

文章编号:1004-4213(2010)10-1775-5

子孔径布局对拼接光学系统像质的影响*

刘智颖,付跃刚,高天元,王志坚

(长春理工大学 光电工程学院,长春 130022)

摘要:由衍射理论模型出发,分析了子孔径布局对光学系统点扩散函数的影响,从而进行傅里叶变换计算出其对光学系统光学传递函数的影响;并由光学设计软件内嵌程序将子孔径布局实际地加入到设计的光学系统中,分析各种不同子孔径布局对光学系统像质的影响.通过由衍射理论出发的计算结果与设计软件内嵌程序的模拟仿真结果的对比,软件内嵌程序的模拟仿真结果得以验证.针对子孔径布局对具有相同相对孔径光学系统的影响进行了仿真计算,对与子孔径拼接原理样机具有相同相对孔径和中心遮拦比的反射式光学系统,针对相同孔径布局对其光学传递函数的影响进行了实际测试,通过仿真计算结果与测试结果的对比分析表明,孔径布局对具有相同相对孔径拼接光学系统的光学传递函数影响趋势一致的结论,从而为子孔径拼接原理样机研究的实用性及像质检测提供了理论依据.

关键词:拼接光学系统;子孔径布局;光学传递函数;相对孔径

中图分类号:TH706

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20103910.1775

0 引言

拼接光学系统的成像性能很大程度上取决于其子孔径布局的形式,所以在拼接光学系统中准确分析孔径布局对像质影响是很重要的^[1].

江月松^[2]分析了子孔径尺寸效应,陈海亭^[3]针对二维圆周阵列的优化排列进行了研究,Tchermiavski 等^[4]根据系统光学传递函数的均方误差最小化准则研究了子孔径的空间排列方式,邓健等^[5]研究了镜面面形误差与失调误差对系统的影响,陈旗海等^[6]分析了子孔径像差对拼接系统像质的影响.

本文分别从理论计算与软件模拟仿真两方面对子孔径布局对拼接光学系统像质的影响进行了分析.首先,由衍射理论出发,分析子孔径布局对光学系统点扩散函数的影响,对点扩散函数进行傅里叶变换计算出其光学传递函数;其次,由光学设计软件内嵌程序将子孔径布局实际地加入到设计的光学系统中,可以更加实际地分析各种不同子孔径布局对光学系统像质的具体影响,避免了依靠经验判断的主观性以及理论计算与设计过程脱节等问题.本文还针对子孔径布局对具有相同相对孔径光学系统的影响进行了模拟仿真及测试,结果表明,孔径布局对具有相同相对孔径光学系统的光学传递函数影响趋

势一致,从而为子孔径拼接原理样机的实用性及像质检测提供了理论依据.

1 像质计算理论基础

设拼接光学系统的子孔径为圆形结构,子孔径直径为 d ,子孔径数目为 m ,拼接光学系统的点扩散函数为

$$h_1(x_i, y_i) = |\tilde{h}(x_i, y_i)|^2 = J \sum_{ij} e^{-j2\pi(\frac{x_i}{\lambda f} + \frac{y_i}{\lambda f} y_{ij})} \cdot J \sum_{ij} e^{j2\pi(\frac{x_j}{\lambda f} + \frac{y_j}{\lambda f} y_{ij})} = J^2 \sum_{ij} e^{-j2\pi(\frac{x_i}{\lambda f} + \frac{y_i}{\lambda f} y_{ij})} \cdot \sum_{ij} e^{j2\pi(\frac{x_j}{\lambda f} + \frac{y_j}{\lambda f} y_{ij})} = J^2 [m + \sum_{m>n} e^{j2\pi(\frac{x_i}{\lambda f}(x_m - x_n) + \frac{y_i}{\lambda f}(y_m - y_n))}] + J^2 e^{-j2\pi(\frac{x_i}{\lambda f}(x_m - x_n) + \frac{y_i}{\lambda f}(y_m - y_n))} \quad (1)$$

设 $J = \left(\frac{\pi d^2}{4\lambda f}\right)^2 \left[\frac{2J_1(\pi dr/\lambda f)}{\pi dr/\lambda f}\right]^2$ 傅里叶变换的模是直径为 d 的圆形孔径的调制传递函数 MTF_d , 则子孔径拼接系统的归一化调制传递函数为

$$MTF = MTF_d + \frac{1}{m} MTF_d * \sum_i \sum_j \delta\left(\xi - \frac{x_i - x_j}{\lambda f}, \eta - \frac{y_i - y_j}{\lambda f}\right) \quad (2)$$

式中 $(x_i - x_j, y_i - y_j)$ 表示子孔径的相对位置.

2 软件内嵌程序对子孔径布局影响的分析

将子孔径布局实际地加入到设计的光学系统中,由光学设计软件内嵌程序分析各种不同子孔径布局对光学系统成像质量的影响,可以使得孔径布

* 国防预研项目资助

Tel:0431-85583369

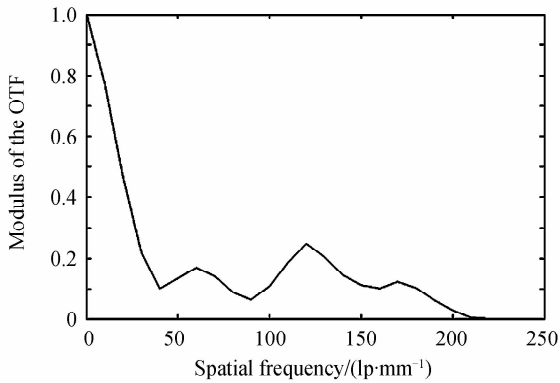
收稿日期:2010-05-07

Email:lzy@cust.edu.cn

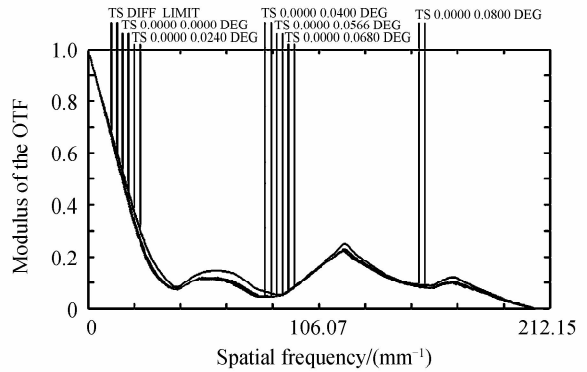
修回日期:2010-07-08

局的确定融入于设计过程中. 在保证光学系统像质前提下为子孔径拼接光学系统原理样机确定合理的孔径布局.

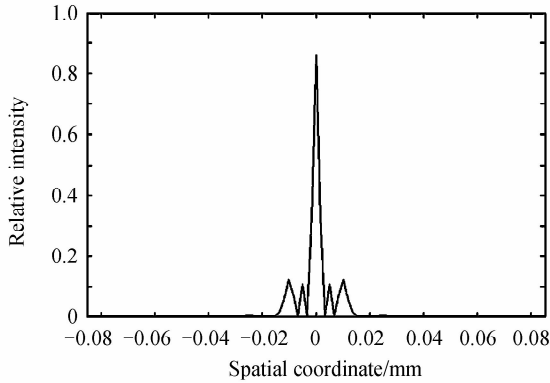
应用式(2)数学模型计算与应用软件内嵌程序模拟仿真得出的点扩散函数与光学传递函数的一维分布、二维分布分别如图 1.



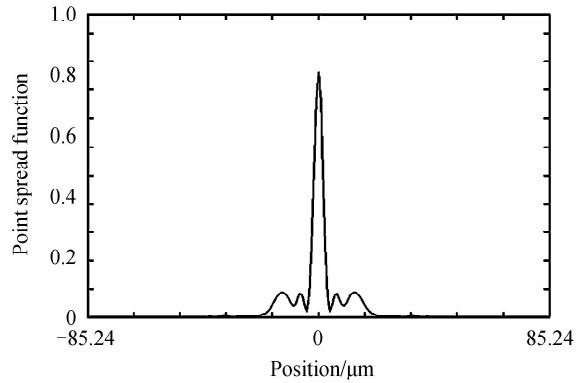
(a) Calculated result of one-dimensional optical transfer function



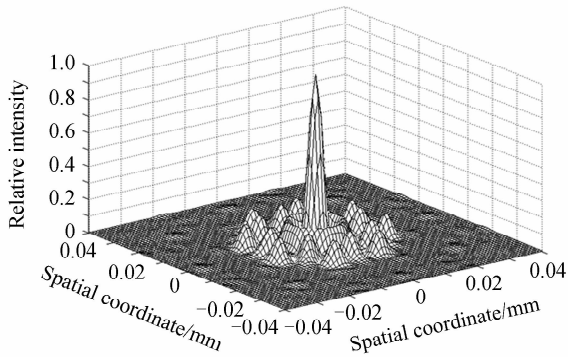
(b) Simulated result of one-dimensional optical transfer function



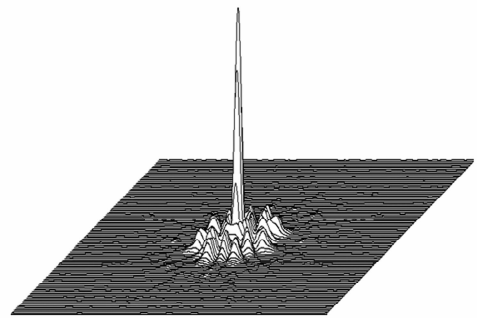
(c) Calculated result of one-dimensional point spread function



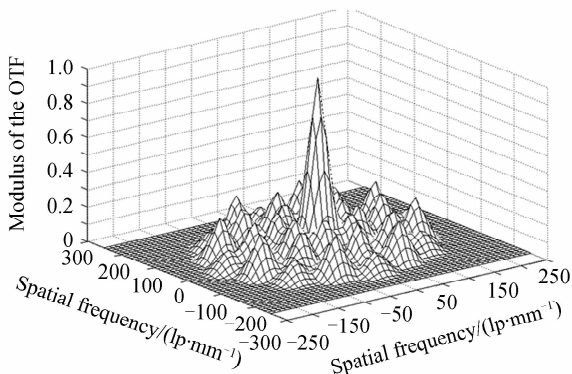
(d) Simulated result of one-dimensional point spread function



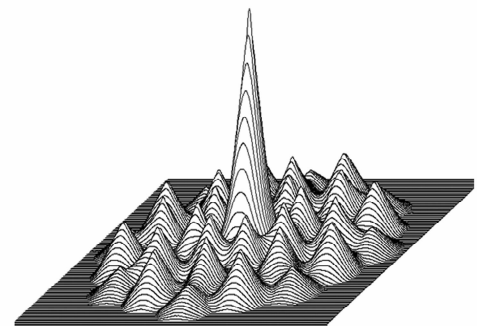
(e) Calculated result of two-dimensional point spread function



(f) Simulated result of two-dimensional point spread function



(g) Calculated result of two-dimensional optical transfer function



(h) Simulated result of two-dimensional optical transfer function

图 1 理论计算结果与软件内嵌程序模拟仿真结果对比
Fig. 1 Contrast between calculated results and embedded program simulated results

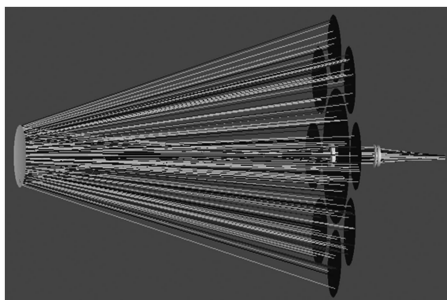
通过计算结果与模拟仿真结果的对比,应用内嵌程序的仿真结果与理论计算结果是吻合的. 通过将各种不同的孔径布局加入到所设计的光学系统中更加实际地分析孔径布局对像质的影响.

3 子孔径布局对具有相同相对孔径光学系统像质影响的分析

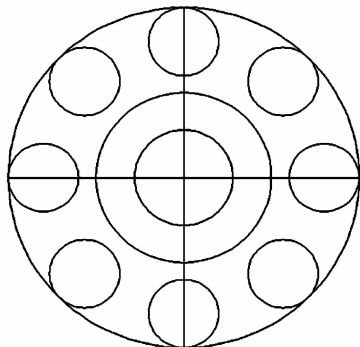
拼接光学系统的实际应用价值在于实现超大口径系统的加工,在真正进行超大口径系统加工生产之前需要从原理上验证其可行性,所以对于低成本的小型模拟拼接光学系统的研究是很重要的,而模拟拼接光学系统的光学参量需要满足能够更加真实地反映子孔径布局对拼接光学系统像质的影响.

通过分析子孔径布局对具有相同相对孔径光学系统像质的影响,从而为小口径模拟子孔径拼接光学系统的实用性提供理论依据.

针对具有相同相对孔径($D/f' = 1/8$)的口径分别为 $D=125\text{ mm}$ 与 $D=500\text{ mm}$,焦距分别为 $f' = 1\ 000\text{ mm}$ 与 $f' = 4\ 000\text{ mm}$ 的具有相同中心遮拦比的反射式光学系统进行对比,考察具有如图 2 相同形式子孔径布局的像质影响分析对比情况.



(a) Three-dimensional sub-aperture distribution of optical system



(b) Two-dimensional sub-aperture distribution of optical system

图 2 相同形式的子孔径布局

Fig. 2 The same sub-aperture distribution

由图 3(a)与(b)的对比,证明了子孔径布局对具有相同相对孔径的光学系统像质的影响趋势是一致的,当设计、加工结果与衍射极限的接近程度越好,所模拟仿真出的结果就越可靠,从而为采用具有相同相对孔径的小口径模拟拼接光学系统进行原理实验提供了理论依据. 小口径模拟拼接光学系统不

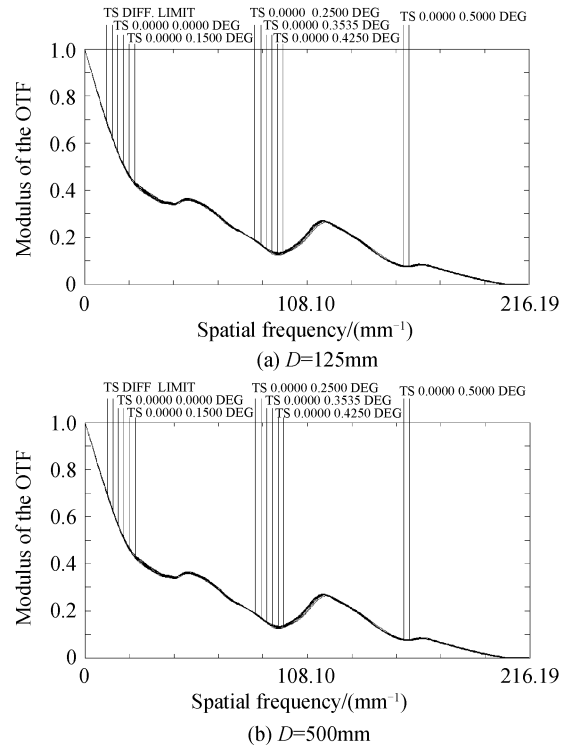


图 3 相同形式子孔径布局对 $D/f' = 1/8$ 的两个不同光学系统像质影响情况的对比

Fig. 3 Contrast between optical transfer functions of different optical systems with $D/f' = 1/8$ and the same sub-aperture distribution

但可以节省成本,而且其光学传递函数可以通过实际测量得出,通过测量结果与模拟仿真结果的对比进一步验证设计结果的可靠性.

4 孔径布局对光学系统像质影响的测试

由于拼接光学系统口径较大,所以直接测量其像质评价指标光学传递函数较为困难,通常采用对点扩散函数进行傅里叶变换计算光学传递函数,但是还是不够直观,所以需要模拟拼接光学系统的光学传递函数进行实际测量,通过测量的光学传递函数结果与仿真的孔径布局影响的光学传递函数结果对比,验证了模拟仿真结果的正确性.

应用由美国 Optikos 公司引入的光学传递函数测量仪,针对具有如图 1 的孔径布局对相对孔径($D/f' = 1/8$) $D=125\text{ mm}$ 的具有中心遮拦的反射式光学系统像质的影响进行了测试,测试装置见图 4,结果见图 5.

图 5 为对与子孔径原理样机具有相同相对孔径,相同孔径布局的拼接光学系统测试得到的光学传递函数曲线,通过与图 3(a)光学设计软件模拟的孔径布局对光学传递函数影响曲线的对比,表明虽然实际加工装调后的系统与衍射极限略有偏差,但是从中仍然可以看到子孔径布局对光学系统传递函

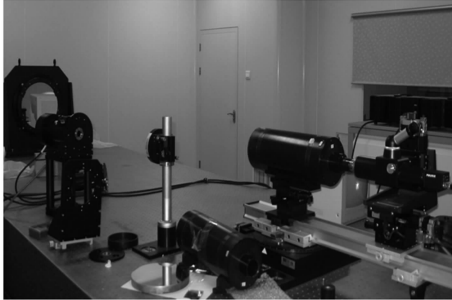


图4 子孔径布局对光学传递函数影响的测试装置
Fig. 4 Testing device for effect of sub-aperture distribution on optical transfer function

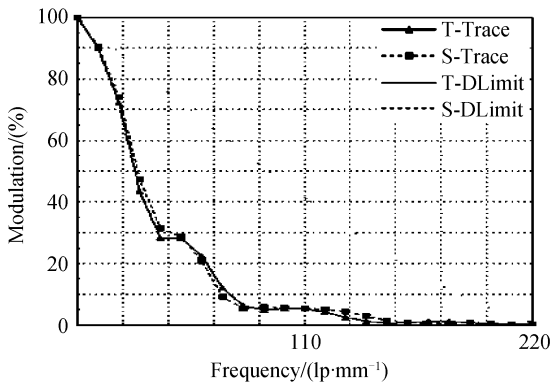


图5 子孔径布局对拼接光学系统像质影响的测量结果
Fig. 5 Testing result for effect of sub-aperture distribution on optical transfer function

数的影响趋势与软件模拟是一致的. 由此为研究子孔径拼接原理样机的孔径布局提供了更为有力的理论依据.

5 结论

针对子孔径布局对光学系统光学传递函数的影响进行了计算,并由光学设计软件内嵌程序将子孔径布局实际地加入到设计的光学系统中进行了模拟

仿真,通过仿真与计算结果的对比验证了软件内嵌程序的正确性.并针对子孔径布局对具有相同相对孔径光学系统的影响进行了讨论,分别从仿真计算与测试结果上验证了相同孔径布局形式对具有相同相对孔径的拼接光学系统的光学传递函数影响趋势一致的结论,从而为子孔径拼接原理样机的实用性及像质检测提供了依据.

参考文献

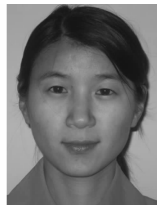
- [1] WANG Zhi-le, ZHANG Wei, LONG Fu-nian. Image quality evaluation for diffraction-limited optical synthetic aperture system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(1): 35-39.
王治乐,张伟,龙夫年.衍射受限光学合成孔径成像系统像质评价[J]. *光学学报*, 2005, **25**(1): 35-39.
- [2] JIANG Yue-song. Size effects of sub-aperture on imaging of linear array of optical synthetic aperture [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(8): 1042-1047.
江月松. 直线阵光学综合孔径成像中的子孔径尺寸效应[J]. *光学学报*, 2005, **25**(8): 1042-1047.
- [3] CHEN Hai-ting, JIANG Yue-song, ZHONG Yu. Study of optimization and imaging characteristics of two-dimensional circle array for optical synthetic aperture system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(12): 1616-1622.
海亭,江月松,钟宇. 二维圆周光综合孔径阵的优化排列及其成像特性研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(12): 1616-1622.
- [4] TCHERNIAVSKI I, KAHRIZI M. Optimization of the optical sparse array configuration [J]. *Opt Eng*, 2005, **44**(10): 10320121~103201210.
- [5] DENG Jian, ZHANG Wei, LONG Fu-nian. Optical design of large aperture segmented mirror system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(1): 29-34.
邓健,张伟,龙夫年. 大口径拼接式合成孔径光学系统设计[J]. *光学精密工程*, 2008, **16**(1): 29-34.
- [6] CHEN Qi-hai, WANG Zhi-le, ZHANG Wei. Study on subaperture aberration of optical synthetic aperture imaging system [J]. *Journal of Applied Optics*, 2006, **27**(2): 112-115.
陈旗海,王治乐,张伟. 光学合成孔径成像系统子孔径像差研究[J]. *应用光学*, 2006, **27**(2): 112-115.

Effect of Sub-aperture Distribution on Optical Stitching System

LIU Zhi-ying, FU Yue-gang, GAO Tian-yuan, WANG Zhi-jian
(Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: Based on diffraction theory, effect of sub-aperture on point spread function of stitching system is analyzed, and after Fourier transformation of point spread function, effect on the Modulus of the OTF is acquired. The sub-aperture distribution is added to the real designed optical system through embedded program, and effect of sub-aperture distribution on image quality of stitching system is simulated. Through contrast of calculation result from diffraction theory and simulated result by design software embedded program, the simulated result is verified. Effects of sub-aperture distribution on optical systems with the same relative aperture are simulated. For reflective systems which have the same relative aperture and central-obscuration, effect of sub-aperture distribution on optical stitching system is tested. After comparison of simulated result and tested result, it is shown that, effect of sub-aperture distribution on optical stitching systems with the same relative aperture is uniform. It provides theoretical proof for practability of study on optical stitching prototype.

Key words: Optical stitching system; Sub-aperture distribution; Optical transfer function; Relative aperture



LIU Zhi-ying was born in 1981. She received her Ph. D. degree from Changchun University of Science and Technology in 2009. Her research interests focus on optical communication, system design and measurement now.



WANG Zhi-jian was born in 1941. He is a professor of Changchun University of Science and Technology. His research interests focus on dynamic optics and optical design.