

文章编号:1002-2082(2008)04-0548-05

轴对称综合孔径光学系统的调制传递函数和成像性质

孙江芹^{1,2}, 钱霖¹, 吴泉英³

- (1. 苏州大学 物理科学与技术学院, 江苏 苏州 215006;
2. 哈尔滨工业大学 航天学院, 黑龙江 哈尔滨 150006;
3. 苏州科技学院 数理学院, 江苏 苏州 215009)

摘要: 综合分析目前各种综合孔径光学系统的结构和成像特征,并对它们作了比较。使用数值模拟方法,对单环轴对称综合孔径光学系统和双环结构的轴对称系统进行分析,研究了轴对称综合孔径光学系统的结构形式及其调制传递函数(MTF),并对其成像性质作了评估与比较。讨论了一种4+2双环结构的轴对称综合孔径系统的结构形式,对其成像特点作了详细描述,最后运用图像复原维纳滤波器对系统成像图做了处理,以使这种轴对称综合孔径系统具有更理想的成像效果。

关键词: 综合孔径; 高分辨率成像; 调制传递函数; 成像质量; 图像复原

中图分类号: O436.1

文献标志码: A

MTF and imaging quality of axially symmetrical optical systems with synthetic aperture

SUN Jiang-qin^{1,2}, QIAN Lin¹, WU Quan-ying³

- (1. School of Physics Science & Technology, Soochow University, Suzhou 215006, China;
2. School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150006, China;
3. School of Maths & Phys, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China)

Abstract: The mechanical and imaging characteristics of the synthetic aperture systems were analyzed and compared. By the aid of numerical simulation, the configurations and the modulation transfer functions (MTF) of axially symmetrical synthetic aperture systems with single ring and with dual rings were studied. The imaging qualities of these systems were evaluated and compared. A new axially symmetrical synthetic aperture system with 4+2 dual rings configuration was discussed. Its imaging characteristics were described in detail. The images produced by the new system were processed with Wiener filter to retrieve a better imaging effect.

Key words: synthetic aperture; high resolution imaging; MTF; imaging quality; image restoration

收稿日期:2007-09-24; 修回日期:2007-11-17

基金项目:江苏省自然科学基金(BK2004202); 高等学校博士学科点专项科研基金(20040285001); 江苏省现代光学技术重点实验室开放课题(T8108030); 江苏省高校自然科学基金基础研究项目(07KJD140190)

作者简介:孙江芹(1985—),女,江苏盐城人,硕士研究生,主要从事光学系统设计方面的研究。

E-mail:jiangqinsun@hotmail.com

引言

无论是在天文还是在军事方面,人们都迫切希望能够将遥远物体观测清楚。但是,光学系统的最小角分辨率与口径大小成正比,只有口径越大,分辨率才越高,相应系统的质量、体积、加工工艺的难度都大大提高^[1]。由于人类机械加工工艺水平和经费限制,光学系统口径的大小也受到了限制,单孔径光学成像系统无法满足人们在军事和天文等方面对分辨率的要求。

聪明而且有进取精神的人类不断地寻求突破性的方案来改变这种矛盾。1970年美国科学家 Meinel A B^[2]提出了光学综合孔径概念,光学综合孔径运用小的孔径面积来合成全孔径系统所达到的光学效果,它是将多个小口径的光学元件或光学系统按照一定的空间位置排列^[3],从而达到与之通光口径相当的单一大口径系统的衍射极限分辨率。从此,人们开始了综合孔径光学系统的研究^[4-10]。

1 目前主要的综合孔径系统

目前常见的综合孔径子孔径的排列结构主要有:环面(a)、环形(b)、Golay6(c)、三臂形结构(d)和复合三子镜(e)^[8],如图1所示。

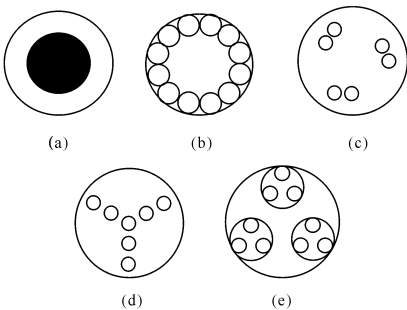


图1 综合孔径子孔径的排列结构

Fig. 1 The structure of synthetic aperture systems

目前主要综合孔径光学系统的三维MTF的剖面图如图2所示。

光学综合孔径系统填充因子 F 是指综合孔径结构中子孔径的总面积与整个光瞳面积的比值,它表征了综合孔径系统的稀疏程度。系统在大于某一空间频率时,调制传递函数MTF的值全为0,这个空间频率称为截止空间频率;调制传递函数MTF第一次出现零点时所对应的空间频率为实际截止空间频率。

图2(a)是填充因子为20%时,Golay6结构、

三臂形结构、复合三子镜结构、环形结构和环面形结构综合孔径光学系统的三维MTF剖面的对比图。从轴对称和非轴对称的角度来看这幅图,其中非轴对称结构的综合孔径光学系统,它们与环形结构和环面形结构轴对称综合孔径光学系统比较起来,在低频处有较高MTF值,而它们的截止频率都较其他2种轴对称结构的系统低。环形结构的综合孔径光学系统在截止频率内出现了零点,而在归一化频率为0.23,0.43,0.77处调制传递函数MTF出现了较大的峰值,即在特定的频率处图像对比度提高,这是由于环形结构有较高的冗余所致。因此,可根据实际需要来制定和选择适当结构的综合孔径光学系统。图2(b)是填充因子为30%时,各结构的三维MTF剖面的对比图。填充因子变大后,各种结构的MTF的值都相应的有所提高,图中描述的几种非轴对称结构综合孔径光学系统的截止频率仍然较轴对称结构的系统低。基于这一特点,以及轴对称结构易于安装的优点,有必要对它进行研究。

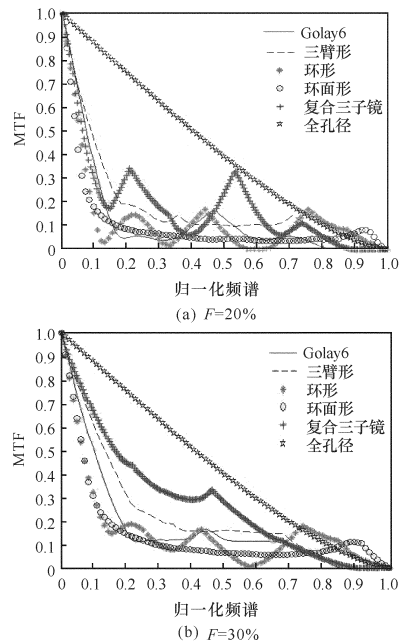


图2 主要综合孔径光学系统的三维MTF剖面图比较

Fig. 2 Comparison of MTFs for 3-D synthetic aperture systems

本文对单环结构和双环结构2种轴对称综合孔径光学系统进行分析讨论。

2 单环结构轴对称综合孔径光学系统

研究首先从简单的单环结构轴对称综合孔径开始,如图3(a)所示(两孔径结构)。设每个子孔径的直径为 d , 包围这 2 个子孔径的大圆的直径为 D , 它的调制传递函数为

$$MTF = MTF_d + \frac{1}{2} [MTF_d(\xi + \frac{D-d}{\lambda f}, \eta) + MTF_d(\xi - \frac{D-d}{\lambda f}, \eta)] \quad (1)$$

从图3(b)中 MTF 的分布可以看出:中心零频处 MTF 的值较大,它由 2 个子孔径的子调制传递函数 MTF_d 叠加而成,两边对称地分布着 2 个子调制函数,与数学表达式(1)相符。

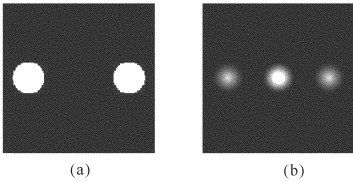


图3 两子孔径综合孔径系统及其 MTF 分布图

Fig. 3 Image of correspond MTF for synthetic aperture system with two sub-apertures

图4列出了两子孔径结构综合孔径光学系统在不同填充因子的情况下,对辐射形图进行模拟成像所得到的图像。可以看出:填充因子 F 越大,图像越清晰,且分辨率也越高,对比度也增大。

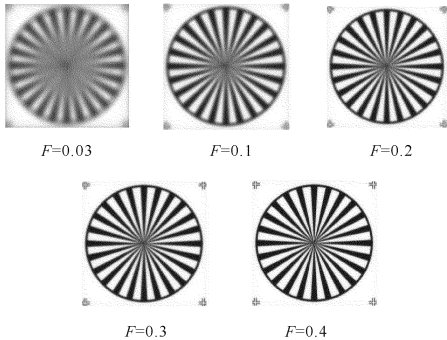


图4 不同填充因子 F 时,两子孔径综合孔径系统的模拟成像图

Fig. 4 Simulations imaging of synthetic aperture system with two sub-apertures at different filling factors

综合孔径 MTF 的一般表达式为

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

式中: m 为子孔径的个数; $(x_i - x_j, y_i - y_j)$ 为子孔径间的相对位置。

从轴对称综合孔径的调制传递函数 MTF 的数学表达式或者从二维 MTF 图可以看出,在中央零频处,MTF 是由数个子孔径 MTF_d 叠加而成,而在零频处以外的频率处,调制传递函数的分布与子孔径空间分布有关。子孔径之间的相对距离决定子调制传递函数在频率域内分布的径向位置;子孔径之间的相对方位决定子调制传递函数在频率域内分布的角度方向^[9]。这一结论给设计综合孔径光学系统提供了依据,我们可以根据实际需要,即由不同空间频率处所需的分辨率来设计子孔径的相对分布。

下面对子孔径个数不同的单环结构综合孔径光学系统进行比较,如图5所示。从图5可以看出,在相同填充因子条件下,单环结构子孔径个数越多,调制传递函数的分布越密集;子调制传递函数的个数 = 子孔径个数的平方;零频外子调制传递函数的分布数 = 子孔径个数的平方 - 子孔径的个数 - 相同方位子孔径对的个数。

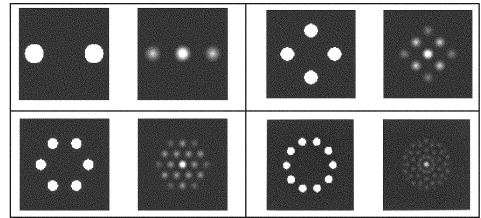


图5 填充因子为 20% 时,4 种单环结构的综合孔径和对应的二维调制传递函数图

Fig. 5 Synthetic aperture systems with four kinds of single ring configurations and images of their correspond MTFs as filling factor is 20%

3 双环结构轴对称综合孔径光学系统

为进一步讨论较轴对称综合孔径光学系统,我们将单环复杂为双环进行研究。双环结构由一系列子孔径绕半径不同的 2 个圆对称排列而成。设子孔径的半径为 r , 子孔径所绕的内圆半径为 R_1 , 子孔径所绕的外圆半径为 R 。本文简称内外环半径之比为环比 k , $k = R_1/R$ 。图6表示内环子孔径个数为 2, 外环子孔径个数为 4 的 4+2 双环结构轴对称综合孔径光学系统。

通过改变 R_1 的值,即改变环比 k 的值,则 4+2 双环结构的子调制传递函数分布的变化和模拟成

像图清晰度的变化如图7所示。

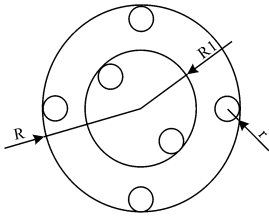


图6 4+2双环结构轴对称综合孔径光学系统

Fig. 6 4+2 axially symmetrical synthetic aperture system with dual rings

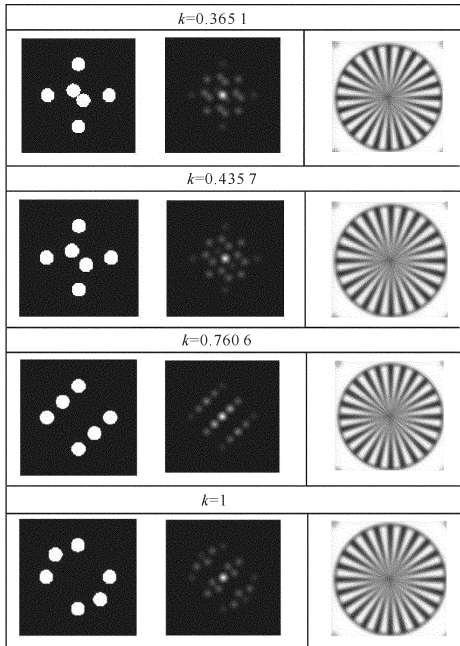


图7 不同环比情况下,4+2综合孔径系统的MTF及其模拟成像图的变化

Fig. 7 MTFs and variation of correspond simulation images of 4+2 synthetic aperture systems at different ring radius ratio

当 $k=0.3651$ 时,内环的2个子孔径刚好相切;当 $k=1$ 时, $R=R1$,这时内环与外环为同一环,即是单环的情况。从模拟实验可以看出,当 k 为 0.4357 时,二维MTF分布比较均匀,冗余度较小;当 k 在 $0.6\sim 0.9$ 时,冗余是相当大的, $k=0.7606$ 时冗余度最大,二维MTF呈3行平行的斜线排列着,这就使得二维MTF在45度的方向上的值较大,图像在此方向上成像具有较高的对比度,这一点与模拟成像图是一致的。在实际运用中,可以根

据需要来调节环比 k 的值来实现特定的需要。

在实际应用中,子孔径个数的多少影响着工艺和组装的难易程度,子孔径个数越多,相互间位置误差也就越大,这将影响成像质量。因此,有必要研究相同个数子孔径系统的成像质量,下面对由6个子孔径组成的单环结构、4+2双环结构 ($k=0.4357$) 以及 Golay6 进行比较,如图8所示。它们的共同点是,均由6个子孔径组成,且填充因子 F 都为20%。

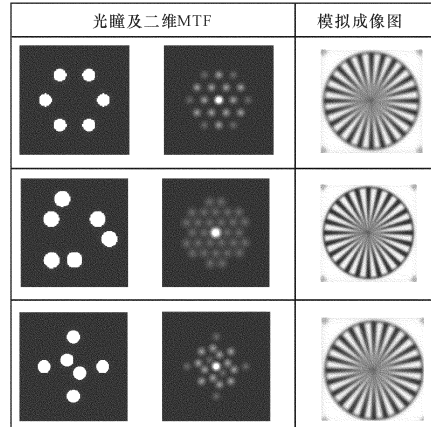


图8 $F=20\%$ 时,由相同个数的子孔径构成的不同结构系统的MTF和模拟成像图

Fig. 8 Comparison of MTFs and simulation images of different structure aperture systems with the same quantity of sub-apertures as $F=20\%$

从另一个角度来比较,即从三维MTF的剖面图(如图9)来看,单环6个子孔径结构与4+2双环结构在归一化频率为 $0.65\sim 1$ 之间是相互重叠的,这是由于它们都含有距离相同且方向相同的子

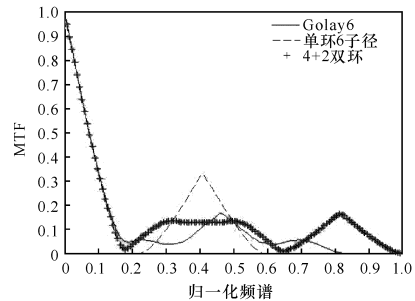


图9 $F=20\%$ 时,由相同个数子孔径构成的不同系统的MTF剖面图

Fig. 9 MTF curves of different structure synthetic aperture systems with same sub-apertures as $F=20\%$

孔径对,它们的子调制传递函数在此处叠加形成峰值;4+2 双环结构比单环 6 个子孔径结构的 MTF 值的分布更加平稳,在截止频率范围内未出现零值,即具有较大的有效截止频率;Golay6 在三者中,MTF 值分布最平稳,但在高频处(归一化频率为 0.82~1),MTF 值为 0,这使得 Golay6 对高频成像质量很差。

4 综合孔径光学系统的图像复原

由于综合孔径光学系统的孔径仅对其等效的单个大孔径成像光学系统部分填充,因此填充因子下降,此种系统的点扩散函数会有一定程度的扩展,与等效的单个大孔径成像光学系统相比,综合孔径光学系统对部分频率处的响应将下降,使得系统所成图像出现模糊现象,这需要通过图像复原技术对图像进行处理以便恢复图像质量,传统的方法是采用维纳滤波(实际上它是一个去卷积的滤波器)^[10]。

下面以 4+2 双环轴对称综合孔径结构为例,其填充因子 $F=20\%$,环比 $k=0.4357$,对其成像图进行图像复原,如图 10 所示。从图 10 可以看出,虽然综合孔径系统因为填充因子下降,造成了成像质量下降,但是通过维纳滤波的方法,使得综合孔径系统清晰成像成为可能。

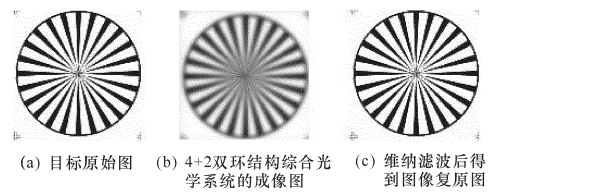


图 10 目标原始图及不同方法处理后得到的图像
Fig. 10 Original image and two images obtained by different methods

5 结论

综合孔径光学系统的调制传递函数由子孔径的调制传递函数组合而成,其分布与子孔径在空间分布有关。相同方向和间距的子孔径对出现,使冗余度提高,但在局部频率处会有较大的 MTF 值,能增大图像局部频率的对比度和清晰度。Golay6 这种非轴对称结构系统没有出现相同间距和方向的子孔径对,是一种非冗余结构,它在高频处(归一化频率为 0.82~1)。4+2 结构在环比 $k=0.4357$ 时,调制传递函数分布最均匀,但是,在 $k=0.7606$ 时

冗余度最大,可以结合改变环比和填充因子来达到实际运用的要求;采用常规的维纳滤波方法可以提高图像质量。

参考文献:

[1] 周华鹏,陈文建,唐绍凡.相对孔径为 1:1 镜头的光学系统设计[J].应用光学,2007,28(1):55-57.
ZHOU Hua-peng, CHEN Wen-jian, TANG Shao-fan. Optical system design for lens with relative aperture of 1:1 [J]. Journal of Applied Optics, 2007,28(1):55-57. (in Chinese)

[2] MEINEL A B. Aperture synthesis using independent telescope [J]. Applied Optics, 1970, 9 (11): 2501-2504.

[3] 续强,王延风,周虎,等.空间光学遥感器主反射镜轻量化及支撑设计[J].应用光学,2007,28(1):43-46.
XU Qiang, WANG Yan-feng, ZHOU Hu, et al. Design and analysis of lightweight structure and support for primary mirror of space optic remote sensor[J]. Journal of Applied Optics, 2007,28(1): 43-46. (in Chinese)

[4] HARVEY J E, KOTHA A, PHILLIPS R L. Image characteristics in applications utilizing dilute sub-aperture arrays[J]. Applied Optics, 1995,34(16): 2983-2992.

[5] NAKAJIMA T, MATSUHARA H. Sensitivity of an imaging space infrared interferometer [J]. Applied Optics, 2001,40(4):514-526.

[6] 龙伟军,王治乐,周彦平.光学综合孔径望远镜成像分析及计算机仿真[J].光学学报,2004,24(8):1009-1014.
LONG Wei-jun, WANG Zhi-le, ZHOU Yan-ping. Imaging analysis and computer simulation of optical synthetic aperture telescope[J]. Acta Optica Sinica, 2004,24(8):1009-1014. (in Chinese)

[7] 吴泉英,钱霖,沈为民.稀疏孔径系统的成像和图像复原研究[J].激光杂志,2005,26(6):40-42.
WU Quan-ying, QIAN Lin, SHENG Wei-min. Imaging and image recovering of sparse-aperture systems [J]. Laser Journal, 2005, 26 (6): 40-42. (in Chinese)

[8] 钱霖,吴泉英,吴锋,等.复合三子镜的成像研究[J].光学学报,2005,25(8):1030-1035.
QIAN Lin, WU Quan-ying, WU Feng, et al. Study on sparse-aperture imaging of dual three subapertures design [J]. Acta Optica Sinica, 2005,25(8): 1030-1035. (in Chinese)