

文章编号: 1002-2082(2008)02-0216-04

Cassegrain 激光发射系统的光路设计

毛红敏, 徐 静, 甄胜来, 马玉芬, 俞本立

(安徽大学 光电信息获取与控制教育部重点实验室, 安徽 合肥 230039)

摘要: 为了提高激光探测系统激光的发射功率, 在出射激光为基模的高斯光束的光路设计中, 根据高斯光束经过光学系统的变换与传输特性, 分析了系统采用 Cassegrain 望远镜时, 其遮拦比以及入射光束腰半径对光功率透过率的影响。通过具体的数值计算得出, 随着遮拦比及入射光束腰半径的增大, 系统光功率透过率将减小, 给出了望远镜遮拦比与发射孔径处光斑尺寸之间的最佳匹配关系, 最后讨论了离焦误差(安装误差)为 0.2 mm 时对出射光斑尺寸的影响。

关键词: Cassegrain 望远镜; 遮拦比; 高斯光束; 离焦量

中图分类号: TN958.98

文献标志码: A

Optical path design for Cassegrain laser transmitting system

MAO Hong-min, XU Jing, ZHEN Sheng-lai, MA Yu-fen, YU Ben-li

(Key Laboratory of Opto-electronic Information Acquisition and
Manipulation, Anhui University, Hefei 230039, China)

Abstract: In order to improve the laser transmitting power of laser detection system, assuming exit laser is a fundamental mode Gaussian beam, the effect of the obscuration ratio of Cassegrain telescope and the waist radius of the incident light beam on the light power transmission was analyzed based on the transformation and transmission characteristics of Gaussian beam passing through the optical system. The numerical calculation indicates that the optical power transmission of the system decreases with the increase of the obscuration ratio and the waist radius of the incident light beam. The best match between the obscuration ratio and the spot size of the transmitting aperture was given. The effect of the defocusing error (installation error) of 0.2 mm on the spot size of emergent beam was discussed.

Key words: Cassegrain telescope; obscuration ratio; Gaussian beam; defocusing range

引言

随着激光通信、激光雷达等技术的日趋成熟, 大口径激光发射系统的应用愈来愈广, 特别是在军事方面。发射口径超过 250 mm 时, 基本上不可能用单一的纯透镜系统, 而是广泛采用反射式两镜系统^[1]。实际工程应用中, 发射系统一般采用 Cassegrain 望远镜, 激光束经过室内光路及 Cassegrain 望远镜扩

束时, 由于其副镜的遮拦造成输出一个圆环形光束(此空心光束的内圆即系统的遮拦, 遮拦比为空心光束的内外径之比, 即 $\epsilon = a/b$)^[2-3], 不能再简单地把它看作实心光束来分析, 必须考虑遮拦比对高斯光束功率透过率的影响。因此, 定量考察系统遮拦比对光功率透过率的影响, 对于高斯光束的光路设计及实际激光工程应用都具有重要意义。

收稿日期: 2007-09-30; 修回日期: 2007-11-04

基金项目: 安徽省优秀青年科技基金(04042045); 安徽省高校青年教师科研“资助计划”基金(2005jq1027)

作者简介: 毛红敏(1976—), 女, 博士生, 主要研究方向为激光测量系统的光学设计、加工、检验和分析。

E-mail: hongminmao@ahu.edu.cn

本文利用数值方法对高斯光束在光学系统中的传输进行了定量的计算分析,讨论了不同遮拦比及入射光束束腰半径对光功率透过率的影响,并给出了遮拦比与发射孔径处的光斑尺寸之间的最佳匹配关系。

1 设计原理与方法

1.1 高斯光束在光学系统中的传输与变换规律

基模高斯光束通过薄透镜的传输规律^[4]为

$$w_1^2 = \frac{w_0^2}{(1 - \frac{s_0}{f})^2 + \frac{\pi^2 w_0^4}{\lambda^2 f^2}} \quad (1)$$

$$s_1 = f - \frac{f - s_0}{(1 - \frac{s_0}{f})^2 + \frac{\pi^2 w_0^4}{\lambda^2 f^2}} \quad (2)$$

式中: w_0 为入射光束束腰半径; w_1 为出射光束束腰半径; s_0 为入射光束束腰到薄透镜的距离; s_1 为从薄透镜出射的光束束腰与薄透镜的距离; f 为薄透镜的焦距。图 1 为以上各参数的示意图。

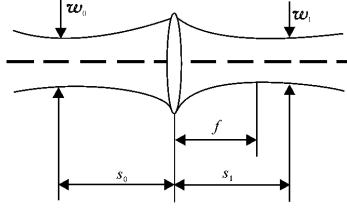


图 1 高斯光束通过薄透镜的变换

Fig. 1 Transformation of Gaussian beam through lens

为了使系统小型化,同时满足大功率发射的需要,激光发射系统一般采用 Cassegrain 望远结构,高斯光束通过 Cassegrain 望远系统传输的示意图如图 2 所示。

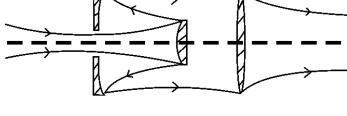


图 2 高斯光束通过 Cassegrain 望远系统传输示意图

Fig. 2 Transmission of Gaussian beam through Cassegrain telescope system

在具体的高斯光路分析中,我们将 Cassegrain 望远系统等效为一圆环形薄透镜,激光束经过扩束透镜扩束后,再经过望远系统在不同距离处会聚,其原理如图 3 所示。图中 f_1 为扩束透镜的焦距; f_2 为望远镜的等效焦距; R 为距离望远镜 s_3 处的光

斑半径; Δ 定义为离焦量 ($\Delta = s_2 - f_2$);其余参数同前面的定义。通过(1)式和(2)式可以建立出射光斑半径 R 与离焦量 Δ 之间的关系。即:

$$R = w_1 \sqrt{\frac{s_3 - f_2}{\Delta}} \quad (3)$$

式中 w_1 的大小由(1)式决定。

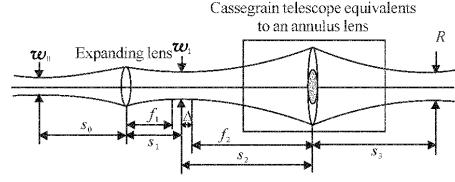


图 3 高斯光束通过扩束透镜和等效望远系统的传输与变换原理图

Fig. 3 Propagation and transformation of Gaussian beam through expanding lens and equivalent telescope system

1.2 光学系统的功率透过率

光束通过光学器件会有端面反射损失以及吸收损失,这部分损失将无法避免,一般都是采用镀增透膜或高反膜尽可能减小这部分损失,在此不考虑。此处重点分析 Cassegrain 望远镜的遮拦比对系统光功率透过率的影响。

高斯光束 TEM₀₀ 模在某一横截面上的光场振幅分布^[4]为

$$A(r) = A_0 \exp\left(-\frac{r^2}{w^2}\right) \quad (4)$$

光强分布为

$$I(r) = I_0 \exp\left(-\frac{2r^2}{w^2}\right) \quad (5)$$

式中: r 为截面距光斑中心的距离; w 为该截面处的光斑半径。

若 Cassegrain 望远镜的遮拦比为 $\epsilon = a/b$,高斯光束通过望远镜的功率 P 与总的功率 P_∞ 之比称为功率透过率,其关系为

$$T = \frac{P}{P_\infty} = \frac{\int_a^b \int_0^{2\pi} I(r) 2\pi r dr d\theta}{\int_a^\infty \int_0^{2\pi} I(r) 2\pi r dr d\theta} = \frac{1/2(e^{-2a^2/w^2} - e^{-2b^2/w^2})w^2}{w^2/2} = e^{-2a^2/w^2} - e^{-2b^2/w^2} \quad (6)$$

高斯光束与 Cassegrain 望远镜遮拦比的关系如图 4 所示。

从(6)式可知,遮拦比与发射孔径处的光斑尺

寸之间存在一个使得功率透过率最大的最佳匹配关系,即当遮拦比确定时,就会有一个与之相匹配的最佳光斑尺寸。这个最佳光斑尺寸同时又会影响扩束透镜焦距的选择以及出射光斑的大小。因此,在实际的光路设计中,当 Cassegrain 望远镜遮拦比一定时,发射孔径处的最佳光斑尺寸在整个光路设计中至关重要。

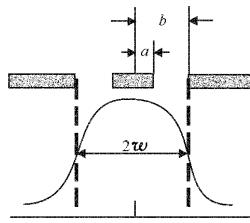


图 4 高斯光束与 Cassegrain 望远镜遮拦比的关系示意图

Fig. 4 Gaussian beam versus the obscuration ratio of Cassegrain telescope

2 实例计算与分析

根据以上分析,表 1 给出了采用 3 种不同口径和不同遮拦比的 Cassegrain 望远镜时,系统的最大功率透过率以及对应的发射孔径处的最佳光斑尺寸。图 5 是对应表 1 中 3 种不同遮拦比条件下功率透过率随发射孔径处的光斑尺寸的变化关系图。从表 1 或图 5 中可以看出,随着 Cassegrain 望远镜遮拦比减小,最大功率透过率增大。实际应用中,我们希望有最小的遮拦比,但不同口径的 Cassegrain 望远镜,其遮拦比受工艺技术的限制,因此要结合系统的成本及小型化等因素具体分析。

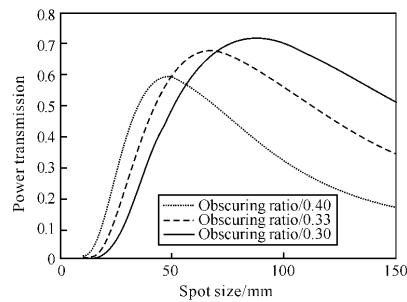


图 5 不同遮拦比条件下功率透过率随发射孔径处光斑尺寸的变化

Fig. 5 Variation of power transmission with spot size at transmitting aperture at different obscuration ratios

表 1 不同遮拦比条件下光学系统的最大功率透过率

Table 1 Maximum power transmission of optical system at different obscuration ratios

望远镜口径/mm	遮拦比	最佳光斑尺寸/mm	最大功率透过率
100	$\epsilon = 20/50 = 0.40$	48	0.592
150	$\epsilon = 25/75 = 0.33$	67	0.675
200	$\epsilon = 30/100 = 0.30$	87	0.717

对于 $s_0 = 70$ mm, $f_1 = 4.4$ mm, $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$, 当入射光束束腰半径 w_0 从 0.18 mm 变化到 0.22 mm, 采用不同遮拦比的望远镜时, 系统功率透过率也将随之变化, 具体变化量值如表 2 所示。从表 2 可以看出, 随着入射光束束腰半径的增大, 系统功率透过率将减小, 但变化量都不大。

表 2 不同遮拦比条件下功率透过率随入射光束束腰半径的变化量

Table 2 Variation of power transmission with waist radius of incident beam at different obscuration ratios

入射光束束腰半径变化/mm	望远镜遮拦比 ϵ	功率透过率变化量
	0.40	0.563~0.551(-0.012)
0.18~0.22	0.33	0.537~0.516(-0.021)
	0.30	0.552~0.530(-0.022)

表 3 给出了采用上述 3 种不同型号的望远镜时, 系统最佳离焦量, 400 m 处的光斑半径, 离焦误差(安装误差)对出射光斑尺寸的影响以及满足最大功率透过率时扩束透镜焦距的选择(注: 表 3 中计算所用到的其他参数为 $w_0 = 0.2$ mm, $s_0 = 70$ mm, $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$)。从表 3 中的计算结果可知, 当离焦误差(安装误差)为 0.2 mm 时, 对出射光斑尺寸影响不大; 采用不同遮拦比的望远镜以满足最大功率透过率, 随着遮拦比的减小, 扩束透镜的焦

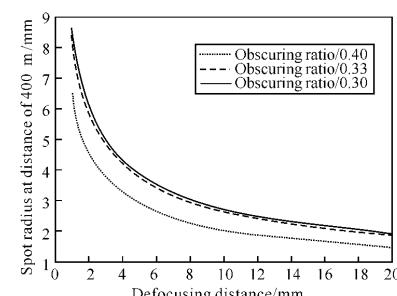


图 6 400 m 处的光斑半径与离焦量 Δ 之间的函数关系图

Fig. 6 Function relation between defocusing range Δ and spot radius at 400 m

距增大。相反,由光路可逆原理可知,只要给定一组初始入射参数,同样可以确定满足最大功率透过率

时的最佳遮拦比。图6所示为400 m处的光斑半径与离焦量 Δ 之间的函数关系。

表3 采用不同型号 Cassegrain 望远镜时对应的最佳离焦量和400 m处的光斑半径

Table 3 Optimum defocusing range and spot radius at 400 m using different type of Cassegrain telescopes

望远镜口径/mm	遮拦比	望远镜焦距/mm	最佳离焦量/mm	400 m处光斑半径/mm	离焦误差(安装误差)/mm	半径变化量/mm	最大透过率对应的扩束透镜焦距/mm
100	0.40	1000	2.5	4.11	0.2	0.18	5.4
150	0.33	1800	8.1	2.96	0.2	0.04	6.8
200	0.30	2400	14.5	2.27	0.2	0.02	7.1

3 结论

通过对基模高斯光束光学系统的变换特性的分析,提出了激光发射系统采用 Cassegrain 望远镜时的设计方案。在对一般变换规律分析的基础上给出了设计实例,并由此归纳出该方案在实际使用时需注意的问题。本文提出的设计方案对一般激光探测发射系统以及相干外差探测系统高斯本征光路设计具有参考价值。

参考文献:

- [1] 潘君骅. 大口径红外成像系统的光学设计[J]. 光学学报, 2003, 23(12): 1475-1478.
PAN Jun-hua. The methodic design of the IR imaging system with large aperture[J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(12): 1475-1478. (in Chinese)

- [2] 杜祥琬. 实际强激光远场靶面上光束质量的评价因素[J]. 中国激光, 1997, 24(4): 327-332.
DU Xiang-wan. Factors for evaluating beam quality of a real high power laser on the target in far field [J]. Journal of Chinese Lasers, 1997, 24(4): 327-332. (in Chinese)
- [3] VIRENDRA M N. Uniform versus Gaussian beams: a comparison of the effects of diffraction obscuration and aberrations[J]. J. Opt. Soc. Am. A, 1986, 3(4): 470-485.
- [4] 陈钰清, 王静环. 激光原理[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1992.
CHEN Yu-qing, WANG Jing-huan. Laser theory [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1992. (in Chinese)