

离轴抛物面镜准直输出辐照度特性

邹百英¹, 赵慧洁¹, 张 颖¹, 李建华²

- (1. 北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191;
2. 试验物理与计算数学国家级重点实验室, 北京 100076)

摘要: 基于离轴抛物面镜的准直光学系统因其无色差、材料易得、工作谱段宽、无中心遮挡等优点被广泛应用于传感系统校准、辐射测量、红外目标模拟器等系统中。为了分析设计的准直系统是否满足实际需求, 对准直系统输出的辐照度特性进行了理论分析及仿真研究。基于辐照度传输模型给出了准直系统输出面辐照度分布表达式, 并给出了准直光束发散角与抛物面焦距、光源口径及离轴角之间等的定量关系。采用光线追迹方法仿真分析了准直系统在不同光源口径情况下的输出面辐照度分布情况, 并对输出辐照度均匀性进行了定量分析。文中所提出的分析方法对提高离轴抛物面镜的准直性和输出辐照度均匀性有重要的意义。

关键词: 辐照度分析; 准直光学系统; 离轴抛物面镜; 辐照度传输模型; 光线追迹
中图分类号: O439 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)02-0688-05

Irradiance characteristics for the off-axis parabolic collimating mirror

Zou Baiying¹, Zhao Huijie¹, Zhang Ying¹, Li Jianhua²

- (1. School of Instrumentation Science & Opto-electronics, Beihang University, Beijing 100191, China;
2. National Key Laboratory of Science and Technology on Test Physics & Numerical Mathematics, Beijing 100076, China)

Abstract: Off-axis parabolic mirror has been widely used in sensor calibration, radiation measurement, infrared target simulation system and so on, because it takes many advantages such as no chromatic-aberration, common used material, broadband, no center block. The irradiance characteristic of the off-axis parabolic collimating mirror was evaluated by both theoretical analysis and simulation study. Both the expression for the irradiance distribution on the exit pupil plane of the off-axis parabolic collimator and the relations between the angle of divergence and the parameters of the collimator such as the focal length of the mirror, the aperture size of the source and the angle of off axis, were theoretically derived based on the radiation transfer model. The irradiance distribution on the exit pupil plane of the collimator was simulated by ray tracing method. The uniformity of the distribution was also analyzed. The method proposed here is useful to increase the collimation and uniformity of the off-axis parabolic mirror.

Key words: irradiance analysis; collimator; off-axis parabolic mirror; radiation transfer model; ray tracing

收稿日期: 2014-06-14; 修订日期: 2014-07-15

基金项目: 国家自然科学基金(61227806, 61107013)

作者简介: 邹百英(1982-), 女, 博士生, 主要从事遥感器辐射定标方面的研究工作。Email: zoubaiying2006@126.com

导师简介: 赵慧洁(1966-), 女, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事高光谱遥感、光电测量方面的研究工作。Email: hjzhao@buaa.edu.cn

0 引言

准直光学系统广泛应用于红外目标模拟器及辐射定标等系统的研制中,是一种综合型光学检测基础设备^[1-3]。准直光学系统一般由基准辐射源、准直镜及相关机械结构构成。对于工作中远红外波段的准直系统,一般采用黑体作为辐射源,准直镜则一般采用反射式光学系统^[4]。基于离轴抛物面镜的准直光学系统因其无中心遮拦、无色差、材料易得、光能利用率高、工作谱段宽、光路可折叠,结构相对比较紧凑等优点受到了人们的重视^[5-7]。

随着基于离轴抛物面镜的准直光学系统越来越普遍的应用,在准直系统研制过程中,评价理想情况下准直系统性能以及确定其系统参数对准直系统性能的影响对于系统的研制具有积极的意义。准直光学系统的评价指标主要包括出射辐照度大小、均匀性及准直性;系统参数主要有黑体光阑孔径(即光源口径)、抛物镜焦距、离轴角等。已有文献采用矢量方程的分析方法对抛物镜进行空间光线的追迹,仿真计算分析了离轴量等参数对准直光束发散角的影响^[8]。对于基于抛物面镜的准直系统辐照度的出射情况,文献报道较少。传统的性能分析主要集中在像质、MTF 等的分析。文中首先基于辐照度传输模型对离轴抛物面准直光学系统出瞳处辐照度的分布、准直性进行了理论分析,导出了相应的计算表达式,为系统参数的选择提供了指导。然后使用 ZEMAX 软件进行光线追迹,对准直性及辐照度输出进行了全面的仿真分析并对理论分析进行了验证,给出了准直系统出瞳处的辐照度二维分布图及均匀性大小值。

1 离轴抛物面输出辐照度特性分析模型

如图 1 所示,假设准直光学系统由一个具有朗伯特特性的圆形孔径的面辐射源(source)和离轴抛物面镜(off-axis parabolic mirror, OAPM)组成。辐射源的辐亮度为 L_s ,光源半径为 r_s ,面积为 A_s ;离轴抛物面镜口径为 d ,焦距为 f ,反射率为 ρ ,离轴角为 φ 。光源中心与离轴抛物面镜焦点重合,且光源中心处的法线与抛物镜中心与焦点连线重合。在离轴抛物面镜中心正前方设置接收面,即出瞳面(exit pupil plane)。

理想情况下,接收面上将形成以中心线与接收面的交点为圆心的光斑。

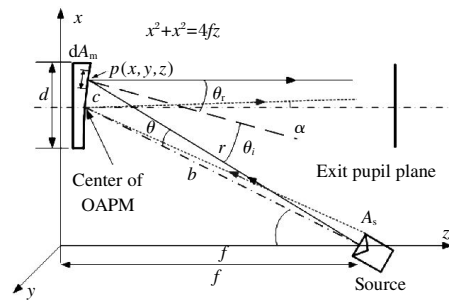


图 1 离轴抛物面镜输出辐照度特性分析示意图

Fig. 1 Schematic of off-axis parabolic mirror for the analysis of irradiance characteristic

由辐照度传输模型可知,面光源与在与之距离为 r 处的表面形成的辐照度可由图 2 进行分析。图中 dA_s 代表光源的元发光面积,它在与之距离为 r 、面积为 dA 平面上形成的辐照度为 E ,则有^[9]

$$E = \frac{L_s \cos \theta_1 \cos \theta_2 dA_s}{r^2} \quad (1)$$

式中: L_s 为光源的辐亮度; θ_1 和 θ_2 分别为发光面 dA_s 和被照面 dA 的法线与 r 方向的夹角。

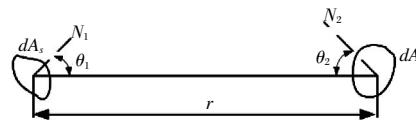


图 2 面光源在与之距离为 r 的表面上形成的辐照度分析示意图

Fig. 2 Schematic for the analysis of irradiance of an area source with distance of r

根据上述辐照度传输原理及相应的几何关系,可以推导光源中心区域 dA_s 发出的光在离轴抛物面上的辐照度分布。由式(1)可知,光源在抛物镜面上任意一点 p 对应的微面元 dA_m 的辐照度为:

$$E = \frac{L_s \cos \theta \cos \theta_i dA_s}{r^2} \quad (2)$$

式中: L_s 为光源辐亮度; θ 为入射光线与光源中心到抛物面镜中心连线的夹角; r 为光源中心到离轴抛物面镜上任意一点 p 之间距离, p 点坐标为 (x, y, z) ,且满足抛物面方程 $x^2 + y^2 = 4fz$; θ_i 为入射角。根据几何原理有, r 及 $\cos \theta$ 的表达式如下:

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + (f - \frac{x^2 + y^2}{4f})^2} \quad (3)$$

$$\cos \theta = \frac{r^2 + b^2 - c^2}{2rb} \quad (4)$$

式中: b 为光源中心到离轴抛物面镜中心的距离; c 为入射点 p 到离轴抛物面镜中心点距离, 设离轴抛物面中心点坐标为 $(x_0, 0, z_0)$, 由几何关系可得:

$$\begin{cases} x_0 = \frac{2f \sin \varphi}{1 + \cos \varphi} \\ z_0 = \frac{f(1 - \cos \varphi)}{1 + \cos \varphi} \end{cases} \quad (5)$$

同理, b 和 c 的表述式可写为:

$$b = \sqrt{x_0^2 + (f - z_0)^2} = 2f / (1 + \cos \varphi) \quad (6)$$

$$c = \sqrt{(x - x_0)^2 + y^2 + (z - z_0)^2} \quad (7)$$

则由抛物面上 dA_m 区域反射的出射光辐照度有:

$$E_o = \rho E / \cos \theta_r \quad (8)$$

由于入射角等于出射角, 即 $\theta_i = \theta_r$ 。故出射光线的辐照度可写为:

$$E_o = \frac{\rho L_s A_s \cos \theta}{r^2} \quad (9)$$

将式(3)、(4)、(6)及(7)带入式(9)有:

$$E_o = \frac{\cos \theta}{r^2} = \frac{\left(\frac{6f^2 \cos^2 \varphi + 2f^2}{1 + \cos \varphi} + 4xf \sin \varphi - (x^2 + y^2) \right)}{4 \left(x^2 + y^2 + \left(f - \frac{x^2 + y^2}{4f} \right)^2 \right)^{\frac{3}{2}}} / (\rho L_s A_s) \quad (10)$$

根据式(10)可以得到抛物面镜每点的出射光线辐照度 E_o 与其坐标点及离轴角等参数的关系式。由式(9)可以看出, 抛物面镜出射光的辐照度大小与光源的辐亮度、光源的发光面积成正比。带入具体数据可以计算得到输出辐照度的分布情况, 如图 3 所示为归一化的辐照度分布情况, 其对应的离轴抛物面镜焦距 $f=956 \text{ mm}$, 离轴角 $\varphi=10^\circ$ 。可以看到, 即使是点光源发出的光照射到抛物面镜后的辐照度分布也不是完全均匀的, 如图所示的正方形口径大小的区域, 最大辐照度与最小辐照度相差约为 3%, 辐照度最大值位于抛物面镜的边缘位置。需要说明的是, 图中的坐标与图 1 的坐标存在平移, 图中的中点坐标

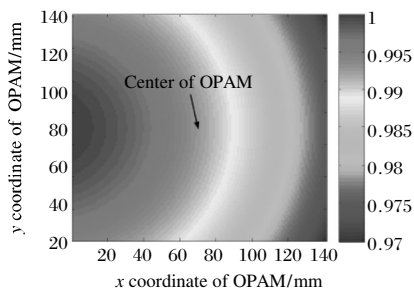


图 3 离轴抛物面镜表面归一化辐照度分布

Fig. 3 Normalized irradiance distribution on the OAPM surface

(70, 70)与图 1 中的离轴抛物面的中心点相对应。

当光源亮度一定时, 增大光源面积能够显著提高出射光线的辐照度。但是, 增大光源面积不可避免引入了新的问题, 即出射光线的准直性变差。如图 1 所示, 光源边缘发出的光经抛物面反射后与水平方向的夹角为 α , 定义该角度为准直系统的发散角, 近似有

$$\alpha = \frac{r_s}{b} = \frac{r_s(1 + \cos \varphi)}{2f} \quad (11)$$

由式(11)可以看出, 抛物面镜焦距越大、离轴角越大、光源的半径越小, 出射光线的发散角越小, 准直性越好。需要说明的是, 准直性的好坏取决于应用的需求, 发散角不一定是越小越好。比如目标模拟器, 需要准直系统输出的平行光具有一定的张角, 以便模拟不同视场的平行光^[3]。

2 辐照度光线追迹分析模型

前面的分析给出了光源中心照射抛物面镜时的输出辐照度分布表达式, 但当光源有一定尺寸时, 偏离中心点的光将不能使用上面的理论模型对输出辐照度的分布进行很好的分析, 因为此时出射的光不再是严格的准直光束, 出瞳处的辐照度分布与出瞳的位置密切相关。此文使用光线追迹法进行进一步的分析。最常用的光线追迹算法为蒙特卡洛法 (Monte-Carlo)^[10]。一般来说, 当追迹光线数量较少的时候, 会引起较大的随机误差, 而追迹的光线越多, 最后的分析结果随机误差越小, 但是所需要的计算时间会增多。有分析表明光线追迹数量到一百万条时, 其对系统精度的影响可以忽略, 能够满足高精度模拟仿真的要求^[10]。此文采用 ZEMAX 软件实现光线的追迹计算。

3 光线追迹分析结果及分析

待追迹分析的准直系统参数如下: 离轴抛物面镜口径 $d=140 \text{ mm}$; 焦距 $f=956 \text{ mm}$; 离轴角 $\varphi=10^\circ$, 出瞳面到抛物面镜中心距离 1000 mm 。上述参数对应的光路图如图 4(a)所示。

3.1 离轴抛物镜准直性能分析

首先分析出射光线的准直性, 采用 ZEMAX 的“Afocal Image Space”模式进行分析, 该模式专门针对出射光线为平行光的系统 (即无焦系统), 可以直

接分析出射光线的发散角等参数。当入射光源为一个理想点光源时, 准直出射光线应该为理想的平行光, 此时 ZEMAX 分析得到的发散角为 0° , 如图 4(b) 所示, 与理论预期吻合。当光源半径为 5 mm 时, 从图中可直接读出对应的发散角为 0.005 2 rad; 当半径为 10 mm 时, 对应的发散角为 0.010 4 rad。借助 ZEMAX 的点列图可以看到, 除中心光源外的出射光线都存在一定的弥散。需要指出的是, 在“Afocal Image Space” 模式下, 点列图输出的结果单位为弧度, 而不是长度。

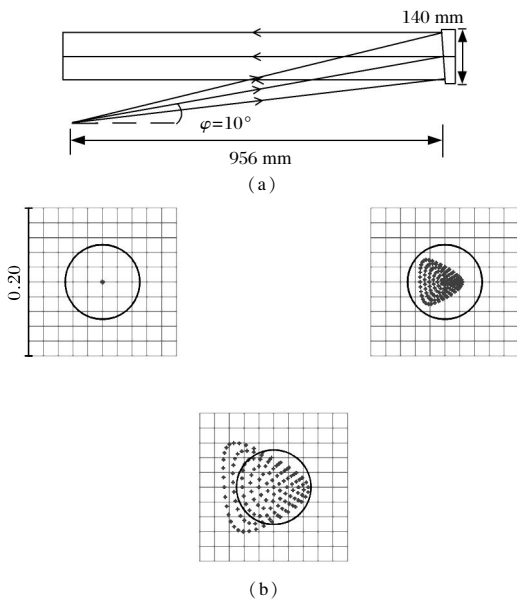


图 4 离轴抛物面在 ZEMAX 中结构图及准直结果点列图

Fig.4 Layout of OAPM in ZEMAX and spot diagram of analysis results

采用上述分析方法, 针对不同的光源口径, 使用 ZEMAX 可以计算得到其对应的发散角。图 5 为 ZEMAX 计算结果与使用式(11)计算结果比较图, 可以看到, 使用式 (11) 进行理论计算得到的结果与

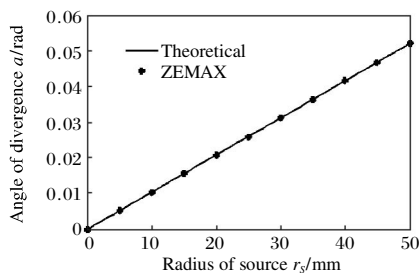


图 5 采用 ZEMAX 和理论分析公式计算离轴抛物面镜的发散角
Fig.5 Relationship between angle of divergence and radius of source by ZEMAX and theoretical calculation

ZEMAX 计算结果完全吻合。发散角与光源的半径成线性关系, 光源半径越大, 发散角越大。

3.2 离轴抛物镜辐照度输出均匀性分析

为了进行光线追迹分析得到辐照度的输出分布情况, 采用 ZEMAX 的非序列模型 (Non-Sequence Mode)。首先将前面定义的抛物面镜面型导入, 再定义光源特性及出瞳面的位置, 然后进行追迹运算。ZEMAX 光线追迹光路的示意图如图 6 所示, 从光源发出的光线经过离轴抛物面镜反射后传播到出瞳处, 出瞳位置距抛物面中心 1 000 mm。为了得到可靠的结果, 共追迹了一千万条光线, 其中光源发出的光打在离轴抛物面镜有效尺寸内的光线约为 960 万条, 在普通的个人电脑上 (CPU: 2.2 GHz, 内存: 4 G), 光线追迹时间约为 35 s, 执行效率很高, 系统光线的利用率为 96%。图 7 为光源半径为 5 mm 时的辐照度输出分布, 从图中可以看到, 辐照度分布总体比较均匀, 成圆形分布, 光斑大小与抛物面镜的口径基本相当, 图中的黑色矩形尺寸为 150 mm×150 mm。

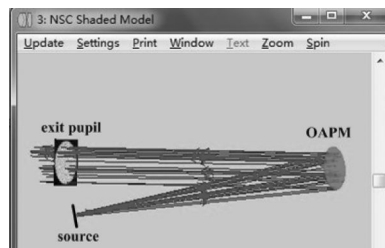


图 6 ZEMAX 光线追迹计算出瞳处辐照度分布示意图

Fig.6 Schematic of ray tracing for calculation of irradiance distribution on exit pupil plane of OAPM

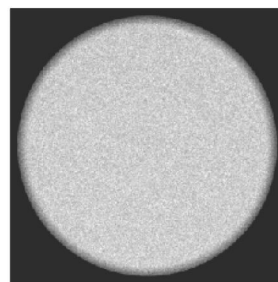


图 7 光源半径为 5 mm 时出瞳处辐照度分布计算结果

Fig.7 Calculation result of irradiance distribution on exit pupil plane when radius of source is 5 mm

为了定量分析出射辐照度的均匀情况, 截取出瞳中心线的分布如图 8 所示, 其中虚线为光源口径为 1 cm 的分布, 实线为光源口径为 1.5 cm 及 2 cm

的分布,可以看到,三者的分布规律基本一样,辐射光场能量主要集中在与抛物面镜口径大小对应的 $-70 \sim +70$ mm 之间,辐照度分布函数类似于一个矩形函数,光源半径越小,辐照度分布的形状越接近矩形函数,边缘区域的辐照度变化速度越快。在辐射定标等实际应用中,由于边缘区域辐照变化很大,不够均匀,一般只使用中心均匀性较好的部分。定义输出辐照度均匀性为:

$$\eta = 1 - \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i (E_i - \bar{E})^2} / \bar{E} \quad (12)$$

式中: E_i 为出瞳面每个单元格的辐照度大小; N 为待分析的单元格总数; \bar{E} 为待分析单元格辐照度的平均值。根据式(12),分析光斑中心口径为 120 cm 部分,可以分别计算得到三者的辐照度均匀性分别为 0.980 4、0.978 3 和 0.978 9。可以看到,在此文的参数条件下,基于离轴抛物面镜的准直光学系统输出的辐照度均匀性可以很高,基本不受光源大小的影响。

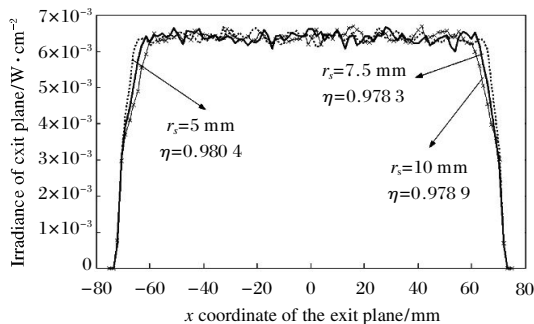


图 8 不同光源口径对应的出瞳中心线辐照度分布图

Fig.8 Irradiance distribution on center line exit pupil plane for different size of source aperture

4 结 论

基于理论推导和仿真计算两种方法对抛物面镜准直系统的输出特性进行了分析和研究,分析结果可以从理论上判断设计的准直系统性能是否满足实际的需求。采用辐照度传输模型从理论上给出了系统点光源对应的出射面处的辐照度分布关系式,分析表明,抛物面镜每点的出射光线辐照度与其坐标点及离轴角等参数相关;对于发散角,抛物面镜焦距及离轴角越大、光源的半径越小、出射光线的发散角越小,准直性越好。使用 ZEMAX 软件进行光线追迹仿真分析了出瞳处的辐照度分布情况,分析表明,对

于离轴抛物面镜口径 $d=140$ mm,焦距 $f=956$ mm,离轴角 $\varphi=10^\circ$,出瞳面到抛物面镜中心距离 1 000 mm 的准直系统,当光源半径为 5 mm 及 10 mm 时,其对应的发散角分别为 0.005 2 rad 和 0.010 4 rad,出瞳处辐照度分布均匀性分别为 98.04% 及 97.89%。分析表明,发散角的理论和仿真计算方法结果互相吻合很好。文中所提出的分析方法对提高离轴抛物面镜的准直性和输出辐照度均匀性有重要的意义。

参考文献:

- [1] Yue Feng, Zhu Jianqiang, Zhao Dongfeng. Study on focusing characteristic of large aperture off-axis paraboloidal mirror in the high-energy petawatt laser system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(9): 144-152. (in Chinese)
- [2] Zhang Ying, Ding Zhenmin, Zhao Huijie, et al. Rigid-body displacement separation of optics in optical-structural-thermal integrated analysis[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(10): 2763-2767. (in Chinese)
- [3] Liang Pei, Gao Jiaobo. Spectroradiometric calibration of IR target simulator[J]. *Laser & Infrared*, 2003, 33(3): 197-199. (in Chinese)
- [4] Xu Jun, Meng Binghuan, Zheng Xiaobing, et al. Development and calibration of infrared standard radiometer[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(4): 863-868. (in Chinese)
- [5] Yu Jian, Zhang Guoyu. Design of the off-axis parabolic reflective collimator for calibrating the infrared probe for small field [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2010, 33(1): 8-10. (in Chinese)
- [6] Gu Xiaochao, Hu Wenwen, Huang Lili, et al. Design of the off-axis collimator[J]. *Laser & Infrared*, 2008, 38(5): 472-473. (in Chinese)
- [7] Malone R M, Dolan D H, Hacking R G, et al. IR spectrometer using 90-degree off-axis parabolic mirrors[C]// SPIE, 2008, 7068: 706808.
- [8] Liang Pei. Study on collimation property of off-axis parabolic mirror[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(06): 909-913. (in Chinese)
- [9] Yu Daoyin, Tan Hengying. *Engineering Optics* [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2006: 67-68. (in Chinese)
- [10] Zhang Kun, Chen Haiqing, Liao Zhaoshu, et al. Monte Carlo simulation for the radiation characteristics of infrared light source[J]. *Laser & Infrared*, 2010, 40(5): 491-495. (in Chinese)