

激光引信大视场小型化发射光学系统设计

高 洁, 张大庆, 陆长平, 刘锡民

(上海无线电设备研究所, 上海 200090)

摘 要: 由于受系统体积限制, 目前激光引信大视场探测方式无法满足小型化结构简单的需求。针对激光引信弧矢方向无漏探测、子午方向窄视场探测的技术要求, 提出了一种小型化大视场激光引信发射光学系统的设计方法, 采用由三个管芯线型阵列排布的隧道结半导体激光器作为发射光源, 合理选择光学视场空间布局方式, 设计了三象限扇形轮流发射方式激光引信发射光学系统, 其特点在于体积小、视场大、结构合理, 装调简单, 单路发射光学系统体积为 $8\text{ mm}\times 8.2\text{ mm}\times 15\text{ mm}$, 单路弧矢方向探测视场达 120° 。设计的发射光学系统能够满足弹径为 $\Phi 70\text{ mm}$ 的便携式防空导弹激光引信大视场目标探测要求, 解决了周视激光引信小型化的需求问题。

关键词: 激光引信; 大视场发射; 小型化

中图分类号: TN249 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201847.0518001

Design of emission optical system for laser fuze with large FOV and miniaturization

Gao Jie, Zhang Daqing, Lu Changping, Liu Ximin

(Shanghai Radio Equipment Research Institute, Shanghai 200090, China)

Abstract: Due to the limitations of system volume, the large field of view (FOV) detection method of laser fuze can not meet the requirements of system miniaturization. Aiming at the requirements of full detection in sagittal direction and narrow-FOV detection in meridian direction, a method of emission optical system with large FOV and miniaturization for laser fuze was proposed. The tunnel junction LD laser as a light source, a reasonable mode of FOV configuration was choiced, and an optical system with three-quadrant and sector-shaped emission was designed, which was characterized by small size, large FOV, reasonable structure, simple installation. The volume of single emission optical system was $8\text{ mm}\times 8.2\text{ mm}\times 15\text{ mm}$, the single FOV in sagittal direction was more than 120° . The large FOV detection requirements of portable laser fuze whose diameter was $\Phi 70\text{ mm}$ for air defense missile was satisfied, and the problem of miniaturization for full FOV laser fuze was solved.

Key words: laser fuze; large FOV emission; miniaturization

收稿日期: 2017-12-05; 修订日期: 2018-01-03

作者简介: 高洁(1986-), 女, 工程师, 硕士, 主要从事激光探测光学设计方面的研究。Email: gaoj_1986@126.com

0 引言

激光引信由于其在精确定距、定位方面的优势,被广泛应用于面空导弹、空空导弹等领域。国外几乎 70% 的空-空导弹配备激光引信,如在 20 世纪八九十年代英国研制的先进近距 AIM-132、以色列的怪蛇-4、俄罗斯的 AA-11、AA-12、美国的先进中距空-空导弹 AIM-120A 以及 AIM-9M、AIM-9N、AIM-9P3、猎鹰 AIM-4H 等空-空导弹都采用激光引信^[1-2]。国内在“十一五”期间陆续也有型号开始应用激光引信。针对大目标或扫描方式探测,探测视场仅在几度左右,具有探测精度高、抗干扰能力强的特点。对于小目标探测,要满足周视 360°无漏探测,一般采用包含四组或六组相互匹配的收发系统方式来实现,其存在的主要问题是系统体积大,结构复杂^[3]。

为满足便携式防空导弹激光引信小型化、对目标无漏探测的设计要求,只能采取减少探测视场数量,增大探测视场角度的设计方式。针对 $\Phi 70\text{ mm}$ 弹径的激光引信需求,文中提出了一种三象限扇形轮流发射方式、大视场目标探测激光引信发射光学系统的实现方法,具有结构体积小,集成度高,装调简单的特点。

1 光学系统空间布局分析

在弹目交会过程中,激光引信通过设定探测光束的空间布局方式,可准确获得目标的距离、方位和尺寸信息,从而实现精确定距、定向起爆。在目标探测过程中,要做到对目标无漏探,必须满足视场覆盖目标或者目标覆盖视场的要求。激光引信常用光束布局方式主要包括多辐射离散小视场方案、分区方案、分区扫描方案,分别如图 1 所示^[4-5]。

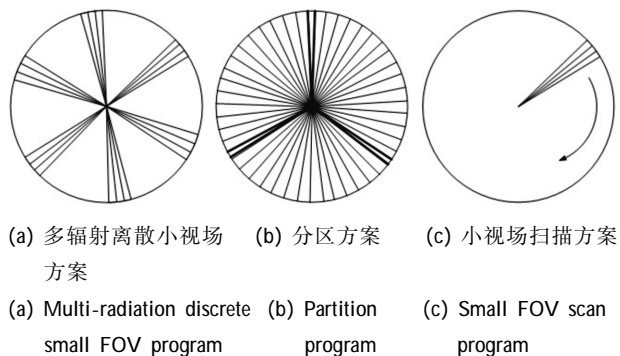


图 1 光学系统空间布局方案

Fig.1 Program of optical system space layout

多辐射离散小视场方案尤其适用于小视场($<10^\circ$),优点是工程实现较容易,能量利用率高,只需单透镜就可实现,但只有对付大目标时,才容易实现目标覆盖视场。对于小弹径目标,采用离散小视场探测时会存在较高的漏探概率。

分区方案由几个扇形光束组成探测场,接收器与激光器数量相等且视场匹配,该方案可探测的最小目标尺寸较小,但大接收视场会增加背景噪声并降低发射功率的利用率,所以此方案对发射激光器平均功率要求较高。

小视场扫描方案,一般都要用到旋转反射镜,光学系统体积都比较大,不利于实现激光引信的小型化^[6-7]。

因此,针对小弹径目标,可以采用多个扇形探测场,既可同步工作组成一个大的探测场,又可轮流工作形成分区轮流探测。根据目前掌握的技术以及国内激光器功率及探测器的水平,文中采用三象限扇形轮流发射方式。三路发射系统在圆周方向上均匀排开,设计每个象限的探测视场为 120° ,通过激光发射重复频率的设计保证对目标的无漏探测。系统设计每个象限的探测脉冲重复频率为 10 kHz ,采用轮流发射技术,相邻两个象限之间的探测间隔为 $33.3\ \mu\text{s}$,即相邻两个象限最多间隔 $66.6\ \mu\text{s}$ 完成对空域的扫描。导弹对典型目标的弹目交会时相对速度最大为 1000 m/s 。无论目标处于三象限的哪一个象限,当处于最大相对速度时,单个象限内目标被探测部位的最大间距为 10 cm 。这种探测方式能够完全满足对目标的正确探测,不会出现漏探现象。

2 光束特性与设计要求

半导体激光器具有体积小、质量轻、效率高、易于集成等显著优点,被广泛应用于激光引信中^[8]。对于高功率的半导体激光器,激光器管芯排列主要有叠层排列、阵列排列、叠层阵列混合排列以及隧道结形式。隧道结形式的半导体激光器在同样的发射功率下,体积最小,单个管芯发光面尺寸为微米量级。文中采用隧道结激光器作为发射光源,每个激光器发光面由三个管芯线型阵列排布,发光面大小为 $1.7\text{ mm}\times 0.1\text{ mm}$,激光器光束发散角度:子午方向 25° ,弧矢方向 12° ,如图 2 所示。

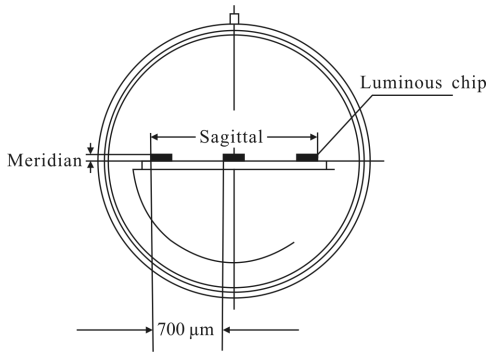


图 2 激光器管芯分布示意图
Fig.2 Distribution diagram of laser tube core

为实现扇形视场及 360°无漏探测，发射光学系统设计指标为：

- (1) 弧矢方向光束 3dB 发射角度 ≥ 120°；
- (2) 子午方向光束 3dB 发射角度 ≤ 1.1° ± 0.3°；
- (3) 光束对称特性，弧矢方向的对称性应满足在弧矢方向在 ±60°处，积分光强(光功率)之差小于 1.0dB(见图 3, |A_{60°}-A_{-60°}| ≤ 1dB)；
- (4) 体积要求，不大于 10mm×10mm×20mm。

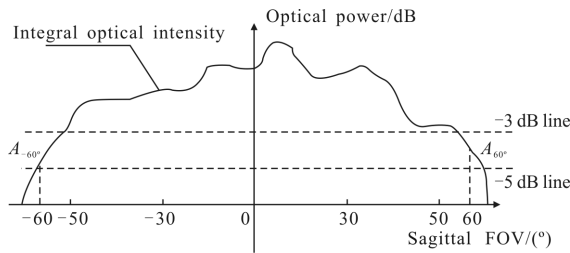


图 3 弧矢方向光功率分布图
Fig.3 Optical power distribution diagram in sagittal direction

3 发射光学系统设计及仿真

对半导体激光器的发射光束整形时，由于激光器两个方向尺寸相差较大，为了充分利用激光器能量并达到小型化要求，对子午方向的发射光束进行压缩，对弧矢方向的发射光束进行发散，所以，两个方向上的数值孔径、焦距均不相同，因此，发射光学系统采用三片柱面镜的结构形式，一片柱面镜实现子午方向的光束准直，另外两片柱面镜实现弧矢方向的光束发散。

3.1 准直透镜设计

半导体激光器所发出的光以高斯光束的形式在空间传输，根据高斯光束传输理论，在近轴区域其波面也可以看作是一个球面波，如图 4 所示。当高斯光束传播到透镜 L 之前时，其波面的曲率中心为 C

点，曲率半径为 R₁，通过透镜 L 后，其出射波面的曲率中心为 C' 点，曲率半径为 R₂。

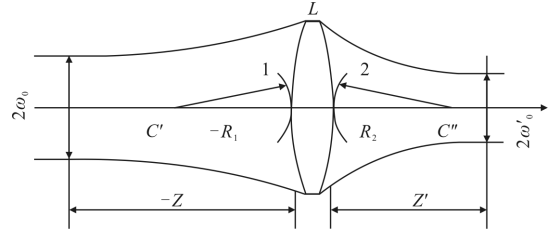


图 4 高斯光束经透镜变换
Fig.4 Gaussian beam transformed by the lens

$$\omega'_0{}^2 = \frac{f'^2 \omega_0^2}{(f'+z)^2 + \left(\frac{\pi \omega_0^2}{\lambda}\right)^2} \quad (1)$$

$$z' = f' \frac{z(f'+z) + \left(\frac{\pi \omega_0^2}{\lambda}\right)^2}{(f'+z)^2 + \left(\frac{\pi \omega_0^2}{\lambda}\right)^2} \quad (2)$$

高斯光束的束腰半径 ω₀ 和束腰到透镜的距离 z 经透镜变换后分别为 ω'₀ 和 z'。

当 z=-f' 时，参考公式(1)，束腰半径 ω'₀ 为极大值^[9]。根据高斯光束传输理论，发散角与束腰大小成反比，出射光束束腰半径越大，出射光束的发散角越小，即准直性越好，因此，透镜焦距 f₁ 越大，准直效果越好。

子午方向焦距可表达为：

$$f_1 \geq \frac{d_1}{2 \tan(\alpha_1/2)} \quad (3)$$

子午方向数值孔径为：

$$NA_1 = \sin(\theta_1/2) \quad (4)$$

式中：d₁ 为子午方向发光面高度；α₁ 为子午发射视场角；θ₁ 为激光器子午方向发散角。上式中，d₁ 为 0.1mm，α₁ 为 1°，θ₁ 为 25°。经计算，子午方向焦距 f₁ ≥ 5.73mm，考虑系统体积限制，取子午方向焦距 f₁ 为 8.6mm，子午方向数值孔径 NA₁ 为 0.22。

基于上述分析，确定系统的初始结构及参数后，利用 ZEMAX 软件进一步优化准直系统参数。材料选取高折射率的 ZF7 光学玻璃，高折射率材料的选取可以有效减少系统体积，用一片柱面透镜即可实现准直。优化过程中，分别将镜片曲率、厚度、间隔设置为变量，将系统焦距设置为目标函数，经反复迭代计算得到最终结构，如图 5 所示。通过仿真数据分

析, 子午方向光束的发散角为 1°, 子午方向光线准直点列图如图 6 所示, 可见采用一片高折射率柱面透镜可以很好地将子午方向光束准直。

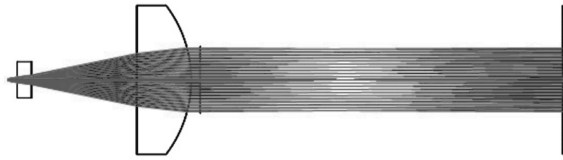


图 5 子午方向光束准直光线追迹

Fig.5 Ray tracing of collimation beam in meridional direction

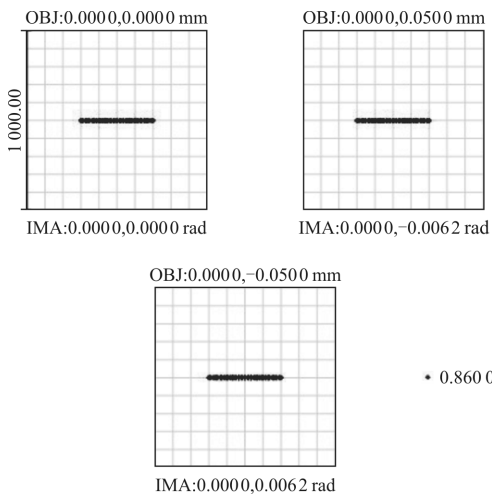


图 6 子午方向光束准直点列图

Fig.6 Spot diagram of collimation beam in meridional direction

3.2 发散透镜设计

对弧矢方向的光束进行发散整形, 一般有两种方法: 一为凸柱面透镜, 一为凹柱面透镜。凸柱面透镜若不引入非球面系数, 很难实现大视场均匀化发散, 其光功率分布容易呈现视场中心能量集中的现象。考虑到加工难度及加工成本问题, 系统采用两片凹柱面镜的结构形式。

弧矢方向光束出射口径为 D , 物距为 L , 系统焦距为 f_2 , 光束发散角为 θ_2 , 光束视场角为 α_2 , 则有如下关系:

$$D=2L \cdot \tan \theta_2/2 \quad (5)$$

$$-f_2=\frac{D}{2 \tan \alpha_2/2} \quad (6)$$

考虑到系统体积限制及装配调试空间, 物距 L 为: $10 \text{ mm} < L < 40 \text{ mm}$, 光束发散角 θ_2 为 12° , 光束视场角 α_2 为 120° 计算得到弧矢方向焦距 $-0.3 \text{ mm} > f_2 > -2.42 \text{ mm}$, 设置弧矢方向焦距 f_2 为 -2 mm 。通过优化两片凹柱面镜的曲率半径、厚度及镜片间隔, 实现弧矢方向

125° 的发散视场。

在仿真过程中, 设置弧矢方向物高为 1.7 mm , 经过光学系统的优化设计, 利用两片凹柱面镜对弧矢方向光束进行了较好的整形, 仿真效果如图 7 所示。图 8 中显示了经过整形的光束在弧矢方向的能量分布, 可见两片凹柱面镜结构形式有效降低系统的像差, 分散了中心视场的能量, 提高了视场能量的均匀化。图 9 为发射光学系统的点列图, 可以看出出

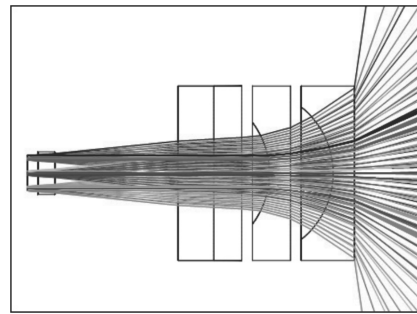


图 7 弧矢方向光束发散光线追迹

Fig.7 Ray tracing of divergence beam in sagittal direction

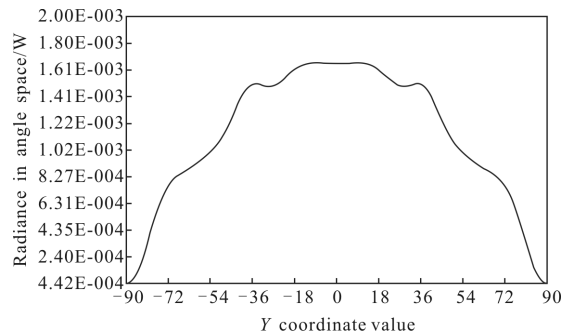


图 8 弧矢方向光束能量分布

Fig.8 Energy distribution of sagittal beam

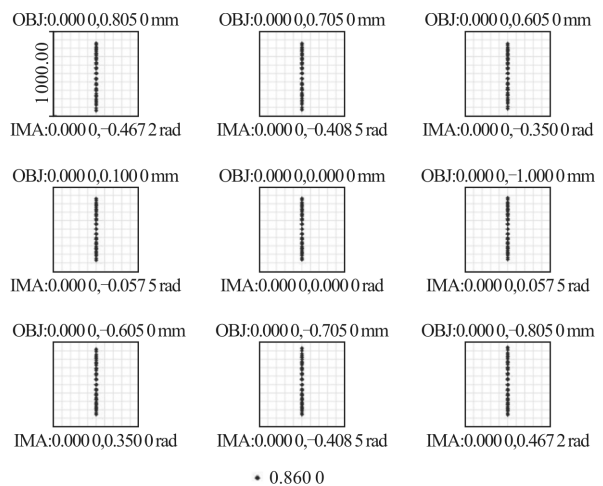


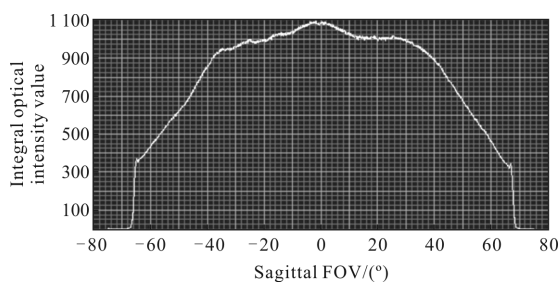
图 9 弧矢方向光束发散点列图

Fig.9 Spot diagram of divergence beam in sagittal direction

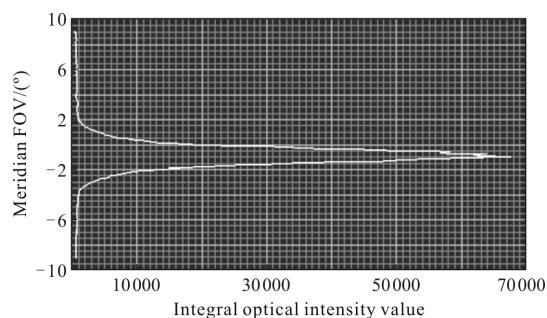
射光束满足子午方向准直、弧矢方向发散的一字扇形分布要求。另外,弧矢方向设计过程中,为了达到光束对称特性的指标要求,弧矢方向预留了 $\pm 0.5\text{ mm}$ 的调节余量,通过调节光学系统的中心与激光器中心的相对位置来满足对称性的要求。

4 测试结果

对上述光学系统进行加工、装调、测试,测试结果如图 10 所示。测试系统由旋转电机、线阵 CCD 及信号处理系统组成,通过扫描发射光学系统的每个视场的能量,得到如图 10 所示的弧矢及子午方向的光强积分图,图中的曲线表示了不同视场对应的能量。从图中可以看出,弧矢方向 3 dB 视场角为 122° ,子午方向 3 dB 视场角为 1.1° , $\pm 60^\circ$ 积分光强差为 0.8 dB。



(a) 弧矢方向光束的视场分布
(a) FOV of sagittal beam



(b) 子午方向光束的视场分布
(b) FOV of meridian beam

图 10 发射光学系统视场角测试结果

Fig.10 FOV test results of emission optical system

5 结论

针对激光引信圆周方向无漏探测、弹轴方向窄视场探测、小型化的技术要求,采用线型阵列排布的隧道结激光器作为发射光源,设计了短焦距大视场窄光束发射光学系统,该系统体积为 $8\text{ mm}\times 8.2\text{ mm}\times 15\text{ mm}$,弧矢方向探测视场达 120° ,可满足激光引信小型化无漏探测的设计需求。

参考文献:

- [1] Zheng Dayong. Reserch on emission system of LD laser fuze [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2011. (in Chinese)
- [2] Hou Suxia, Luo Jijun, Zhao Fuyu, et al. Study on laser fuse detection technique [J]. Optical Technique, 2006, 32 (8): 605-609. (in Chinese)
- [3] Shi Chunbo, Ma Xianhua. Analysis of the detecting visual field influenced on the operation distance of the laser fuse[J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(6): 368-371. (in Chinese)
- [4] Zhang Zhenghui, Yang Ming, Xu Shiwen. Analysis of FOV configuration in laser proximity fuze [J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(6): 700-704. (in Chinese)
- [5] Gan Lin, Zhang He, Zhang Xiangjin. New optical field receiving technology in laser fuze[J]. Acta Photonica Sinica, 2013, 42(12): 1514-1518. (in Chinese)
- [6] Gan Lin, Zhang He, Zhang Xiangjin. Research on large FOV single transceiver bidirectional-driving detection technology for laser fuze [J]. Acta Armamentarii, 2013, 34 (8): 942 - 947. (in Chinese)
- [7] Lv Hua, Yao Hongbao, Chen Ping. Target identifying of large visual angle to the laser fuze [J]. Infrared and Laser Engineering, 2005, 34(4): 427-429. (in Chinese)
- [8] Wang Xiaoju. A laser beam shaping optical system for laser fuze[J]. Aero Weaponry, 2012, 5(10): 56-60.
- [9] Yu Daoyin, Tan Hengying. Engineering Optics [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2011: 171-175. (in Chinese)