

文章编号: 0253-2239(2005)01-35-5

衍射受限光学合成孔径成像系统像质评价

王治乐 张 伟 龙夫年

(哈尔滨工业大学空间光学工程研究中心, 哈尔滨 150001)

摘要: 简述了光学合成孔径成像系统的原理, 合成孔径成像系统在获得高截止频率的同时, 降低了系统的中频性能, 在空域表现为点扩展函数次峰增加。然后运用两点分辨率和光学传递函数对衍射受限光学合成孔径成像系统的像质评价问题进行了分析, 指出了瑞利判据、斯派罗准则和“门限”判据的不足, 认为当点扩展函数次峰大于主峰的 0.5 倍时, 合成孔径系统与单孔径系统相比将失去优势。以光学传递函数为标准, 分析三孔径合成系统子孔径尺寸、相互间距与等效系统孔径尺寸之间的关系。当子孔径直径不变时, 随着其所在圆半径的增大, 实际截止频率先增大, 然后减小。

关键词: 成像系统; 像质评价; 合成孔径; 光学传递函数

中图分类号: O435.2 文献标识码: A

Image Quality Evaluation for Diffraction-Limited Optical Synthetic Aperture System

Wang Zhile Zhang Wei Long Funian

(Research Centre for Space Optical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

Abstract: The theory of optical synthetic aperture imaging system with emphasis on the characteristics of the spatial frequency is described. The cut-off spatial frequency is got higher at the cost of the mid-spatial frequency, and the sidelobes of point spread function (PSF) are higher. The image quality evaluation for diffraction-limited optical synthetic aperture imaging system is analyzed with two-point resolution and optical transmission function (OTF). The disadvantages of Rayleigh criterion, Sparrow criterion and threshold criterion are given. When the sidelobe is 0.5 times of the maximum, the imaging quality of synthetic aperture system is no better than that of the single aperture system. Based on the OTF, relations between the effective diameter of three operture system and pupil parameters including the diameter of sub-apertures and spacing parameter are analyzed. When the pupil diameter is fixed, practical cut-off spatial frequency becomes larger first, and then reduces with the augmentation of the distance between pupils.

Key words: imaging system; image quality evaluation; synthetic aperture; optical transmission function

1 引 言

对于一定波段范围, 提高系统的角分辨率, 只能增加系统孔径, 而系统孔径的增大受加工工艺和制造成本的限制, 系统加工成本近似与孔径的立方成正比, 对于空间光学系统还受飞行器有效载荷舱体积(一般情况下其系统发射直径要小于 $6 \text{ m}^{[1]}$)和发射质量的限制, 为了克服上述矛盾, 早在 20 世纪 70 年代, 光学工作者就提出了光学合成孔径成像系统的思

想^[2,3]。但受技术水平的限制, 该思想在 80 年代后才得到较快的发展^[4~6], 据资料显示, 光学合成孔径成像技术将是未来大型成像系统的主要分支之一^[7,8]。

光学合成孔径成像技术是指采用多个小孔径光学系统获得高分辨率成像效果的成像技术。与传统光学系统相比, 合成孔径成像系统光瞳函数的表现形式不再是单个连通域, 而可能是多个连通域的组合。对于传统光学系统, 在给定孔径和波长的情况

作者简介: 王治乐(1975~), 男, 河南省偃师市人, 博士研究生。主要从事光学半实物仿真技术、光学合成孔径成像技术等方面的研究。E-mail: wangzhile@hit.edu.cn。

收稿日期: 2004-02-12; 收到修改稿日期: 2004-06-16

下,它只是一个低通滤波器,影响成像分辨率的高频分量仍然被截止,但是通过改变系统的光瞳函数,即采用合成孔径技术,通过改变各个子光瞳的大小和相对位置,改善系统的传递函数。

图 1 给出了等面积单孔径与合成孔径系统的点扩展函数 PSF 和传递函数的示意图,实线表示合成孔径,虚线表示单孔径系统。由图 1 可知,合成孔径系统的点扩展函数艾里斑较窄,但次峰有所增加,在频域表现为传递函数截止频率变大,中频性能下降。

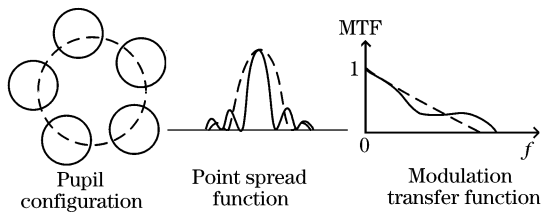


图 1 合成孔径原理示意图

Fig. 1 Synthetic aperture system sketch

2 像质评价方法

由于成像物体在数学处理上可以分解为物点,也可以分解为频谱,因此成像系统的像质评价也可以分解为两类:

1) 以物点所发出的光能在像空间的分布状况作为像质的评价依据,评价方法有斯特列尔判断、瑞利判断和两点分辨力,以及用于大像差系统的点列图;

2) 以系统对不同频率的余弦信号的通过能力作为像质的评价依据,它把系统看作线性系统,信号对比度的降低和相移与频率之间的函数关系称为光学传递函数。

上述方法对于传统的单孔径成像系统的像质评价十分有用,而对于光学合成孔径成像系统,需要对这些方法加以改进,下面以两点分辨力和光学传递函数为例讨论衍射受限合成孔径系统像质评价问题。

2.1 两点分辨力

单孔径系统的两点分辨力通常采用瑞利判据和斯派罗准则,如图 2 所示。瑞利判据指由两个非相干点源产生的衍射斑,当其中一个艾里斑的中心落入另一个点源所产生衍射图样的一级极小时,认为两个点源恰好可以被分辨。而斯派罗准则规定:两个点源产生的衍射斑,当两个中央极大之间存在一个极小值时被认为是可以分辨的。如果两个点源进一步靠近,中央极大趋于临近的极大值,此刻认为两个点源恰好可以被斯派罗准则分辨。

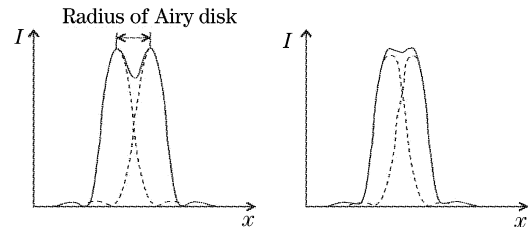


图 2 瑞利判据与斯派罗准则

Fig. 2 Rayleigh criterion and Sparrow criterion

光学合成孔径系统的两点分辨力判据既不是采用瑞利判据也不能简单地采用斯派罗准则。由于光学合成孔径系统的填充因子(指系统有效集光面积与等效单口径系统集光面积之比)通常小于 1,所以脉冲响应比单孔径系统要复杂得多,特别是次峰的结构不是旋转对称的。

采用图 3 所示坐标系,合成孔径系统光瞳函数为

$$P(v, u) = \sum_{m=1}^N p_m(v - v_m, u - u_m) \exp[ikW_m(v - v_m, u - u_m)], \quad (1)$$

其振幅扩展函数为

$$A(x, y) = \mathcal{F}[P(v, u)] = \sum_{m=1}^N \mathcal{F}\{p_m(v - v_m, u - u_m) \exp[ikW_m(v - v_m, u - u_m)]\}, \quad (2)$$

式中 \mathcal{F} 表示傅里叶变换。系统点扩展函数为

$$F_{PS}(x, y) = |A(x, y)|^2. \quad (3)$$

对于衍射受限三孔径系统, $W_m(v - v_m, u - u_m) = 0$, 因此系统点扩展函数为

$$F_{PS}(x, y) = I_0 \left\{ \frac{2J_1(kar/f)}{kar/f} \sum_{m=1}^3 \exp\left[-i \frac{kr}{f} \left(x \sin \frac{2\pi m}{3} + y \cos \frac{2\pi m}{3} \right) \right] \right\}, \quad (4)$$

式中 $r = \sqrt{x^2 + y^2}$, I_0 为衍射图样中心处的强度。

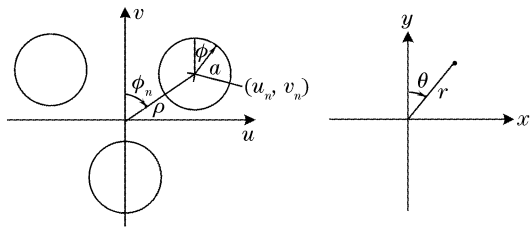


图 3 系统坐标

Fig. 3 Coordinate system

图 4 是单孔径系统的点扩展函数与三孔径系统点扩展函数的比较,二者具有相同的有效直径,其中 $f = 1000 \text{ mm}$, $\lambda = 0.55 \text{ }\mu\text{m}$, 单孔径半径 $a = 51.96 \text{ mm}$, 合成孔径系统半径 $a = 30 \text{ mm}$, 所在圆半径分别为 $r_p = 40 \text{ mm}$, $r_p = 60 \text{ mm}$, $r_p = 80 \text{ mm}$ 。由图 4 中可以看出三孔径系统脉冲响应的主瓣周围围绕着几个旁瓣,旁瓣峰值的大小与合成孔径系统的结构形式有关,随着三个子孔径的孔径-原点距逐渐增大,旁瓣的峰值水平不断增高,与主瓣的差距越来越小。

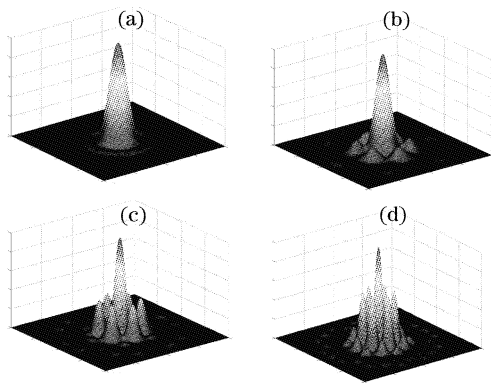


图 4 单孔径(a)与三孔径系统的点扩散函数

(b) $r_p = 40 \text{ mm}$, (c) $r_p = 60 \text{ mm}$, (d) $r_p = 80 \text{ mm}$

Fig. 4 PSF for single aperture (a) and three apertures

(b) $r_p = 40 \text{ mm}$, (c) $r_p = 60 \text{ mm}$, (d) $r_p = 80 \text{ mm}$

图 5 和图 6 分别给出了单孔径系统和三孔径系统像点间距分别为 $0, 0.005 \text{ mm}, 0.006 \text{ mm}$ 和 0.01 mm 时,两非相干点源的衍射强度分布。由图 6 可以看出对于三孔径系统由于次峰的影响,两非相干点源的衍射强度分布比单孔径系统复杂。由于瑞利判据和斯派罗准则仅在次峰值较小的情况下适用。Steven 在 1988 年提出了一种基于衍射斑强度水平的门限判据,并用于光学合成孔径系统^[9]。门限被定义为主峰中央值强度的分数,任何比门限大的衍射强度被保留,反之,小于门限水平的强度被截止。因此,那些超过门限水平的峰值用于决定系统的分辨率,而比门限低的峰值则被忽略掉。图 7 是对图 6 中最后两种情况加门限值限制后的衍射强度分布。经过门限值限制后可以采用斯派罗准则进行判断。

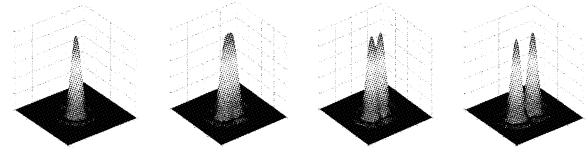
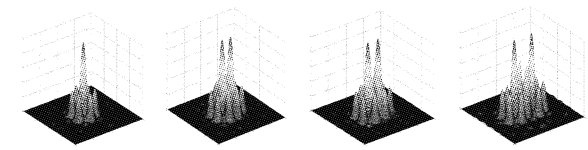
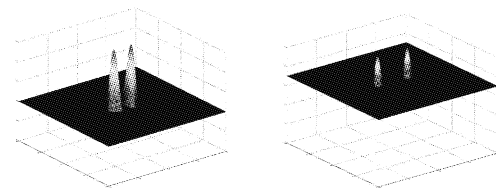
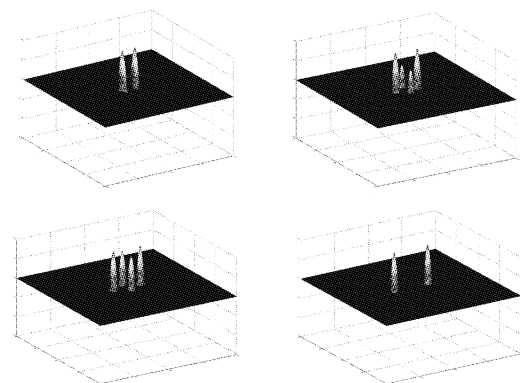
图 5 单孔径系统两非相干点源间距分别为 $0, 0.005 \text{ mm}, 0.006 \text{ mm}, 0.01 \text{ mm}$ 时的衍射强度分布图Fig. 5 Single aperture diffraction intensity of two incoherent points, two points separations of $0, 0.005 \text{ mm}, 0.006 \text{ mm}$ and 0.01 mm 图 6 三孔径系统两非相干点源间距分别为 $0, 0.005 \text{ mm}, 0.006 \text{ mm}, 0.01 \text{ mm}$ 时的衍射强度分布图Fig. 6 Three apertures diffraction intensity of two incoherent points, two points separations of $0, 0.005 \text{ mm}, 0.006 \text{ mm}$ and 0.01 mm 图 7 加门限后三孔径系统两非相干点源间距分别为 $0.006 \text{ mm}, 0.01 \text{ mm}$ 时的衍射强度分布图Fig. 7 Three apertures diffraction intensity limited by threshold values, two points separations of 0.006 mm and 0.01 mm

图 8 给出了上述三孔径系统 $r_p = 90 \text{ mm}$, 门限值为 0.6 , 两点间距分别为 $0.004 \text{ mm}, 0.006 \text{ mm}, 0.008 \text{ mm}$ 和 0.01 mm

图 8 门限值为 0.5 , 三孔径系统两非相干点源间距分别为 $0.004 \text{ mm}, 0.006 \text{ mm}, 0.008 \text{ mm}, 0.010 \text{ mm}$ 时的衍射强度分布图Fig. 8 Diffraction intensity of two coherent points limited by threshold values 0.6 . Two point separations of $0.004 \text{ mm}, 0.006 \text{ mm}, 0.008 \text{ mm}$ and 0.01 mm

0.008 mm和0.010 mm时的衍射图,由图 8 可知,当子孔径间距变大时,对于某一固定门限值,出现了两点间距值在比较小和比较大时可以分辨,而对于中间值难以分辨或错误分辨的情况。这是由于系统衍射图次峰值增大引起的,以一维情况为例,图 9 给出了两像点间距逐渐变大时的示意图,图中单个像点衍射强度分布的次峰值为主峰的 0.5 倍,在两个像点间距变大的过程中,当两像点的次峰相互叠加时,形成新的极大值接近甚至超过原来的单个像点的主峰值,此时不论门限值如何选取,原来的两个像点都不能分辨。

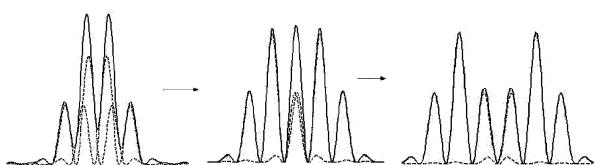


图 9 两像点间距逐渐变大时的示意图

Fig. 9 PSF sketch when distance of two pots is longer

2.2 光学传递函数

运用光学传递函数对合成孔径成像系统进行评价时,首先需要了解冗余性和实际截止频率的概念。下面以一维系统为例介绍如下。光学传递函数为其光瞳函数的自相关,传递函数的冗余性是指由于子孔径的等间距排列使系统成为带通滤波器,空间信息经过系统传递时表现的冗余性,如图 10 所示。图 10 中虚线表示开孔尺寸为的单口径系统的传递函数,其截止频率为 $f_c = D/(\lambda f)$,式中 λ 为波长, f 为焦距。实线表示孔径冗余排列(如图 10 左图所示)的传递函数,可以看出它有多个零点,我们定义传递函数的最小零值频率为系统实际截止频率 $f_r = d/(\lambda f)$,式中 d 为子孔径尺寸。

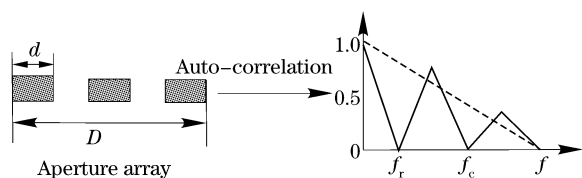


图 10 光瞳排列及其传递函数

Fig. 10 Pupil array and its MTF

对于成像系统,传递函数的零值,意味着某一频率信息的传递缺失,在对频谱信息丰富的目标成像时,将引起图像的失真,并且对于损失的图像信息,不论运用何种图像恢复算法也不能准确恢复。因此,合成孔径系统的分辨本领为实际截止频率的倒数,在进行系统评价时, f_r 是否等于 f_c 显得至关重

要,否则将失去合成孔径技术的优势与意义,当然对于实际情况还要考虑各种像差以及电子学部分的影响,对光学传递函数中频部分下降有一定要求。

根据上述对传递函数的要求,讨论三孔径系统子孔径直径 d 及其所在圆半径 r 与系统等效直径 D_e 之间的关系。图 11 给出了三种光瞳分布及其传递函数的示意图,其中下图阴影区表示不含零值的最小传递函数取值域,由图 11 可以看出随着 r 的增大,实际截止频率先增大,然后减小。

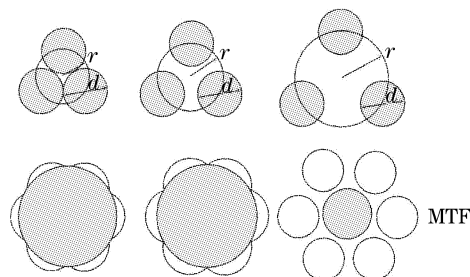


图 11 三种光瞳布局及其传函俯视图

空间频率 R 与等效直径 D_e 的计算关系如图 12 所示,根据几何关系得

$$q = d, \quad p = \sqrt{3}r, \quad (5)$$

由余弦定理得

$$R^2 - 2\rho R \cos 30^\circ + p^2 - q^2 = 0, \quad (6)$$

解方程得

$$R = \frac{\sqrt{3}p + \sqrt{4q^2 - p^2}}{2}, \quad (7)$$

该三孔径合成系统的等效直径为

$$D_e = R = \frac{3r + \sqrt{4d^2 - 3r^2}}{2}, \quad (8)$$

若(8)式有意义,则有 $r \leq 2d/\sqrt{3}$,考虑到传递函数内不应存在零值,则有 $r < d$,再根据几何关系,当三孔径紧密相连时,有 $r = d/\sqrt{3}$,因此得

$$\frac{d}{\sqrt{3}} < r < d, \quad (9)$$

图 13 给出了根据公式(9)得出光学合成孔径系统等效直径与子孔径直径 d 和分布圆半径 r 之间的关系

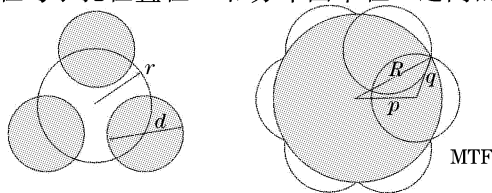


图 12 空间频率与等效直径的计算

Fig. 12 Calculation of spatial frequency R and the equivalent diameter

图, 其中斜线阴影区表示传递函数中频段不含零值。

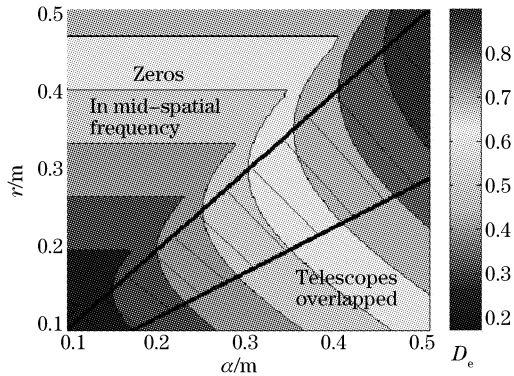


图 13 三孔径系统的等效直径

Fig. 13 Equivalent diameter of synthetic aperture system

3 结 论

根据光学合成孔径成像系统的原理, 运用两点分辨率和光学传递函数研究了衍射受限光学合成孔径成像系统的像质评价问题, 结论如下: 由于系统点扩展函数次峰的结构不是旋转对称的, 并且次峰值较大, 瑞利判据或斯派罗准则需要和门限判据同时采用, 当次峰值为极大值的 0.5 倍时, 不论门限值如何选取, 合成孔径系统的性能都会大大下降。

根据合成孔径成像系统光学传递函数的特性, 指出实际截止频率 f_r 是否等于 f_c 。对于合成孔径系统具有重要意义。当子孔径直径不变时, 随着其在圆半径 r 的增大, f_r 先增大, 然后减小。最后以

三孔径系统为例, 得出了系统子孔径直径 d 及其所在圆半径 r 与等效系统孔径直径之间 D_e 的关系。

参 考 文 献

- 1 E. M. Sabatke, J. H. Burge. Basic principles in the optical design of imaging multiple aperture systems[C]. *Proc. SPIE*, 2002, **4832**: 236~247
- 2 Meinel A. B. Aperture synthesis using independent telescope[J]. *Appl. Opt.*, 1970, **9**(11): 2501~2504
- 3 Zhang Wei, Wang Zhile, Long Weijun. Review on optical synthetic aperture imaging technique [J]. *Optical Technique*, 2003, **29**(6): 757~761 (in Chinese)
张 伟, 王治乐, 龙伟军. 光学合成孔径成像技术发展概况[J]. 光学技术, 2003, **29**(6): 757~761
- 4 W. Scott Smith, H. P. Stabl. Overview of mirror technology development for large lightweight space-based optical systems[C]. *Proc. SPIE*, 2001, **4198**: 1~8
- 5 Wang Haitao, Zhou Bifang. Beam combiner in optical aperture synthesis telescope array[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(9): 1109~1115 (in Chinese)
王海涛, 周必方. 光学综合孔径望远镜阵的光束组合器[J]. 光学学报, 2002, **22**(9): 1109~1115
- 6 Fan Weijun, Zhou Bifang, Wang Haitao *et al.*. Research of Fourier phase in optical synthetic-aperture imaging technique[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(3): 408~412 (in Chinese)
范伟军, 周必方, 王海涛 等. 光学综合孔径成像中的傅里叶相位研究[J]. 光学学报, 2004, **24**(3): 408~412
- 7 Janet Fender. Future trends in large space optics [C]. *Proc. SPIE*, 2000, **4013**: 682~686
- 8 Gérard Rousset, Laurent M. Mugnier, Frédéric CASSAING. Imaging with multi-aperture optical telescopes and an application [J]. *Comptes Rendus del Academie des Sciences Series VI Physics*, 2001, **2**(1): 17~25
- 9 Steven M. Watson, James P. Mills. Two-point resolution criterion for multiaperture optical telescope[J]. *Opt. Soc. Am. (A)*, 1988, **5**(6): 893~903