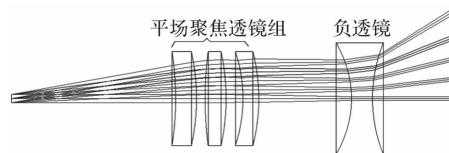


图 4 发射光学天线初始设计结构图

Fig. 4 Initial design structure of transmitting optical antenna

在整体优化过程中, 不断通过像差函数^[9] 优化点列图以达到平行出射的效果, 考虑到系统长度较长、镜片数量较多, 优化同时也应减小镜片数量以及系统长度, 优化后的系统结构如图 5 所示。

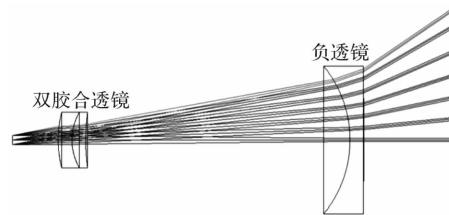


图 5 优化后的发射光学天线示意图

Fig. 5 Schematic diagram of optimized transmitting optical antenna

优化后的像面点列图如图 6 所示, 30° 出射角的发散度小于 0.2 mrad, 满足应用需求。

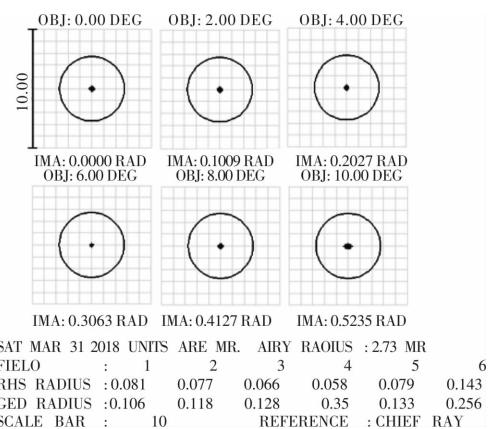


图 6 优化后的系统不同出射角下的点列图

Fig. 6 Spot diagrams of different emergence angles of optimized system

优化后的光学天线参数如表 1 所示。

图 7 显示了系统在不同 MEMS 扫描视场角对应的扩展后光束出射角。从图中可以看出激光的出射角度 θ_{out} 跟 MEMS 扫描角 θ_s 近似线性关系, 可以通过控制电压的步进长度使得激光光束实现匀速精准扫描。

表 1 优化后发射光学天线参数

Table 1 Parameters of optimized transmitting optical antenna

名称	数值
工作波长/nm	1 550
视场角/(°)	67
角放大率	3 [×]
发散度/mrad	<0.2
系统长度/mm	76
口径/mm	32

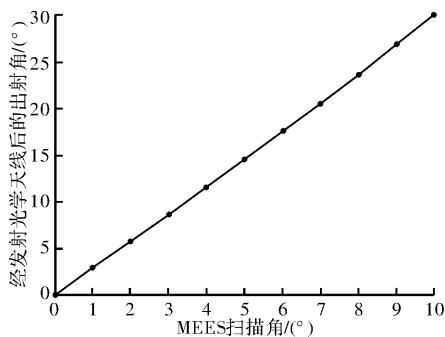


图 7 MEMS 镜扫描角与经发射天线后出射角的数值关系

Fig. 7 Relation diagram between MEMS scanning angle and extended emergence angle

2.2 接收光学天线

2.2.1 基本结构

在设计中考虑到光电二极管的光敏面直径小, 系统所需的接收视场角较大, 为了满足光信号探测的需要常采用场镜、光锥、浸没透镜等带有增益的光学系统。

浸没透镜是由一个单折射球面与平面构成的球冠体, 探测器光敏面固定在透镜的平面后。若浸没透镜置于空气中, 则浸没透镜的光学增益^[10] $G = (n')^4$, 其中 n' 为浸没透镜折射率, 所以在光学系统中使用浸没透镜可获得较大增益。

2.2.2 系统设计

系统采用了静态的宽视场有增益的接收光学天线^[11], 其结构如图 8 所示。系统物镜由正负透镜组成, 负透镜在前, 正透镜在后, 物镜后放置高折射率标准超半球浸没透镜, 光电探测器紧贴浸没透镜后。

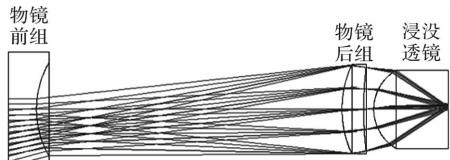


图 8 接收光学天线

Fig. 8 Receiving optical antenna

接收天线的光学参数如表 2 所示。

表 2 接收光学天线参数

Table 2 Parameters of receiving optical antenna

名称	数值
工作波长/nm	1 550
视场角/(°)	67
物镜 F 数	3
半像高/mm	1
入瞳直径/mm	3.82
系统长度/mm	84
口径/mm	21

2.2.3 光学特性

由光学设计软件仿真得到的半视场角内 5 个不同接收角度的光线径向能量分布图, 如图 9 所示。横坐标表示离光敏面中心点的距离, 纵坐标是能量集中度。可见所有能量都集中在半径为 1 mm 的像面圆内, 而且光线接收角度越小能量越靠近光敏面的中心。由于光学系统的视场大, 产生的轴外像差较大, 但对于非成像系统的能量采集来说并没有影响。

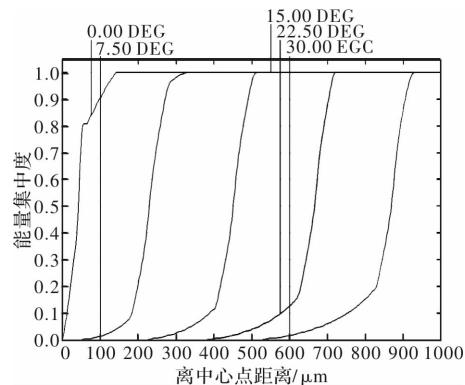


图 9 径向能量分布

Fig. 9 Radial energy distribution

对于二次聚光的光学系统, 接收天线的光增益 G 为

$$G = G_1 G_2 = \left(\frac{D}{2y}\right)^2 \left(\frac{2y}{2y_1}\right)^2 = \left(\frac{D}{2y_1}\right)^2 \quad (7)$$

式中: G_1 、 G_2 分别为物镜增益和浸没透镜增益; D 为物镜入瞳孔径; y 为最大视场角下的无限远目标在物镜焦平面上所成像的半高; y_1 为经过浸没透镜在像平面上的半高。根据光学设计软件分析得到实际的入瞳直径为 3.82 mm, 接收视场角内的激光回波对应的像半高在 1 mm 以内, 由(7)式算得此时的光学增益为 3.65。

3 激光雷达方程

由于激光雷达发散角较小, 照射在目标物体上的光斑可看作小于目标物体的面积, 通过对经典激光雷达方程添加修正系数可得:

$$P_r = \frac{\eta \tau_a^2 \rho_t P_t A_D G_t \cos \alpha}{\pi R^2} \quad (8)$$

式中: P_r 为接收光功率; P_t 为发射光功率; A_D 为光电探测器光敏面面积; G_t 为天线增益; η 为光学系统传输系数; τ_a 为大气透射率; ρ_t 为目标发射率; R 为工作距离; α 为激光的主光线方向与目标物体法线方向的夹角。设 $\eta = 0.8$, $\tau_a = 0.98$, $\rho_t = 0.2$, $G_t = 3.65$, $A_D = 3.14$ mm, 由式(8)可仿真得到不同发射功率下激光雷达接收光功率与工作距离的关系曲线。

在本文设计的光学系统基础上通过理论计算可以得到接收功率与工作距离关系, 如图 9 所示, 发射功率为 20 W 的激光光束在工作距离为 100 m 处的回波接收功率约为 1 nW, 表明系统可满足一定脉宽下的激光脉冲较高虚警率^[12] 所需的信噪比。

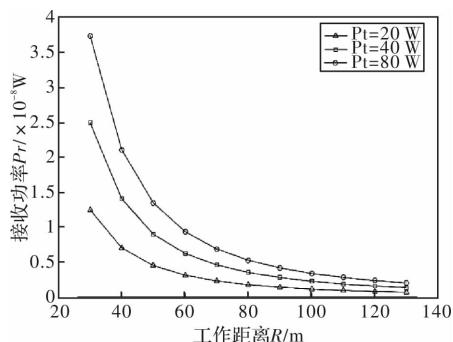


图 9 接收功率与工作距离关系

Fig. 9 Relation diagram between receiving power and working distance

4 结论

本文针对 2D MEMS 镜的扫描特性设计了扩展扫描角的发射光学天线, 将水平轴上的 $\pm 10^\circ$ 的激光扫描角扩展到 $\pm 30^\circ$, 出射光束发散度小于 0.2 mrad。设计了静态大视场带增益的接收光学天线, 其接收视场角内的激光回波在光电探测器上所成的半像高小于 1 mm, 系统光学增益达 3.65, 一定程度上解决了大视场探测需求与探测器小接收面积的匹配问题。由一个扫描子系统可以完成 60° 水平视角百米以内的目标探测, 6 个系

统协同工作就可以实现 360° 的激光探测。

参考文献:

- [1] SHU Rong, XU Zhihai. Principle and motion error compensation method of laser radar imaging [M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [2] LIU Bin, ZHANG Jun, LU Min, et al. Research progress in application of laser radar [J]. Laser and Infrared, 2015, 45 (2): 117-122.
- [3] MILANOVIC V, MATUS G A, MCCORMICK D T. Gimbal-less monolithic silicon actuators for tip-tilt-piston micromirror applications [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics [J]. 2004, 10 (3): 462-471.
- [4] STANN B L, DANMANN J F, GIORNO M D, et al. Integration and demonstration of MEMS-scanned LADAR for robotic navigation [J]. SPIE, 2014, 9084:90840J.
- [5] YI Kejia, DENG Tingquan, MENG Qinghua, et al. Design and implement for next generation lidar [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2011, 32 (5): 707-709.
- [6] QU Yang, WANG Chunhui, PANG Yajun, et al. Study on the vibration characteristics of MEMS vibratory mirror in imaging laser radar [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34 (S1): 11004-1-4.
- [7] LEE Xiaobao, WANG Chunhui. Optical design for uniform scanning in MEMS-based 3D imaging lidar [J]. Applied Optics, 2015, 54 (9): 2219-2223.
- [8] WANG Wensheng. Modern optical system design [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2016.
- [9] WANG Zhaohui, JIAO Binliang, XU Zhaopeng. Optical system design course [M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2013.
- [10] GAO Zhiyun, GAO Yue, ZHANG Kaihua. Military electro-optical system [M]. Beijing: Beijing Institute

of Technology Press, 1996.

高稚允,高岳,张开华.军用光电系统[M].北京:北京理工大学出版社,1996.

[11] HE Wuguang. Research on wide field of view and gain optical system [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2006.

何武光.宽视场有增益光学系统研究[D].成都:电子科技大学,2006.

[12] HU Chunsheng. High speed three-dimensional imaging laser radar study of pulsed semiconductor laser [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2005.

胡春生.脉冲半导体激光器高速三维成像激光雷达研究[D].长沙:国防科技大学,2005.