

## 三维激光雷达发射/接收共光路光学系统设计

张欣婷<sup>1,2</sup>, 安志勇<sup>2</sup>, 亢磊<sup>3</sup>

(1. 长春理工大学 光电信息学院, 吉林 长春 130012; 2. 长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022;  
3. 中国北车长春轨道客车股份有限公司, 吉林 长春 100083)

**摘要:** 针对空间三维坐标的测量需求, 设计了 3D 激光雷达光学系统。系统采用发射/接收共光路的结构形式, 以高斯光学为理论基础, 采用 Zemax 光学设计软件进行仿真。该结构形式不仅提高了系统同轴度、减小外部干扰, 而且简化了系统结构、缩小仪器体积。系统采用扩束准直结构, 实现 8 倍扩束比。通过微小的调焦, 调整发射光学系统的第一片和第二片透镜之间距离在 28.203~14.671 mm 之间变化时, 实现了 2~18 m 的测量范围内, 测距精度 0.02 mm+10 μm/m。

**关键词:** 激光雷达; 扩束准直; 高斯光学; 发射/接收共光路

**中图分类号:** O439 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0618004

## Design of 3D laser radar transmitting/receiving common path optical system

Zhang Xinting<sup>1,2</sup>, An Zhiyong<sup>2</sup>, Kang Lei<sup>3</sup>

(1. School of Optical and Electronic Information, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130012, China;  
2. College of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;  
3. China CNR Changchun Railway Vehicles Co., Ltd, Changchun 100083, China)

**Abstract:** For the measurement needs of space three-dimensional coordinates, a 3D laser radar optical system was designed. This system used the structure of transmitting/receiving common path and based on Gaussian optics theory. It can not only improve system concentricity, reduced external interference, and also simplify the system structure, reduce the volume of the instrument. The system uses expanded beam collimation structure to achieve eight times beam expander. Through small defocus, by changing the distance between 28.203–14.671 mm of the transmission optical system between a first lens and the second, it can achieve ranging accuracy 0.02 mm+10 μm/m when the measuring range of 2–18 m.

**Key words:** laser radar; expanded beam collimation; Gaussian optics; transmit/receive common path

收稿日期: 2015-10-05; 修订日期: 2015-11-15

基金项目: 吉林省科技厅重大基金项目(20106010)

作者简介: 张欣婷(1984-), 女, 博士生, 主要从事光学设计与检测技术方面的研究。Email: luoyiwuhens@163.com

导师简介: 安志勇(1943-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光电仪器与检测技术方面的研究。Email: an\_zhiyong@126.com

## 0 引言

激光雷达的测量原理与毫米波雷达、微波雷达等类似,只是工作波长较短,因此人们常把这一类的激光仪器统称为激光雷达,三维激光雷达就是其中一种。目前国内外对三维激光雷达的研究主要包括成像激光雷达和非成像激光雷达两类。该设计属于非成像激光雷达,采用非接触测量方法,获取被测目标三维坐标的点云数据,进而实现三维测量。

三维激光雷达主要由发射系统、接收系统以及信号处理系统等几部分结构组成,而发射和接收系统设计的好坏直接影响系统的测量精度。多数激光雷达的内部光学系统设计成两套,分别为发射光学系统和接收光学系统。这种结构形式会增加系统的复杂程度和仪器体积,因此仪器的小型化和便携性成为激光雷达中一个亟待解决的问题。

文中是中国北车集团与长春轨道客车股份有限公司合作的针对大尺寸三维形貌测量的项目,利用激光雷达进行距离测量,考察的是入射到目标上的光斑尺寸,以及从目标返回的回波能量,在保证系统测量精度的前提下,采用发射/接收共光路的光学系统结构形式,这样不仅简化系统结构、缩小仪器体积,还可以提高系统同轴度、减小外部干扰。

## 1 多组连续扩束准直变换

该系统的技术指标为:在 2~18m 的测量范围内,实现空间任意点的三维测量,测距精度 0.02 mm+10 μm/m,方位角测量精度 2",俯仰角测量精度 2"。而在激光雷达中,为了增大作用距离,需要在光学系统中添加扩束准直系统来减小其发散角,进而提高光学系统的准直性。系统的扩束比越高,其准直性越好。当出射光的束腰在焦平面上时,该发射系统可达到最大扩束比<sup>[1]</sup>。

一般的扩束准直系统,分为开普勒型(正组加正组)和伽利略型(负组加正组)两种。开普勒型扩束准直系统存在中间实焦点,因此不适合大功率照明的光学系统<sup>[2]</sup>。但文中所涉及的激光器功率较小,所以两种类型的扩束准直系统均可,最理想的是伽利略型。

当系统中存在多组连续的扩束准直变换时,可以称之为透镜链<sup>[3-6]</sup>。其中每一组都是由两个不同焦

距的薄透镜组成,也是透镜链中的一个单元。设两片透镜的焦距分别为  $f_1$  和  $f_2$ ,透镜间隔为  $d$ ,讨论由  $s$  个单元组成的透镜链对高斯光束的变换。

由 ABCD 法则可得,透镜链一个单元的光线变换矩阵为:

$$M = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_2} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_1} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

解得  $M$  的矩阵元为:

$$A = 1 - \frac{d}{f_1} \quad (2)$$

$$B = d \left( 2 - \frac{d}{f_1} \right) \quad (3)$$

$$C = - \left( \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{d}{f_1 f_2} \right) \quad (4)$$

$$D = - \frac{d}{f_1} + \left( 1 - \frac{d}{f_1} \right) \cdot \left( 1 - \frac{d}{f_2} \right) \quad (5)$$

则由  $s$  个单元组成的透镜链的变换矩阵为:

$$M_T = \begin{bmatrix} A_T & B_T \\ C_T & D_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \quad (6)$$

根据西尔维斯特定理, $M_T$ 的矩阵元为:

$$A_T = \frac{A \sin(s\theta) - \sin[(s-1)\theta]}{\sin\theta} \quad (7)$$

$$B_T = \frac{B \sin(s\theta)}{\sin\theta} \quad (8)$$

$$C_T = \frac{C \sin(s\theta)}{\sin\theta} \quad (9)$$

$$D_T = \frac{D \sin(s\theta) - \sin[(s-1)\theta]}{\sin\theta} \quad (10)$$

其中

$$\cos\theta = \frac{1}{2}(A+D) = 1 - \frac{d}{f_1} - \frac{d^2}{f_2} + \frac{d^2}{2f_1 f_2} \quad (11)$$

设入射光束在第一个透镜单元入射面处的光束复参数为  $q_1$ ,经过  $s$  个透镜单元组成的周期变换链之后,其光束复参数  $q_{s+1}$  为:

$$q_{s+1} = \frac{\{A \sin(s\theta) - \sin[(s-1)\theta]\} \cdot q_1 + B \sin(s\theta)}{C \sin(s\theta) \cdot q_1 + D \sin(s\theta) - \sin[(s-1)\theta]} \quad (12)$$

式中: $q_{s+1}$ 为有限值的条件,要求  $\theta$  值为实数,否则公式(12)中的正弦函数将变为实指数函数,致使  $q_{s+1}$  无限增大。 $\theta$  为实数的条件为:

$$|\cos\theta| = \left| \frac{A+D}{2} \right| \leq 1 \quad (13)$$

或表示为:

$$0 \leq \left( 1 - \frac{d}{2f_1} \right) \cdot \left( 1 - \frac{d}{2f_2} \right) \leq 1 \quad (14)$$

对于个数有限的透镜连续变化,公式(13)是一

个很严格的限制条件。

### 2 发射/接收光学系统设计

光学系统采用的是发射/接收共光路的光路布局,这种布局的优势在于使两个光路存在共用部分,省去了两者光轴的平行调节,简化了系统结构、降低了透镜加工的成本。其光路结构如图 1 所示。

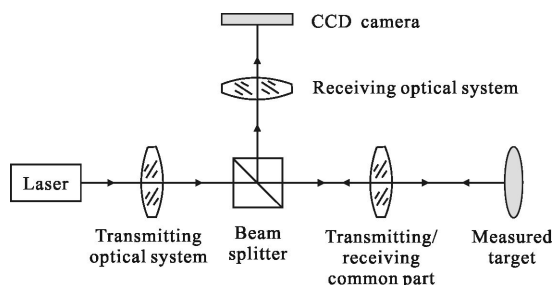


图 1 发射/接收共光路系统结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of transmitting/receiving common path optical system

图 1 中,激光器发射的激光束经过发射光学系统入射到被测目标,再由被测目标返回,经接收光学系统后,用 CCD 相机接收回波光斑的像。通过对发射光学系统的微小调焦,实现在 2~18 m 的测量范围内,CCD 相机均能捕捉到能量最集中的测量光斑。

由于进行扩束准直的目的是为了增强回波信号、提高信噪比、提高测量精度,因此扩束比不能太小;但扩束比太大又会使光能损失增大,且加工和装调误差也会增大。因此本设计使用了三次扩束准直,即透镜链中含有 3 个单元,达到了 8 倍的扩束比,以获得细小的高功率密度的光斑。通过上述高斯光学理论进行相关计算与仿真,最终确定发射光学系统的入瞳直径为 8 mm,经过三次扩束准直之后的出射透镜口径 60 mm。中间的分束镜可将回波光束沿垂直方向反射,实现发射、接收共光路,其光学系统的设计结果如图 2 所示。

图 2 中以半反半透棱镜(即分束镜)3 为界限,1~7 为发射系统光路,7、6、5、4、3、8、9、10 为接收系统光路,3~7 为发射系统和接收系统的共用部分。系统使用 REAY、RSCH、LONA、CTLT、CTGT 等优化操作数进行优化。由于本系统根据距离的不同,在 2~18 m 的范围内选取了多个组态同时进行优化,论篇幅有限,这里仅给出 18 m 时的优化结果作为参考,其他距离的像质均优于此。

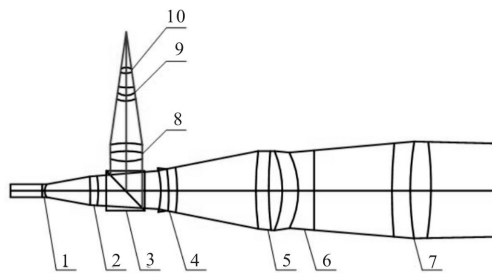


图 2 发射/接收共光路系统设计结果

Fig.2 Design results of transmitting/receiving common path optical system

设计结果图 3~图 8 所示。分别为作用在最远距离 18 m 时的光学系统点列图、点扩散函数、波像差、包围能量图、光线像差曲线和纵向像差曲线。

图 3 所示为光学系统的点列图。图中显示其艾里斑为 568.4 μm,均方根半径 RMS 远远小于艾里斑半径,可以做到使光斑小而亮,且均匀。

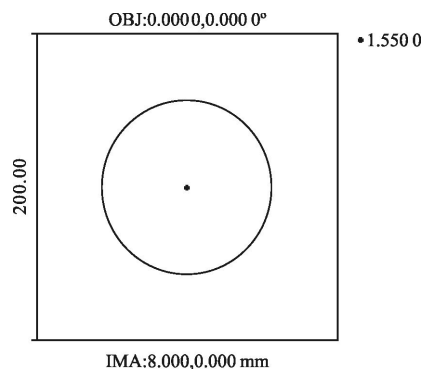


图 3 点列图

Fig.3 Spot diagrams

因为均方根半径 RMS 远远小于艾里斑半径,根据衍射理论,此时若单一的只用点列图来评价像质就不够准确了,而应结合快速傅立叶变换,即图 4 所示的光学系统的点扩散函数。

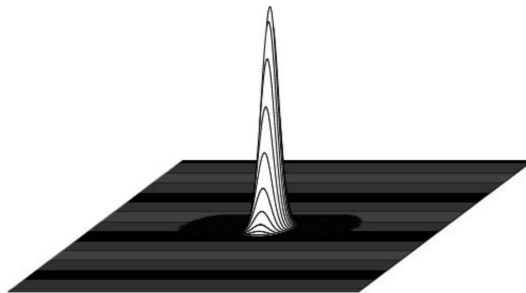


图 4 点扩散函数

Fig.4 Point spread function

图 5 为光学系统的波像差图。图中显示其峰谷值为 0.049 7λ, 满足瑞利判据所要求的小于 0.25λ 的要求。

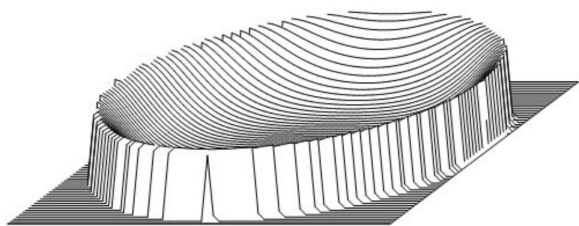


图 5 波像差

Fig.5 Wavefront aberration

图 6 为光学系统的包围能量图。该曲线表征系统的能量大小,其结果是以百分数的形式存在。由图中可知,在距包围圆中心 1 000 μm 的半径处,其光能量占总光能量的 90%。且随着半径的增大,该能量值递增。

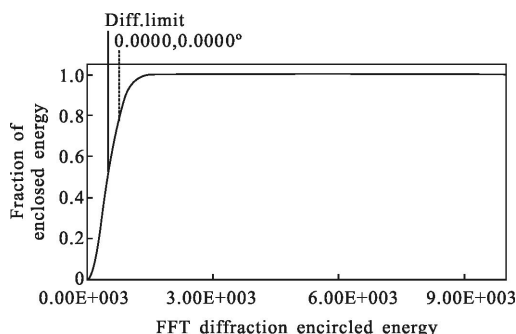


图 6 包围能量图

Fig.6 Encircled energy

图 7 为光学系统的光线像差曲线,包括子午像差特性曲线(左侧)和弧矢像差特性曲线(右侧)。由于

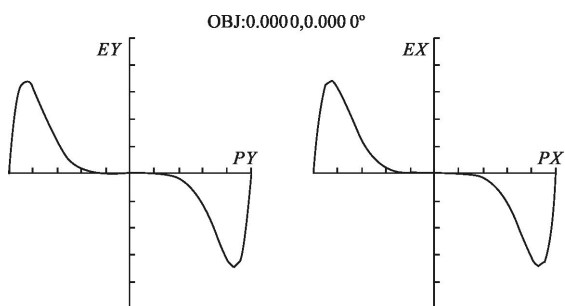


图 7 光线像差曲线

Fig.7 Transverse ray fan plot

该系统为激光光学系统,只有单一波长 1 550 nm,所以不含有色差。同时,只对轴上点成像,因此不含有

彗差、像散、场曲、畸变等轴外点像差,而只含有球差。该结论可以从图 7 中得到进一步印证,曲线两端点的连线交光轴于坐标原点,且直线斜率和切线斜率均为零。

图 8 为光学系统的纵向像差曲线。从图中可以看出,系统已经对边缘带校正了球差,在 0.707 带有最大的球差值,满足消球差系统的要求。

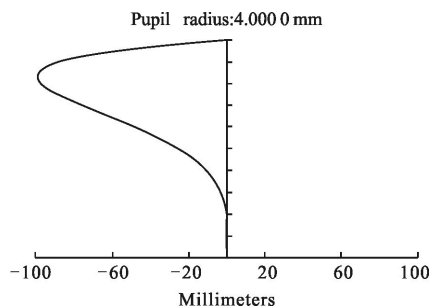


图 8 纵向像差曲线

Fig.8 Longitudinal aberration

为了实现不同距离的测量,设计中利用 Zemax 软件的多重结构来移动第一片负透镜,对系统进行微小的调焦。当第一片透镜和第二片透镜之间的距离在 28.203~14.671 mm 之间变化时,系统在 2~18 m 的范围内均能汇聚成能量集中的光斑。

### 3 光学系统验证实验

#### 3.1 光学系统原理验证实验

为了验证上述光学系统设计的合理性,搭建了光学系统验证实验平台,如图 9 所示。

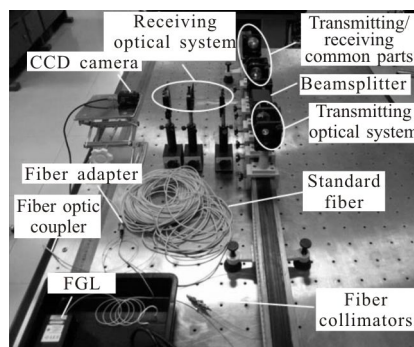


图 9 光学系统原理验证实验

Fig.9 Experimental verification of optical system principle

该实验系统主要由激光器、发射光学系统、接收光学系统、CCD 相机和光纤无源器件等部分组成。

入射到透镜组的可见光斑为波长 635 nm 的指示光,用来指示测量光的光斑位置;扫频激光器为波长 1 550 的光纤光栅外腔半导体激光器,出射的光为测量光,其光斑人眼无法看到,需要指示激光作指示。另外,选取 3 根不同长度的光纤,根据不同的被测距离进行光纤切换,以保证系统的测量精度。

现在将被测目标分别置于距光学系统 2 m、6 m、10 m、14 m 和 18 m 处,利用 CCD 相机来接收测量光斑,并利用计算机将测量的光斑直径以数值形式给出,作为实际测量结果。光斑直径的理论值由 zemax 设计结果给出,以艾里斑直径来表示。但是 zemax 中所给出的是艾里斑半径,计算时需要将其转换成直径,再与测量值比较。在每个距离处进行 50 次测量,取其平均值作为实际测量结果,如表 1 所示。

表 1 接收光斑测量结果

Tab.1 Receiving spot measurement results

Measured distance/m	Airy disk radius/ $\mu\text{m}$	Theoretical value of spot diameter/ $\mu\text{m}$	Measurement of spot diameter/ $\mu\text{m}$
2	62.83	125.66	108.7
6	189.2	378.4	361.2
10	315.6	631.2	617.9
14	442	884	873.8
18	568.4	1 136.8	1 133.6

通过表 1 的实验数据可知,光斑直径的测量值均小于对应测量距离的理论值,满足设计要求,验证了光学系统设计的合理性。

### 3.2 光学系统测距精度验证实验

选取一被测目标分别置于距光学系统 2~18 m 的范围内,利用 PIN 光电二极管接收从目标返回的回波信号;利用 CCD 相机对会聚光斑进行监测,结合电信号处理系统和软件系统等,进行光学系统测距精度验证实验。当探测器接收到的目标回波信号最强、CCD 相机检测到的聚焦光斑直径最小时,启动自动测量系统,给出被测距离的具体数值。

该实验选取特征位置 2 m、6 m、10 m、14 m 和 18 m 处分别进行 50 次测量,用贝塞尔公式统计 50 次测量的标准差,再计算出具体的测量误差,如表 2 所示。

表 2 系统测距误差

Tab.2 Ranging error of system

Measured distance/m	Accuracy index requirements/mm	Measurement error /mm
2	0.02	0.007
6	0.06	0.009
10	0.10	0.008
14	0.14	0.010
18	0.18	0.012

通过表 2 的实验数据可知,该系统测距精度满足 0.02 mm+10  $\mu\text{m}/\text{m}$ 。

## 4 结 论

文中设计了一种发射/接收共光路激光雷达光学系统。系统基于高斯光学理论,采用扩束准直结构,设计成无焦变倍系统。为了达到测量精度,选取 8 倍扩束比,通过微小的调焦,调整发射光学系统的第一片和第二片透镜之间的距离来实现不同距离的测量。分别进行了光学系统合理性验证实验和测距精度验证实验,实验结果表明,在 2~18 m 的测量范围内,光斑尺寸均小于艾里斑直径,且测距精度满足 0.02 mm+10  $\mu\text{m}/\text{m}$ 。该结构形式不仅提高了系统同轴度、减小外部干扰,而且简化了系统结构、缩小仪器体积。

### 参考文献:

- [1] Yan Jixiang, Wei Guanghui, Ha Liuzhu. Matrix Optics [M]. Beijing: Weapon Industry Press, 1995. (in Chinese)
- [2] Zhang Yimo. Applied Optics(3rd ed) [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2008: 523-548. (in Chinese)
- [3] Weibring P, Abrahamsson C, Sjöholm M, et al. Remote analysis of gas mixtures using an optical parametric oscillator based lidar system [C]//IEEE, Conference on Lasers & Electro-optics Europe, 2003.
- [4] Zhang Le. Laser radar transmitting and receiving optical system research [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2004. (in Chinese)
- [5] Anjum M R, Xiaowei W, Khanzada K T J, et al. Design of an optical emitting system for scannerless imaging LIDAR based on ZEMAX [J]. *Telkonnika Indonesian Journal of Electrical Engineering*, 2014, (6): 69-74.
- [6] Weibring P, N. Smith J, Edner H, et al. Development and testing of a frequency-agile optical parametric oscillator system for differential absorption lidar [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2013, 74(10): 13-17.