

大孔径衍射受限光学合成孔径系统 MTF 中频补偿

周程灏, 王治乐, 张树青, 陆敏

哈尔滨工业大学航天学院, 黑龙江 哈尔滨 150001

摘要 光学合成孔径(OSA)技术能够极大地提高光学系统的空间分辨率,但是由于孔径的离散与稀疏,导致其调制传递函数(MTF)中频部分相比单一口径系统显著下降。论述 OSA 成像的方式和原理,分析 OSA 中频 MTF 下降的原因和原理。以填充因子为线索,分别给出大填充因子中频 MTF 下降和小填充因子中频 MTF 缺失的处理方法。对于中频 MTF 下降,采用图像复原的方式恢复图像中的中频信息;对于中频 MTF 缺失,采用两个系统分别成像再融合图像的方法补偿中频。分别分析了两种方法的可行性,给出了两种情况的 Zemax 仿真验证,结果表明两种方法均可行。

关键词 成像系统; 光学合成孔径; 中频调制传递函数; 图像复原; 图像融合

中图分类号 O436.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0411005

Large Aperture Diffraction Limited Optical Synthetic Aperture System Intermediate Frequency MTF Compensation

Zhou Chenghao, Wang Zhile, Zhang Shuqing, Lu Min

School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China

Abstract Optical synthetic aperture (OSA) can greatly improve the spatial resolution of the optical system. However, due to the aperture dispersion and sparsity, the intermediate frequency (IF) modulation transfer function (MTF) of OSA imaging system is significantly lower than that of single aperture system. We first analyze the imaging method and principle of OSA imaging system, then discuss the reason and principle of the IF MTF reduction of OSA. Taking the filling factor as a clue, we propose the method of processing the IF MTF reduction with large filling factor and the IF MTF missing with small filling factor. For the IF MTF reduction, we use image restoration method to restore the IF information in the image. For the IF MTF missing, we fuse two images generated in two systems respectively to compensate the IF information. We analyze the feasibilities of the two methods and simulate the two cases in Zemax software. The results show that both methods are feasible.

Key words imaging systems; optical synthetic aperture; intermediate-frequency modulation transfer function; image restoration; image fusion

OCIS codes 110.1220; 100.2980; 100.3190; 100.1830

1 引 言

高分辨率成像系统在空间科学和军事应用上都起着十分重要的意义。由于衍射极限的存在,光学系统的极限角分辨率受制于光波波长和光学系统的孔径。随着对光学系统分辨能力需求的提升,对于在一定波段下工作的光学系统,须不断加大其系统孔径。然而,在实际应用中由于种种因素的限制(如

制造材料、制造技术、机械结构、发射体积和质量等),增加单孔径光学系统的孔径极为困难。通过光学合成孔径(OSA)实现大口径光学系统的方法应运而生。

光学稀疏孔径成像系统的调制传递函数(MTF)相比于等效全孔径成像系统,其中频部分往往下降甚至丢失,中频 MTF 的下降导致图像质量下降。目前,有两种方法处理这一问题。

收稿日期: 2017-10-13; 收到修改稿日期: 2017-11-13

基金项目: 航空科学基金(20160177007)

作者简介: 周程灏(1989—),男,博士研究生,主要从事光学合成孔径方面的研究。E-mail: 13B921004@hit.edu.cn

导师简介: 王治乐(1975—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事光学仿真图像处理方面的研究。

E-mail: wangzhile@hit.edu.cn

1)通过孔径优化的方法处理。在设计光学稀疏孔径时,通过优化算法设计出能够较好地覆盖所有空间频率 MTF 的孔径结构;Mugnier 等^[1]根据图像重建误差最小化准则提出了不同孔径数的优化排列方式;Tcherniavski 等^[2]通过考查特定频域内频谱分布对子孔径的位置和大小进行优化;魏小峰等^[3]通过聚合经典阵列中部分子孔径的位置,提高中频 MTF;Stokes 等^[4]通过改变现有经典孔径结构中某些子孔径的半径,提高中频的 MTF。其他学者也设计了不同的新型阵列结构,并分析了相关成像特性^[5-8]。孔径优化方法的缺点是优化获取的各个空间频率的 MTF 较为平均,甚至会导致低频和低频 MTF 的下降,获取的图像整体质量下降。

2)通过图像复原提高对中频 MTF 进行补偿。1996 年,Bell 等^[9]首先提出了采用图像复原补偿中频 MTF 的方法,但他们在论文中仅仅给出了补偿前后的 MTF 曲线,并未给出具体的补偿方法。2002 年,Fienup 等^[10]对比了几种图像复原方法对光学稀疏孔径图像的复原效果,但并未说明各种算法的中频提升效果。2007 年,北京工业大学的 Wang 等^[11]对 OSA 的图像复原进行了实验研究,但并未研究图像复原方法对光学系统 MTF 的提升。2011 年,Zhou 等^[12]就噪声对 OSA 图像复原的影响进行了研究。采用图像复原的方法能够较好地提高系统的 MTF,但当稀疏孔径系统的中频缺失时,无论采用什么样的复原方法均不能复原缺失部分的中频信息。

以往对 OSA 系统 MTF 的研究偏重于对前端孔径结构光学系统性能的分析,很少有人结合光学图像处理对系统中频 MTF 提升进行研究。OSA 系统的性能优劣最终体现为成像质量高低,光学图像处理又是现代光学系统成像中不能缺失的一部分,因此,通过图像处理对 OSA 中频 MTF 进行补偿需要进一步研究。本文以 OSA 的填充因子为线索,主要研究 OSA 在中频 MTF 下降和缺失两种情况下的中频 MTF 补偿方法。对大填充因子系统的 MTF 补偿,采用图像复原的方法;对小填充因子系统的 MTF 补偿,由于存在中频 MTF 缺失的情况,无论用任何复原方法均不能补偿丢失的 MTF,因此采用两个光学系统分别对中低频空间频率图像和高频空间频率图像成像、再融合两幅图像的方式补偿合成孔径图像中缺失的中频信息。分析上述方法的可行性,并采用 Zemax 软件进行仿真实验,以验证其可行性。

2 OSA 系统的成像方式和原理

OSA 系统的成像方式有两类:直接成像和干涉成像。直接成像和单孔径成像的方式相同。干涉成像根据范西特-泽尼克定理,首先利用干涉图样测量目标源的复相干度谱,然后利用傅里叶逆变换得到光源的大小和强度分布,从而实现对目标的间接成像。图 1 分别示意了 OSA 直接成像和间接干涉成像的原理。图中只画出了一维图形,二维情况可由一维类推。图 1 中左列表示频域图形,右列表示空域图形。 \wedge 表示傅里叶变换, $*$ 表示卷积, \times 表示乘法, \parallel 表示等号, $+$ 表示空间频率的叠加。OSA 直接成像时,同时获得物体的不同空间频率信息,由于孔径扩大,其获得的空间频率要多于单一孔径,即其截止频率一般大于单一孔径时的截止频率。间接成像需要通过改变孔径之间的距离获取不同空间频率的图像,然后再应用范西特-泽尼克定理将不同的空间频率图像合成为一幅图像,因此,间接成像不能实现实时成像。通过以上分析可知,成像过程从频率域考虑,就是通过光学系统同时或者非同时获取目标在截止频率内的所有空间频率信息,然后通过合成的方法或者直接获取目标的完整图像。

3 OSA 系统中频 MTF 下降原理

OSA 系统是将原先难以加工的单一孔径离散后重新组合形成新的孔径,其成像原理依然符合光学系统成像原理,只是离散的光瞳对波面采样为离散的波面,然后光学系统将离散的光波重新汇聚形成衍射(或干涉)斑(或条纹)。光学稀疏孔径光瞳离散的特点也使得光学稀疏孔径系统在成像中会发生中频信息缺损甚至缺失,导致成像质量下降。

阿贝认为相干成像过程包含了两次衍射过程,这两次衍射过程也就是傅里叶变换的过程:由物面到后焦面,物体衍射光波分解为各种频率角谱分量,即不同方向传播的平面波分量,在后焦面上得到物体的频谱,这样就完成了一次傅里叶变换;由后焦面到像面,各个频谱又合成为像,这样就完成了第二次傅里叶变换^[13]。受光学系统孔径大小的限制,并非物体所有的频率分量都能通过成像系统,一些高频成分若在成像系统截止频率以外,将被成像系统截掉,使像质变得模糊,细节信息缺失,如图 2(a)所示。OSA 系统成像,由于系统填充因子的下降,在系统中频处,部分光线不能通过光学系统传递到像面上,造成物信息成像后强度减弱、中频处相干传递

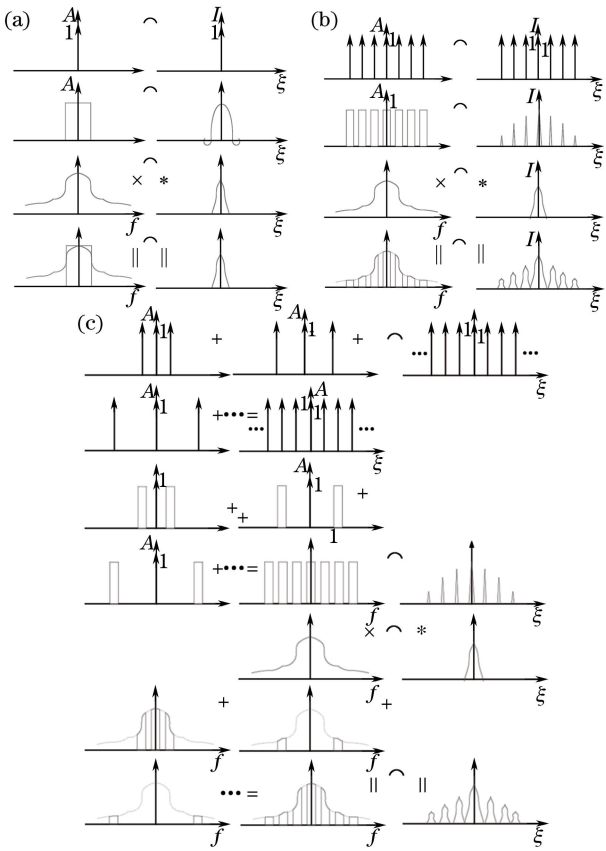


图 1 (a)单孔径成像、(b) OSA 直接成像与 (c)间接成像示意图

Fig. 1 Sketch maps of (a) single aperture imaging, (b) direct imaging and (c) indirect imaging of OSA

函数下降甚至缺失,如图 2(b)所示。根据傅里叶光学可知,对于同一系统,光学传递函数(OTF)等于相干传递函数的归一化自相关函数,也就是光瞳函数的归一化自相关^[13],因此光瞳的不连续也会导致 OSA 的 OTF 在中频的下降和缺失。

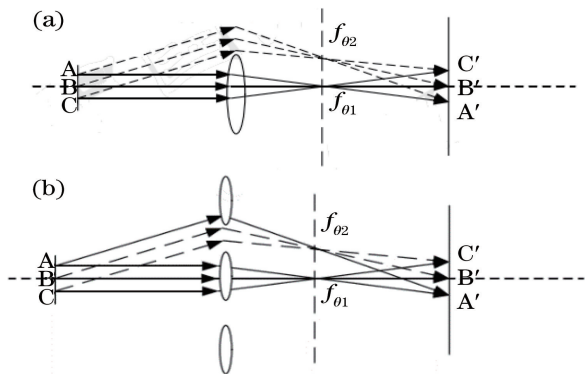


图 2 (a)单孔径系统与(b) OSA 系统的阿贝成像原理
Fig. 2 Abbe imaging principle of (a) single aperture system and (b) OSA system

根据 OSA 中频 MTF 下降的原因可知,光瞳的覆盖面积,即填充因子的大小决定了中频 MTF 是

缺失还是下降。填充因子较大时,中频 MTF 表现为下降,此时高频 MTF 较差;填充因子较小时,中频 MTF 表现为缺失,此时高频的 MTF 较好。图 3 给出了不同填充因子 F 的两子镜系统在基线方向的 MTF 示意图。

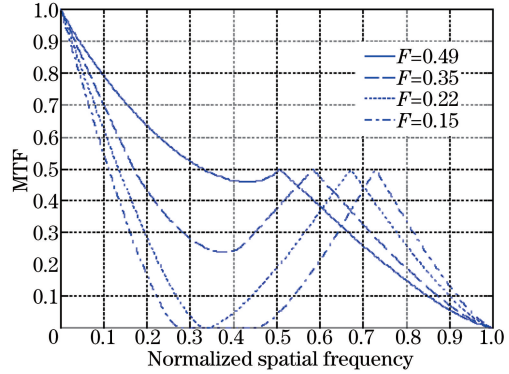


图 3 填充因子与 MTF 关系

Fig. 3 Relationship between filling factor and MTF

4 大填充因子 OSA 系统中频 MTF 下降补偿

参考文献[9]中图像复原补偿 OSA 中频 MTF 的思想,采用维纳滤波对中频补偿的可行性进行研究,采用刀口法提取滤波前后的 MTF。

维纳滤波是最常用的频率域去卷积滤波器,表达式为

$$W(f_x, f_y) = \frac{F_{OTF}^*(f_x, f_y)}{|F_{OTF}(f_x, f_y)|^2 + \left| \frac{N(f_x, f_y)}{I(f_x, f_y)} \right|^2}, \quad (1)$$

式中 $W(f_x, f_y)$ 为维纳滤波器, $F_{OTF}^*(f_x, f_y)$ 是 $F_{OTF}(f_x, f_y)$ 的共轭, $N(f_x, f_y)$ 和 $I(f_x, f_y)$ 分别为噪声和原图像噪声的功率谱。设计一套两子镜系统,填充因子为 0.5,如图 4(a)所示,采用刀口法对其进行仿真成像和图像复原实验,通过刀口法提取 MTF,结果如图 4(b)所示。

由图 4(b)可知,经过图像复原后,系统各个频率段内的 MTF 均有提高,且图像复原对中低频 MTF 的补偿较多,证明了对中频 MTF 下降补偿的可行性。尽管仿真实验证明了图像复原提升传递函数的有效性,但是如果选择了与实际不匹配的 MTF (或者点扩展函数(PSF)),图像复原后就会产生很多的图像处理效应,如振铃效应,因此在复原图像时应尽可能地使用准确的 MTF 或 PSF。文献[14]较

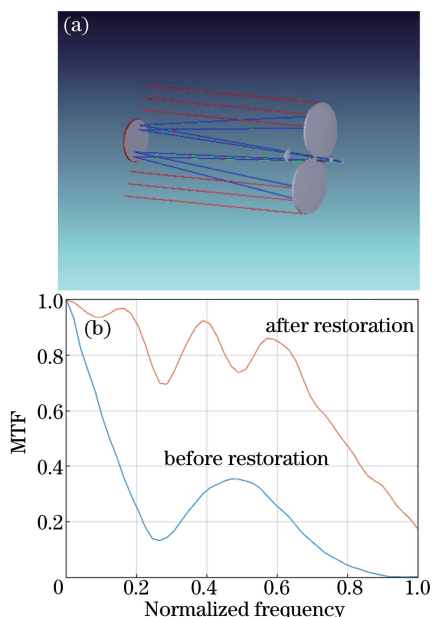


图 4 (a) 两子镜系统示意图; (b) 补偿前后的 MTF 曲线
Fig. 4 (a) Two-mirror OSA system;
(b) MTFs before and after compensation

为详细地研究了 OSA 系统由各视场像差不同导致的图像处理效应。当系统像差较大时,OSA 变为 PSF 空间变化系统,各个视场的像差不同导致了各个视场的 PSF 不同,此时若用某一视场的 PSF 复原整幅图像就会产生很多的人为处理效应,如图 5 所示^[14]。由图 5(a)可以明显看出图像处理效应产生的条纹。图 5(b)为考虑了像差校正的复原图像,像质明显优于图 5(a)。



图 5 (a) 无像差校正时的复原图像;
(b) 有像差校正时的复原图像
Fig. 5 Restored image (a) without and
(b) with aberration correction

存在较大像差时,对 OSA 的图像复原应该采用空间变化图像复原方法,以取得更好的效果。本文主要讨论 OSA 成像系统 MTF 的中频补偿,因此,空间变化系统的图像复原不是本文重点,详细方法可参见文献[15]。当填充因子较小时,中频段 MTF 下降为 0,此时中频信息丢失,无论采用什么

样的图像复原方法都无法恢复缺失的中频信息,此时应该采用其他方法补偿中频信息。

5 小填充因子 OSA 系统中频 MTF 缺失补偿

5.1 中频缺失补偿方案

当填充因子较小时,光学稀疏孔径系统具有中频缺失的特点,MTF 曲线呈现出带阻的特性,如图 3 所示,且填充因子越小,高频的 MTF 越好。

根据光学稀疏孔径的带阻特性和前述分析可知,成像过程是获取目标不同空间频率的信息的过程,这一过程可以是同时的也可以是非同时的,因此,提出利用两组系统分别成像,分别获取不同空间频率的图像,然后通过图像融合的方式,获取等效大口径系统成像图像,如图 6 所示。这一方法可以减小加工难度和运载质量。

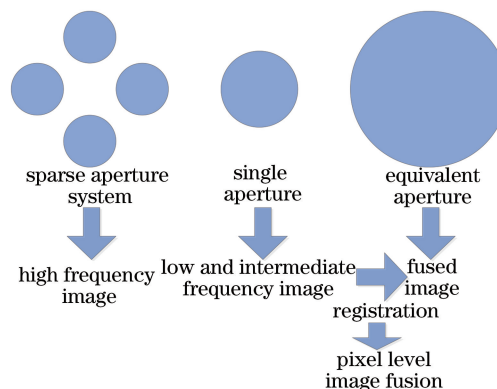


图 6 成像方案

Fig. 6 Imaging plan

5.2 中频缺失补偿原理的可行性

根据傅里叶光学和几何光学可知,物平面的强度分布函数是一个周期函数,可以看作是由很多频率、振幅和初相位不同的余弦函数合成的。对于非周期函数,可以看作是周期趋于无限大的周期函数。这也就是说,对于一维(二维图像与一维相似)离散图像,成像过程可以表示为

$$g(x) = \sum_0^{f_{cut}} F_{MTF}(f)A(f)\cos fx, \quad (2)$$

式中 $A(f)$ 为振幅。对于 MTF 中频缺失的光学稀疏孔径表示为

$$g_{OSA}(x) = \sum_0^{f_{low}} F_{MTFlow}(f)A(f)\cos fx + \sum_0^{f_{high}} F_{MTFhigh}(f)A(f)\cos fx, \quad (3)$$

式中 F_{MTFlow} 和 $F_{MTFhigh}$ 分别是传递函数的低频和高

频部分。对应的用于补偿中频的单孔径光学系统可表示为

$$g_{\text{single}}(x) = \sum_0^f F_{\text{MTFsingle}}(f)A(f)\cos fx, \quad (4)$$

式中 $F_{\text{MTFsingle}}$ 为单孔径光学系统的传递函数。可以看出,将二者进行简单的像素相加融合或其他频率域融合方法,即可获取全谱段的图像,即补偿了 OSA 成像系统缺失的中频图像。

5.3 四子镜 OSA 和单孔径 MTF 分析

选取填充因子为 0.3333 的四子镜环形排列的 OSA 结构(图 7)和单孔径结构光学系统的 MTF 进行分析和图像融合。

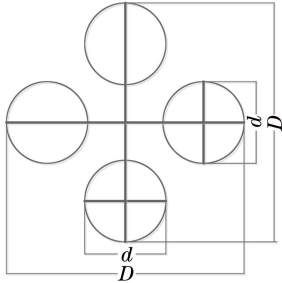


图 7 孔径结构图

Fig. 7 Aperture structure

四孔径系统的填充因子和截止频率分别为

$$F = \frac{4\pi d^2}{\pi D^2}, \quad (5)$$

$$f_{\text{Dc}} = \frac{D}{\lambda f}, \quad (6)$$

式中 D 和 d 分别为包围圆直径和子孔径直径, λ 为工作波长, f 为焦距。四孔径系统的传递函数为

$$F_{\text{MTF}}(f_x, f_y) = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 F_{\text{MTFd}}\left(f_x - \frac{x_i - x_j}{\lambda f}, f_y - \frac{y_i - y_j}{\lambda f}\right) = F_{\text{MTFd}}(f_x, f_y) + \frac{1}{4} \left[F_{\text{MTFd}}\left(f_x \pm \frac{D-d}{\lambda f}, f_y\right) + 2F_{\text{MTFd}}\left(f_x \pm \frac{D-d}{2\lambda f}, f_y \pm \frac{D-d}{2\lambda f}\right) + F_{\text{MTFd}}\left(f_x, f_y \pm \frac{D-d}{\lambda f}\right) \right], \quad (7)$$

式中 F_{MTFd} 为子孔径的传递函数。若 $d = \frac{\sqrt{F}}{2}D$, 则

$$\frac{(D-d)}{\lambda f} = \left(1 - \frac{\sqrt{F}}{2}\right) \frac{D}{\lambda f} = \left(1 - \frac{\sqrt{F}}{2}\right) f_{\text{Dc}}.$$

$$F_{\text{MTF}}(f_x, f_y) = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 F_{\text{MTFd}}\left(f_x - \frac{x_i - x_j}{\lambda f}, f_y - \frac{y_i - y_j}{\lambda f}\right) = F_{\text{MTFd}}(f_x, f_y) + \frac{1}{4} \left[F_{\text{MTFd}}\left(f_x \pm \left(1 - \frac{\sqrt{F}}{2}\right) f_{\text{Dc}}, f_y\right) + 2F_{\text{MTFd}}\left(f_x \pm \frac{(2 - \sqrt{F}) f_{\text{Dc}}}{4}, f_y \pm \frac{(2 - \sqrt{F}) f_{\text{Dc}}}{4}\right) + F_{\text{MTFd}}\left(f_x, f_y \pm \left(1 - \frac{\sqrt{F}}{2}\right) f_{\text{Dc}}\right) \right]. \quad (8)$$

根据傅里叶光学可知,四孔径系统在水平和竖直方向上缺失的频率范围 $[f_{x1}, f_{x2}]$ 为

$$f_{x1} = \frac{d}{\lambda f} = \frac{\sqrt{F}D}{2\lambda f} = \frac{\sqrt{F}}{2} f_{\text{Dc}}, \quad (9)$$

$$f_{x2} = \frac{(D-2d)}{\lambda f} = (1 - \sqrt{F}) \frac{D}{\lambda f} = (1 - \sqrt{F}) f_{\text{Dc}}. \quad (10)$$

对于单孔径系统,其传递函数的表达式为

$$F_{\text{MTF}}(f_x, f_y) = \frac{2}{\pi} \left[\arccos\left(\frac{\sqrt{f_x^2 + f_y^2}}{f_0}\right) - \left(\frac{\sqrt{f_x^2 + f_y^2}}{f_0}\right) \sqrt{1 - \left(\frac{\sqrt{f_x^2 + f_y^2}}{f_0}\right)^2} \right], \quad (11)$$

式中 f_0 为光学系统 MTF 的空间截止频率, $f_0 = \frac{D_x}{\lambda f}$, 其中 D_x 为单孔径直径。要使单孔径系统能够补偿合成孔径系统缺失的中频,在合成孔径成像系统缺失的频率下限对应的传递函数至少应为 0.3(根据光学设计经验提出)甚至更高,将 f_{x2} 代入(11)式,对光学系统 MTF 的方程求解:

$$F_{\text{MTF}}(f_x, 0) = \frac{2}{\pi} \left[\arccos\left(\frac{f_{x2}}{f_0}\right) - \left(\frac{f_{x2}}{f_0}\right) \sqrt{1 - \left(\frac{f_{x2}}{f_0}\right)^2} \right] = 0.3, \quad (12)$$

得出对应补偿中频 MTF 的孔径半径 D_x 。

5.4 图像融合方法

根据 5.2 分析可知,两套系统所成图像直接进行简单相加即可得到全空间频率的图像。采用加权融合,融合过程可以表示为

$$F(x, y) = \omega_1 A(x, y) + \omega_2 B(x, y), \quad (13)$$

式中 ω_1 和 ω_2 为加权系数, $\omega_1 + \omega_2 = 1$ 。

由于图像融合的目的是补偿 OSA 成像系统缺失的中频信息,对于真实图像来说,图像可能不包含某些空间频率的图像时,采用平均加权或确定权值的图像融合并不能使图像的信息量最大。因此,权值需要根据两幅图像包含的空间频率的幅值确定:

$$a = \int_{f_{x2}}^{f_{Dc}} A(f) df, \quad (14)$$

$$b = \int_{f_{x1}}^{f_{x2}} B(f) df, \quad (15)$$

$$\omega_1 = \frac{a}{a+b}, \quad (16)$$

$$\omega_2 = \frac{b}{a+b}, \quad (17)$$

式中 A 、 B 分别表示待融合的两幅图像的频谱强度, a 表示 OSA 图像频谱的高频谱段强度积分, b 表示单一孔径补偿系统频谱的中频谱段强度积分。

5.5 仿真实验

采用 Zemax 和 Matlab 软件对提出的方法进行仿真实验。鉴于辐射状靶标能够直观看出 OSA 系统缺失的空间频率图像, 因此选其作为实验图像。在 Zemax 中设计四孔径 OSA 成像系统, 填充因子为 0.3333, 等效孔径直径为 540 mm。根据 5.3 节计算可知, 与其互补的单一孔径成像系统的孔径直径为 390 mm。如果单一孔径很大, 合成孔径等效孔径略大于单一孔径, 对成像分辨率的提升有限, 应用意义不大。此时, 将单一孔径互补合成孔径成像系统缺失的频率下限对应的传递函数降低, 然后通过图像复原的方式提升单一孔径光学系统的传递函数。在本节例子中, 等效孔径相比单一孔径直径增加了 150 mm (38.5%), 有较大的提升, 有一定的应用价值。

系统如图 8 所示, 在 Zemax 中提取 PSF 和 MTF 用于图像仿真。图 9 给出了两系统在水平和垂直方向上的传递函数, 以及等效大口径光学系统的 MTF。

图 10(a) 和 (b) 分别为四孔径 OSA 成像及与其互补的单一孔径成像系统图像。图 10(a) 在水平和垂直方向上中频条纹缺失 (图中红框显示), 而高频条纹较清晰; 图 10(b) 的高频条纹丢失 (图中红框显示), 而中频存在。图 10(c) 为等效孔径系统图像, 中高频条纹均存在; 图 10(d) 为融合后图像, 同时包含了水平和垂直方向上的中频和低频条纹。

6 结 论

对比了 OSA 系统的不同成像方式和成像原理, 分析了 OSA 系统中频缺失的机理及不同填充因子条件下中频 MTF 的变化。根据中频 MTF 下降和缺失的原因, 提出两种 MTF 中频补偿方式: 针

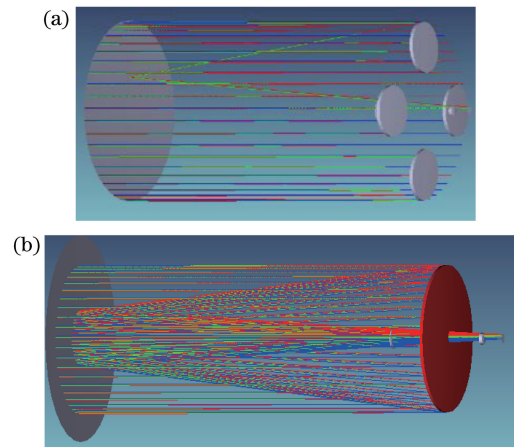


图 8 Zemax 中设计的 (a) 四孔径系统与 (b) 单一孔径系统
Fig. 8 Optical design of (a) four-aperture optical system and (b) single aperture system in Zemax

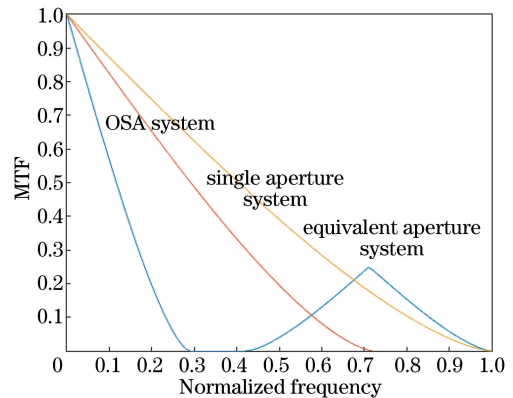


图 9 两组光学系统的水平和垂直方向 MTF
Fig. 9 Horizontal and vertical direction MTF of two sets of optical systems

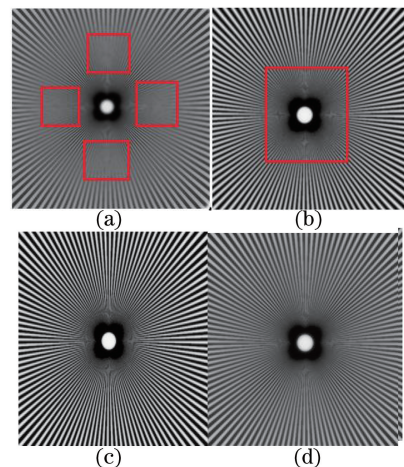


图 10 仿真实验结果。(a) 四孔径系统成像; (b) 单一孔径系统成像; (c) 等效孔径成像; (d) 融合图像
Fig. 10 Simulation results of (a) OSA system imaging, (b) single aperture system imaging, (c) equivalent system imaging, and (d) fusion image

对 MTF 中频下降,采用图像复原的方式进行补偿;对于 MTF 中频缺失,采用两个互补系统分别成像再融合的方式进行补偿。实验证明,图像复原能够大幅提高大填充因子条件下 MTF 的中频幅值。对于小填充因子系统,通过辐射状靶标成像实验,直观证明了互补系统分别成像在融合补偿中频 MTF 方面的可行性。

参 考 文 献

- [1] Mugnier L M, Rousset G, Cassaing F. Aperture configuration optimality criterion for phased arrays of optical telescopes[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1996, 13(12):2367-2374.
- [2] Tcherniavski I, Kahrizi M. Optimization of the optical sparse array configuration [J]. *Optical Engineering*, 2005, 44(10): 103201.
- [3] Wei X F, Geng Z X, Cao L, et al. A novel imaging performance index and pupil optimization method for optical synthetic aperture system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(11): 1111001.
魏小峰, 耿则勋, 曹力, 等. 一种新的光学合成孔径系统成像性能指标与光瞳优化方法[J]. *光学学报*, 2014, 34(11): 1111001.
- [4] Stokes A J, Duncan B D, Dierking M P. Improving mid-frequency contrast in sparse aperture optical imaging systems based upon the Golay-9 array [J]. *Optics Express*, 2010, 18(5):4417-4427.
- [5] Wang S Q, Rao C H, Jiang W H, et al. Analysis of spatial arrangement for optical synthetic aperture imaging system with four sub-apertures [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(4):692-699.
王胜千, 饶长辉, 姜文汉, 等. 四子孔径光学合成孔径成像系统空间排布性能分析[J]. *光学学报*, 2008, 28(4):692-699.
- [6] Liang S T, Yang J F, Xue B. Imaging research on a new nine-sub-aperture sparse-aperture system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(s2): 216-220.
- 梁士通, 杨建峰, 薛彬. 新型九子镜稀疏孔径结构成像研究[J]. *光学学报*, 2009, 29(s2): 216-220.
- [7] Wu Q Y, Qian L, Shen W M. Research on pupil configuration of dual three sub-apertures sparse-aperture system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(2):187-192.
吴泉英, 钱霖, 沈为民. 复合三子镜稀疏孔径光瞳结构的研究[J]. *光学学报*, 2006, 26(2):187-192.
- [8] Salvaggio P S, Schott J R, McKeown D M. Genetic apertures: an improved sparse aperture design framework [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(12):3182-3191.
- [9] Bell K D, Boucher R H, Vacek R, et al. Assessment of large aperture lightweight imaging concepts [C]// *Aerospace Applications Conference*, 1996, 3: 187-203.
- [10] Fienup J R, Miller J J. Comparison of reconstruction algorithms for images from sparse-aperture systems [C]. *SPIE*, 2002, 4792: 1-9.
- [11] Wang D, Wang Q, Han Y, et al. Experimental study on imaging and image restoration of optical sparse aperture systems [J]. *Optical Engineering*, 2007, 46(10):13053-13057.
- [12] Zhou Z, Wang D, Wang Y. Effect of noise on the performance of image restoration in an optical sparse aperture system [J]. *Journal of Optics*, 2011, 13(7): 075502.
- [13] Goodman J W. *Introduction to Fourier optics* [M]. New York: Roberts and Company Publishers, 2005.
- [14] Salvaggio P S, Schott J R, McKeown D M. Validation of modeled sparse aperture post-processing artifacts [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(4):761-770.
- [15] Zhou C H, Wang Z L, Liu S K. Method of image restoration directly based on spatial varied point spread function [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(1): 0110001.
周程灏, 王治乐, 刘尚阔. 基于空间变化点扩展函数的图像直接复原方法[J]. *光学学报*, 2017, 37(1): 0110001.