

doi:10.3788/gzxb20144303.0322001

反射式光学像面拼接方法研究

王伟, 李林

(北京理工大学 光电学院, 北京 100081)

摘 要: 目前, 电荷耦合图像传感器的像面尺寸不足以满足现代空间光学系统的需求, 本文采用反射式光学系统拼接的方法来扩大光学系统的视场. 针对光学拼接带来的渐晕和使调制传递函数变小的问题, 研究了一种带有 6 个反射面的反射镜光学拼接系统, 分析了反射镜拼接系统渐晕的特点, 提出采用子图像间渐晕补偿法消除子像面交界处的渐晕, 并对像面边缘的渐晕进行补偿. 另外, 通过合成点扩散函数法来改善光学拼接系统的调制传递函数, 结果表明: 合成图像的调制传递函数与子图像的调制传递函数相比, 虽然截止频率没有提高, 但在同一频率处的值有明显的提高.

关键词: 光学设计; 光学设备; 光学拼接; CCD 相机; 反射式分光; 渐晕补偿; 调制传递函数补偿

中图分类号: O438.2; O439

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)03-0322001-7

Reflector Mirror Based Optical Butting

WANG Wei, LI Lin

(School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: The size of a single CCD cannot meet the requirements of modern optical system. To enlarge the field of optical system, a reflector based butting system was adopted. Aiming at the problems of vignetting and decline of modulation transfer function caused by butting, a reflector based butting system which has 6 reflectors was investigated. By analyzing the feature of vignetting, a sub-image pixel overlapping method was proposed to reduce the vignetting. At the same time, vignetting at edge was restored, and the modulation transfer function was improved by compositive point spread function. The results show that though the cut-off frequency has not been increased, the value of modulation transfer function is improved obviously.

Key words: Optical design; Optical devices; CCD cameras; Optical butting; Reflector-based butting; Vignetting compensation; Modulation Transfer Function compensation

OCIS Codes: 220.0220; 120.6085; 040.1520

0 引言

空间相机是装载在卫星或飞机上来拍摄空间或地表景物来获取目标的光学仪器, 正在向宽成像谱段、大覆盖范围、实时传输的方向不断发展^[1]. 随着空间相机技术的发展, 人们希望拍摄到的图像能提供越来越高的地面分辨率和越来越大的覆盖范围. 可以通过增加光学系统的焦距来获得更高的分辨率. 然而系统的焦距越大, 想要获得相同的地面覆盖范围, 需要系统有更大的视场^[2]. 焦距和视场同时增大必然要求系统有更

大的像面尺寸, 现有的电荷耦合器件 (Charge-Coupled Device, CCD) 靶面的尺寸可能远小于所要求像面尺寸, 不能满足成像的要求. 虽然近年来 CCD 技术发展很快, 但在很长一段时间还是不能满足长焦距大视场光学系统的要求. CCD 的有效尺寸和光学系统的长焦距大视场之间的矛盾已经成了空间相机技术发展的一个瓶颈^[3]. 目前普遍使用像面拼接法来解决这个问题. 像面拼接有两种形式, 一种是机械拼接, 另一种是光学拼接. 机械拼接是将多片图像传感器紧密排列在一起组成一个大面积感光面图像传感器阵列, 常用的有直接

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (No. 2013CB733100) 资助

第一作者: 王伟 (1987-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光电仪器和设备. Email: wangwei6563@gmail.com

导师 (通讯作者): 李林 (1957-), 男, 教授, 主要研究方向为近代光学与光电检测技术及仪器. Email: li_lin@263.net

收稿日期: 2013-07-05; 录用日期: 2013-10-16

<http://www.photon.ac.cn>

拼接和交错拼接两种方式^[4-5].这种拼接方式的优点是可实现很大的图像传感器阵列,但是会有成像感光的盲区,不能做到无缝拼接,而且这种拼接方法还需要复杂的电路系统相配合.对于航空航天相机而言,拼接间隙直接影响到图像的完整性,所以对于这类系统往往采用光学拼接的方法来扩大视场.

光学拼接是利用光学器件将视场分割成若干个子视场,这些视场是空间分离的,在这些子视场成像面各放置一块常规的成像器件接收这些子视场的图像,再将接收到的子视场的图像拼接起来就实现了无缝拼接.光学拼接有多种方法,如多系统拼接、二次像面拼接和分光路拼接等^[6].这些方法各有优缺点,分光路拼接因结构紧凑体积小,在空间相机中得到了广泛应用^[7-9].分光路拼接按照分光元件的不同又可分为半反半透式分光、折射式分光和反射式分光.采用反射镜的反射式分光拼接具有能量利用率高、热稳定性好、体积重量小,拼接准确度高和长度较长的优势,是未来光学拼接主要发展方向^[10].对于光学拼接,由于分光元件在实际像面的前面,有一定的距离,必然会有轴外视场光线的切割,引起渐晕,同时也会对光学传递函数造成影响.

本文针对一个空间光学系统的实例,采用反射式分光的形式,将总视场分成六个子视场或子像面,其中5个子像面是经过反射镜反射的得到,另一个是由直射获得.由六个空间位置分离的 CCD 分别接收这六个子像面,通过将这六个子像面拼接起来以实现扩大视场的目的.分析和研究了由于分光所带来的渐晕和光学传递函数的影响,采用理论分析和光学设计软件结合的方法,准确地得到了系统的渐晕和传递函数,并提出了渐晕和光学传递函数的补偿方法.

1 系统建模与设计

1.1 系统建模

所设计的光学成像系统是一个空间折轴光学系统,基本参量为:入瞳口径 750 mm,焦距 7 500 mm,视场 $1.8^\circ \times 2.3^\circ$,相对孔径 1:10.系统基本结构如图 1.

系统使用的 CCD 为全帧结构面阵 CCD,分辨率为 $10\text{ K} \times 10\text{ K}$,像元尺寸为 $9 \times 9\ \mu\text{m}^2$.如果只使用一个 CCD,所能实现的视场为 $0.68^\circ \times 0.68^\circ$,视场所能覆盖的范围只有 $6 \times 6\ \text{km}^2$.为了满足成像的需求,设计了一个 2×3 的分割方案,在靠近像面的一端放置了一个拼接分光反射镜组,如图 2.图 2 中,除一个为直射视场外,其余各面为反射面,反射面与基准面的夹角都是 45° ,朝各个不同的方向反射光线.经过反射镜反射之后,分别由各 CCD 接收.整个系统的视场扩大到 $1.37^\circ \times 2.06^\circ$,所覆盖的范围也扩大到 $12 \times 18\ \text{km}^2$.

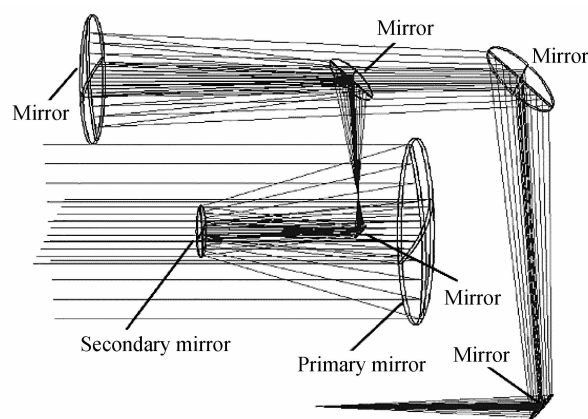


图 1 光学成像系统

Fig. 1 Optical imaging system

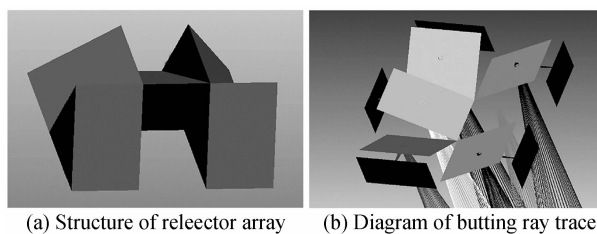


图 2 拼接分光反射镜组

Fig. 2 Diagram of reflector array

拼接方法没有运动部件,子像面间也较少有相互遮挡,但是由于反射镜口径的存在,会给系统带来渐晕以及光学传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 的下降.

1.2 光学拼接建模

本文采用光学设计软件 ZEMAX 来分析系统的性能,利用 ZEMAX 的多重结构来构建光学拼接系统.系统有六个子像面,其中五个面为 MIRROR.在 ZEMAX 中通过面的旋转和玻璃材料的操作数来实现这六重结构,具体参量见表 1.

表 1 反射镜组的偏心、倾斜和材料

Table 1 Decenter, tilt and material of reflector array

	Conf. 1	Conf. 2	Conf. 3	Conf. 4	Conf. 5	Conf. 6
X-decenter/mm	0	0	45	90	45	-90
Y-decenter/mm	45	-45	90	45	-90	45
X-tilt/(°)	0	0	-90	0	-90	0
Y-tilt/(°)	0	-45	45	45	-45	45
Glass	N/A	mirror	mirror	mirror	mirror	mirror

2 渐晕分析与补偿

产生渐晕的原因可能有多种,主要是由于光学系统的口径限制和机械部件的遮拦引起的.在分光光学系统中,除了光学系统口径限制和机械部件遮拦引起的渐晕外,还有由分光引起的渐晕.即由于拼接分光反射镜的边界切割光束引起的渐晕.具体表现为轴外各视场在各子像面边缘存在较严重的渐晕,而在反射镜

中心的视场则没有渐晕. 本文所讨论的渐晕分析与补偿主要是分光引起的渐晕的分析与补偿.

2.1 反射镜的渐晕分析

对于轴外边缘视场,光线会被几块反射镜分别接收,这样会带来渐晕. 根据反射镜的基准面到像面的距离,可以由反射镜在基准面上的投影将视场划分为6个区域,如图3.

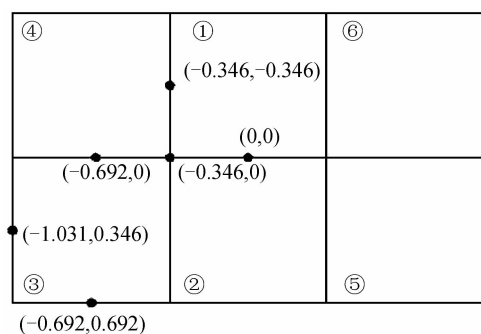


图3 由反射镜在基准面上的投影,将视场划分的6个区域
Fig.3 Six fields of view divided according to the projection on the reference surface of the reflector

整个拼接分光反射镜组是对称的,可以选取6个典型的视场来分析系统的渐晕. 根据主光线在反射镜基准面上的位置可以计算出这6个视场为: $(0^\circ, 0^\circ)$, $(-0.346^\circ, -0.346^\circ)$, $(-0.692^\circ, 0^\circ)$, $(-0.346^\circ, 0^\circ)$, $(-0.692^\circ, 0.692^\circ)$ 和 $(-1.031^\circ, 0.346^\circ)$,如图3所示. 在ZEMAX软件中,分析在某一个面上各个视场的光线通过率,由渐晕的定义可知,光线通过率即为这个面上的面渐晕系数. 利用软件的这个功能即可方便地求出各个视场下的面渐晕系数,见表2.

$(0^\circ, 0^\circ)$ 视场在结构1和结构2上的光线通过率分别为50.11%和49.84%,可见这个视场的渐晕比较严重. $(0^\circ, 0^\circ)$ 视场位于整个图像的中心,必须优先对 $(0^\circ, 0^\circ)$ 视场进行渐晕补偿. 渐晕的补偿方法见2.2节. $(-0.346^\circ, -0.346^\circ)$ 视场在结构1上有70%的光线通过率,在结构4上只有30%的光线,因为这个视场有X轴方向的倾斜,与反射镜的倾斜方向相同. $(-0.692^\circ, 0^\circ)$ 视场虽然也有倾斜,但是是Y轴方向的倾斜. 与反射镜的倾斜方向垂直,在两个反射镜上的通

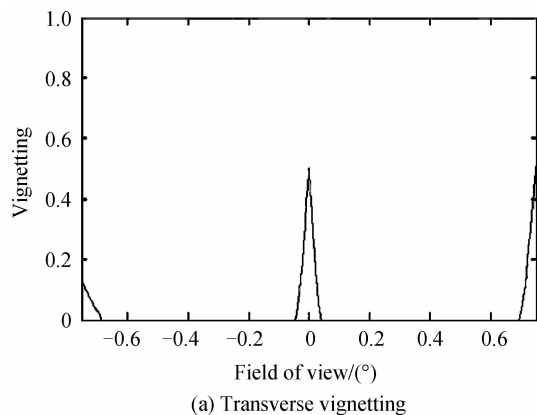
表2 各个视场下的光线通过率

Table 2 Rate of light through in each field of view

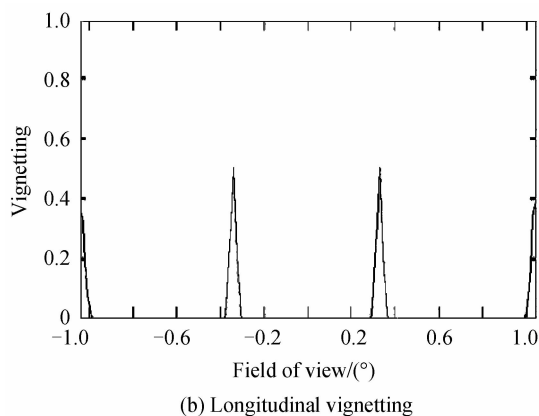
FOV/(°)	Conf. 1	Conf. 2	Conf. 3	Conf. 4	Conf. 5	Conf. 6
$(0, 0) / (\%)$	50.14	49.84	0	0	0	0
$(-0.346, -0.346) / (\%)$	69.26	0	0	30.55	0	0
$(-0.692, 0) / (\%)$	0	0	49.85	49.84	0	0
$(-0.346, 0) / (\%)$	34.73	36.06	13.67	13.78	0	0
$(-0.692, 0.692) / (\%)$	0	0	87.67	0	0	0
$(-1.031, 0.346) / (\%)$	0	0	100	0	0	0

过率接近50%. 除视场边缘外,渐晕最严重的视场为 $(-0.346^\circ, 0^\circ)$,因为它被四块反射镜所分割,可以看到结构1和结构3与结构2和结构4的光线通过率加起来正好都为接近50%. $(-0.692^\circ, 0.692^\circ)$ 视场是边缘的视场,由于有一部分光线已经不能接收到,存在严重的渐晕. 而 $(-1.031^\circ, 0.346^\circ)$ 所有光线被全部接收,不存在渐晕.

为了更全面地评价系统的渐晕情况,以及对渐晕进行补偿,作出了图3中横向和纵向的渐晕随视场变化的曲线,如图4. 在图中把-1到1视场每隔0.01



(a) Transverse vignetting



(b) Longitudinal vignetting

图4 横向和纵向渐晕曲线

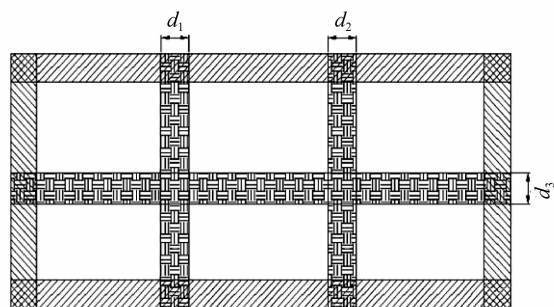
Fig.4 Diagrams of vignetting

做细分,分别计算它们的渐晕系数,并在MATLAB软件中拟合,得到图4中的渐晕曲线图.

2.2 子像面间的渐晕补偿

对于由分光产生的渐晕,可以采用子像面间的重叠来补偿^[11-14]. 分析可知,在反射镜基准面上光斑的直径应该为: $(750/7\ 500) \times 55\text{ mm} = 5.5\text{ mm}$,实际上反射镜是倾斜的,光斑并不为圆形,并且直径也不一定为5.5 mm,它们的光斑直径在10 mm到20 mm之间. 但

是这并不影响像面重叠的宽度,因为这些光线最后在像面上的成像位置只与主光线的位置有关,所以在分界处的重叠宽度应该是一样的,即 $d_1 = d_2 = d_3 = 2.75 \text{ mm}$,如图 5. 这样的处理之后,分界面处的渐晕就消除了.



■ Vignetting in sub image boundary
 ▨ Vignetting in edge(longtitude)
 ▩ Vignetting in edge(transverse) ▧ Vignetting in edge(both transverse and longitude)

图 5 像面间的重叠消除渐晕
 Fig. 5 Eliminating vignetting by overlapping pixel of sub-image

在边缘视场,由于反射镜不垂直于光轴方向而是与光轴方向成 45° 角,会有部分光线不能被反射镜反射,从而引起像面上光照度的下降. 除此以外,轴外视场的光照度还会随着视场角的增加面减小,像面上的光照度可以表示为

$$E_\omega = K_s E_0 \cos^4 \omega \quad (1)$$

式中, E_0 为中心视场的辐照度, E_ω 为轴外点的辐照度, K_s 为面渐晕系数. E_ω 可以根据像点位置和焦距等参量确定. 所以,渐晕补偿的关键点在于确定面渐晕系数.

通常,确定面渐晕系数的方法有 LUT 法(查表法)、函数逼近法和逐行扫描法等方法. LUT 法常常须要相机的参量与飞行状态信息,这些信息往往不易获得或随拍照时的具体情况而变化,并且在处理实时图像时,不可预知的物体信息也会给图像拼接带来困难. 函数逼近法是对单个像元的补偿因子进行标定,然后对各个像元的补偿因子进行拟合,得出整个像面上的渐晕补偿公式. 逐行逼近扫描法与函数逼近法相似,但是逐行扫描是对每一行进行拟合.

本文使用的反射镜均为平面反射镜,所以横向或纵向坐标相同的视场位置的渐晕是相等的. 横向渐晕和纵向的渐均只占整个视场的很小的一部分. 在视场的四个角落处有部分的重叠,如图 5. 利用这个特点可以由图 4 的横向和纵向的面渐晕系数之积得到整个像面上的面渐晕系数. 即 $K_s = K_x \times K_y$, 其中 K_x 为横向渐晕的拟合函数, K_y 为纵向渐晕的拟合函数. 根据像点的位置确定的大小,即可以按式(1)进行补偿.

3 光学传递函数分析与补偿

对于光学拼接,由于拼接元件不位在像平面上,所

以会对不同视场的光线产生光线切割,造成渐晕,同时也会对 MTF 产生影响,因为 MTF 与实际的通光口径有关. 衍射是光波传播过程中的一种基本现象,惠更斯-菲涅尔原理可以很好地描述光波在自由空间中传播,并且可以解释光的衍射现象. 惠更斯-菲涅尔原理可以表述为:“波面上任何一个未受阻挡的面元,可以看作是一个子波源,发射频率与入射波相同的波面子波,在其后任意点的光振动是所有子波的叠加的结果”.

基尔霍夫在处理衍射计算问题时,没有考虑电磁场的其它坐标分量,只考虑了电场分量 E , 并将 E 作为标量处理. 在满足基尔霍夫边界条件和索末菲辐射条件的情况下,考察一个点光源,其光波部分被遮挡,在遮挡屏后面观察点 P 的光场强度可以表示为

$$E(P) = \frac{1}{j\lambda} \iint \frac{A \exp(jkr_0)}{r_0} \frac{\exp(jkr)}{r} \left(\frac{\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2}{2} \right) d\sigma \quad (2)$$

式(2)称为基尔霍夫衍射公式, j 为虚数单位, λ 表示点光源所发出光波的波长, $A \exp(jkr_0)/r_0$ 表示球面波在开孔 Σ 上的复振幅分布,且 A 为常量. $\exp(jkr)/r$ 表示 Σ 上任意点处小面元发出的球面波对 P 点的贡献量. $(\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2)/2$ 表示方向因子,大多数衍射问题都满足旁轴条件,在这种情况下可令其为 1.

式(2)的化简和推导建立在球面波的基础上,对于实际的衍射装置,照明物体的光源可以是点光源,线光源和各种复杂光源;衍射物体可以是反射物体也可以是透射物体;可以是振幅调制型物体也可以是相位调制型物体. 为使计算公式有普遍性,定义单色光源到达衍射孔径平面 (ξ, η) 时的复振幅分布为 $B(\xi, \eta)$, 任意复振幅透射系数为 $T(\xi, \eta)$ (对于反射物体, $T(\xi, \eta)$ 表示复振幅反射系数).

$$T(\xi, \eta) = \begin{cases} |T(\xi, \eta)| \exp[j\Phi_r(\xi, \eta)] & (\xi, \eta) \in \Sigma \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (3)$$

式中 $|T(\xi, \eta)|$ 表示衍射物体对振幅的调制, $\exp[j\Phi_r(\xi, \eta)]$ 表示对相位的调制. 于是透过衍射物体(或从衍射物体反射)的光波复振幅可以表示为 $A(\xi, \eta) = B(\xi, \eta) T(\xi, \eta)$. 因此式(2)可以表示为

$$E(P) = K \iint A(\xi, \eta) \frac{\exp(jkr)}{r} dx dy \quad (4)$$

式中, $K = \frac{1}{j\lambda}$. 在满足菲涅尔近似条件的情况下,式(4)化简即得到菲涅尔衍射积分公式.

$$E(x, y) = \frac{1}{j\lambda d} \iint A(\xi, \eta) \exp(jkd) \exp \left\{ j \frac{k}{2d} [(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2] \right\} d\xi d\eta \quad (5)$$

一个点光源 S 发出的球面波在透镜处的复振幅分

布为

$$B(\xi, \eta) = B_0 \exp \left[-j \frac{k}{p} (x^2 + y^2) \right] \quad (6)$$

式中, B_0 为点光源 S 发出的球面波在物平面中心的复振幅, p 为点光源 S 与透镜的距离. 在成像光学系统中, 透镜对光波的作用可以用透射系数

$$T(\xi, \eta) = E_0(\xi, \eta) \exp \left[-j \frac{k}{f} (x^2 + y^2) \right] P(\xi, \eta) \quad (7)$$

来表示, 式中 E_0 为透镜中心光线的复振幅, $P(\xi, \eta)$ 为透镜的孔径函数. 那么点光源 S 发出的球面波在透镜处的复振幅强度为

$$A'(\xi, \eta) = B_0 E_0(\xi, \eta) \exp \left[-j \frac{k}{p} (x^2 + y^2) \right] \cdot \exp \left[-j \frac{k}{f} (x^2 + y^2) \right] P(\xi, \eta) \quad (8)$$

将式(8)代入菲涅尔衍射积分式(5)并忽略相位因子, 得到观察面上的复振幅分布为

$$h(x', y') = c' \exp \left[-j \frac{k}{d} (x'\xi + y'\eta) \right] d\xi d\eta \quad (9)$$

式中 $c' = E_0 / j\lambda q$ 为复常量. 光学系统可以看成是线性空间不变系统, 它的脉冲响应函数是物面上某点的菲涅尔衍射, 据此定义可知 $h(x', y')$ 即为光学系统的振幅点扩散函数. 令, $f_\xi = \xi / \lambda d$, $f_\eta = \eta / \lambda d$, 则式(9)可以改写为

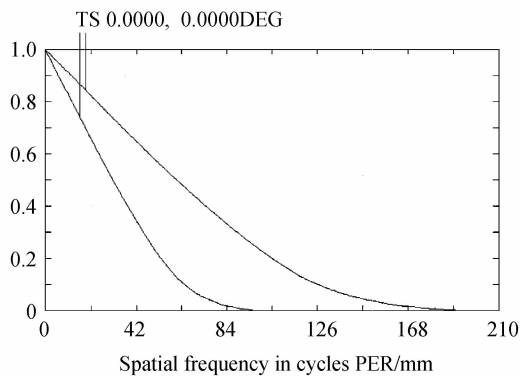
$$h(x', y') = c' \iint P(\lambda d f_\xi, \lambda d f_\eta) \exp \left[-j 2\pi (f_\xi x' + f_\eta y') \right] d f_\xi d f_\eta \quad (10)$$

对式(10)进行傅里叶变换, 并将坐标轴取相反方向得到

$$H(f_\xi, f_\eta) = P(\lambda d f_\xi, \lambda d f_\eta) \quad (11)$$

对于非相干成像系统, 用强度点扩散函数 $H_i(x', y') = |h(x', y')|^2$ 来表示系统的脉冲响应函数, 而光学传递函数定义为归一化的强度点扩散函数的傅里叶变换^[15], 即

$$\text{OTF}(f_x, f_y) = \frac{\iint P(\lambda d f_\xi, \lambda d f_\eta) P[\lambda d (f_\xi + f_x), \lambda d (f_\eta + f_y)] d f_\xi d f_\eta}{\iint P(\lambda d f_\xi, \lambda d f_\eta) d f_\xi d f_\eta} \quad (12)$$



(a) Configuration 1

直观的解释是, 归一化光学传递函数是光瞳函数平移到 $(-\lambda d f_\xi, -\lambda d f_\eta)$ 之后与原来的光瞳函数的重叠面积与光瞳面积之比^[16], 如图 6.

MTF 是衡量一个成像系统成像质量的好坏最可靠的标准, 定义为光学传递函数的模值, 即振幅传递函数. MTF 截止频率越高, 系统分辨率也就越高, 所得到的图像细节也就越清楚.

在像面分割过程中, 反射镜会切割光线, 其作用相当于给系统加了光阑, 使系统的光瞳 $P(\lambda d f_\xi, \lambda d f_\eta)$ 变小, 会引起光学传递函数的截止频率变小. 而 MTF 是光学传递函数 OTF 的模, 即 $\text{MTF}(f_x, f_y) = |\text{OTF}(f_x, f_y)|$, 所以 MTF 的截止频率会随着光学传递函数的截止频率变小.

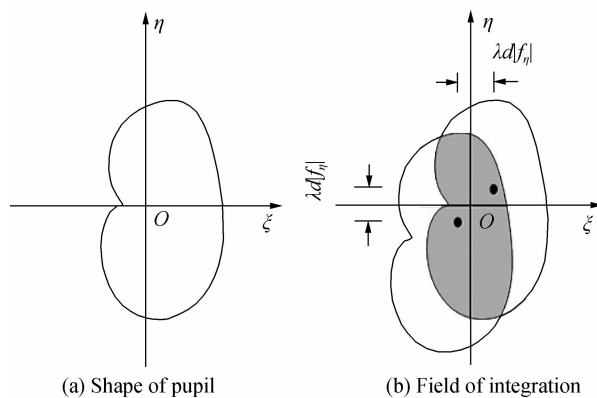
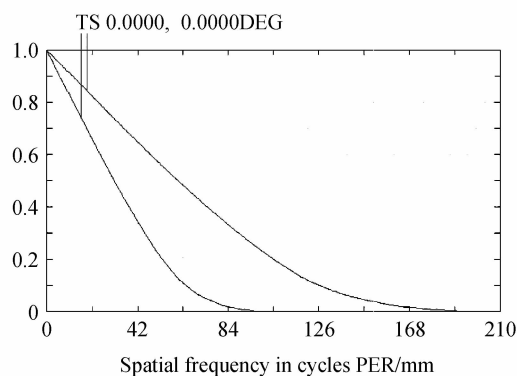


图 6 光瞳形状和积分域

Fig. 6 Shape of pupil and field of integration

在没有光束分割的地方, MTF 曲线和未加反射镜时系统的 MTF 曲线是一样的, 对成像质量没有影响. 但是, 在反射镜边缘处的视场, MTF 有严重的下降. 和渐晕的分析一样, 系统的 MTF 也跟子镜的边缘密切相关. 选取 $(0^\circ, 0^\circ)$, $(-0.346, 0)$ 这两个视场来研究分析系统整体的 MTF 的下降情况.

可以看到, 在 $(0^\circ, 0^\circ)$ 视场, 子午 MTF 没有明显的下降, 但是孤立 MTF 的截止频率从 210 lp/mm 下降到 100 lp/mm, 为原来的一半. 在 $(-0.346^\circ, 0^\circ)$ 视场子



(b) Configuration 2

图 7 $(0^\circ, 0^\circ)$ 视场分别在结构 1 和 2 上的 MTF

Fig. 7 MTF of field $(0^\circ, 0^\circ)$ on configuration 1 and 2

午和孤矢的截止频率都下降到了 100 lp/mm. 存在 MTF 下降的范围是以这些视场点为中心, 半径为 2.75 mm 的圆形区域. 随着视场远离这些视场点, MTF 迅速回到未加分光系统之前的水平.

在 2.2 节讨论渐晕补偿时, 将几个子像面边缘区域重叠即可以消除渐晕. 子系统图像对应像素值相加得到一幅完整的图像, 所以拼接图像的点扩散函数 (Point Spread Function, PSF) 也是几个子系统的 PSF 相叠加的结果, 即: $PSF(x, y) = \sum_{i=1}^k PSF_k(x, y)$. 根据傅

里叶光学的理论, PSF 的傅里叶变换就是光学系统的传递函数, 取其模值就得到 MTF. 即 $MTF(f_\xi, f_\eta) = |F\{PSF(f_\xi, f_\eta)\}|$.

同样以图 7 和图 8 中 $(0^\circ, 0^\circ)$ 视场和 $(-0.346^\circ, 0^\circ)$ 视场为例, 选择好视场和多重结构数, 然后从 ZEMAX 软件中导出 TXT 格式的 PSF 数据, 导入 MATLAB 软件中, 利用其快速傅里叶分析功能模块, 进行傅里叶变换, 得到合成的 MTF. 在这两个视场下, 合成 PSF 方法得到的 MTF 曲线与未合成之前的子系统的 MTF 曲

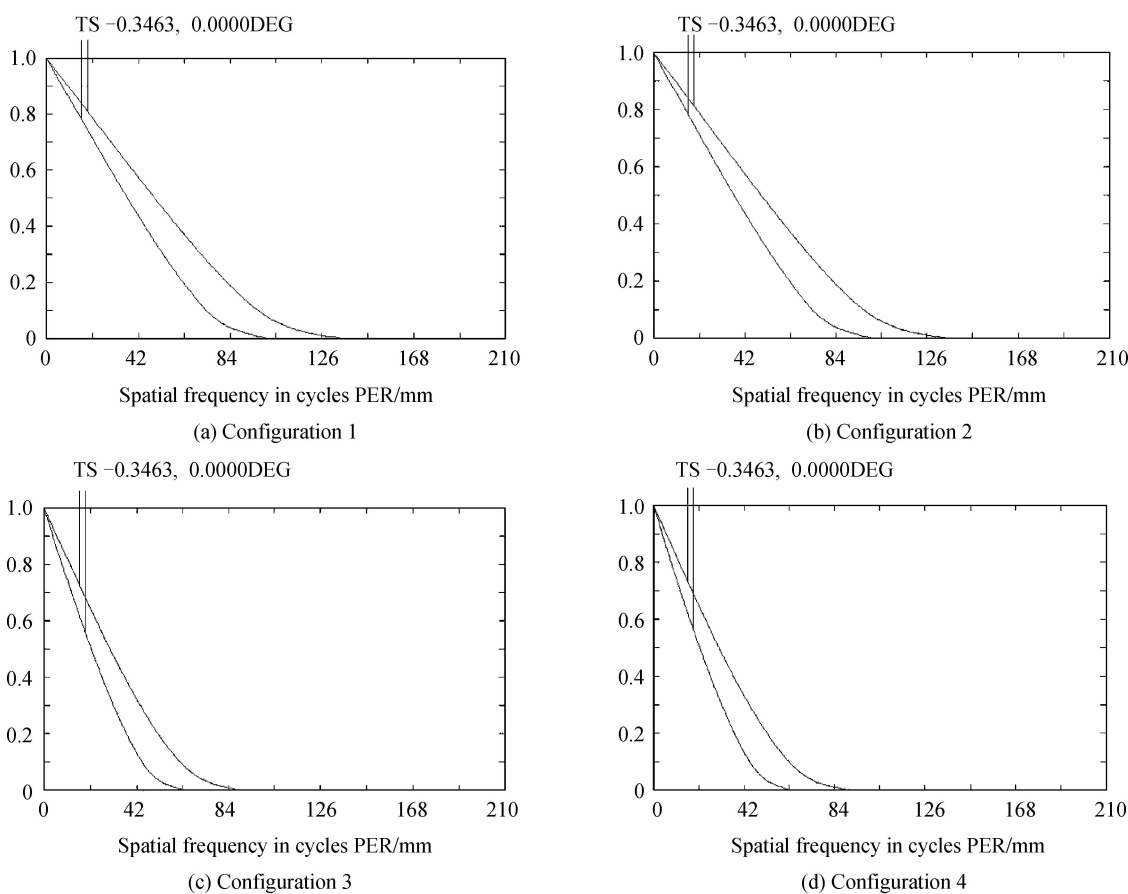


图 8 $(-0.346^\circ, 0^\circ)$ 视场分别在结构 1、2、3 和 4 上的 MTF
Fig. 8 MTF of field $(-0.346^\circ, 0^\circ)$ on configuration 1, 2, 3 and 4

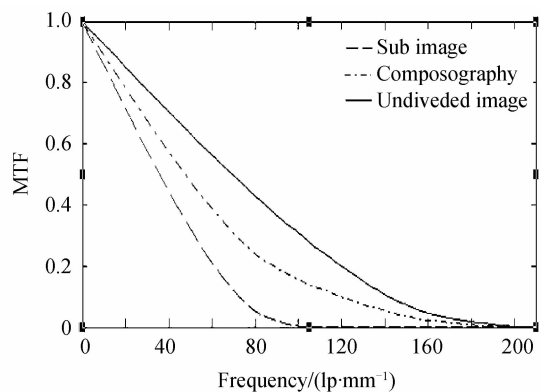


图 9 $(0^\circ, 0^\circ)$ 视场单个子系统与补偿后的 MTF
Fig. 9 MTF of sub-image system and combined image system of field $(0^\circ, 0^\circ)$

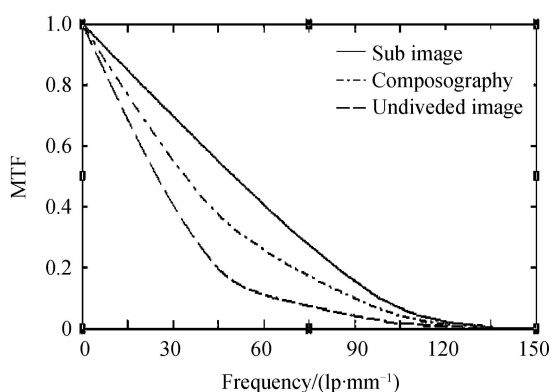


图 10 $(-0.346^\circ, 0^\circ)$ 单个子系统 MTF 与补偿后的 MTF
Fig. 10 MTF of sub-image system and combined image system of field $(-0.346^\circ, 0^\circ)$

线如图 9 和 10.

由图 10 可见,合成以后,MTF 有大幅的提升,与没有光线切割时的情况基本吻合,获得了很好的效果.

4 结论

光学拼接是目前大视场长焦距空间光学系统解决探测器尺寸不够的一种有效的方法.本文分析了光学拼接所带来的渐晕影响,提出了渐晕补偿的方法,有效地解决了光学拼接带来的渐晕问题.同时,对由于光学拼接所带来的系统光学传递函数 MTF 的下降作了全面的分析,采用合成子系统点扩散函数 PSF 法对 MTF 进行补偿,结果显示 MTF 得到了有效的提升.

参考文献

- [1] LIU Ming, XIU Ji-hong, LIU Gang, *et al.* Developments of overseas aerial reconnaissance camera[J]. *Electronics optics & Control*, 2004, 11(1): 56-59.
刘明,修吉宏,刘钢,等.国外航空侦察相机的发展[J].*光电与控制*, 2004, 11(1): 56-59.
- [2] XU Peng-mei, YANG Hua, FU Rui-min, *et al.* Optical butting, registration and focus-fixing of CCD camera for CBERS-1 satellite [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2001, 22(3): 12-15.
徐彭梅,杨桦,伏瑞敏,等. CBERS-1 卫星 CCD 相机的光学拼接、配准和定焦[J]. *航天返回与遥感*, 2001, 22(3): 12-15.
- [3] MAO Jie-na, YU Long, LIN Ying-ying. Research on remote sensing application and infrared payload of UAV [J]. *Infrared*, 2007, 28(2): 23-35.
毛洁娜,于龙,林莹莹. 无人机遥感应用及红外载荷研究[J]. *红外*, 2007, 28(2): 23-35.
- [4] ZHANG Xin-xiang, REN Jian-yue. Mechanical interleaving assembly of TDICCD focal plane[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(5): 741-745.
张星祥,任建岳. TDICCD 焦平面的机械交错拼接[J]. *光学学报*, 2006, 26(5): 741-745.
- [5] WANG Wen-sheng, LIU Guang-li, LIU Li-xin, *et al.* The optical butting of area CCD image sensor with a high power TV-microscope [J]. *Proceedings of the International Symposium on Test and Measurement*, 2001, 1(4): 855-857.
- [6] CHEN Rong-li, ZHANG Tao, MA Zhen, *et al.* Influences of the alignment errors on image quality of large segmented mirrors[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(12): 3240-3244.
陈荣利,张涛,马臻,等. 拼接误差对接式大口径反射镜成像质量的影响[J]. *光子学报*, 2009, 38(12): 3240-3244.
- [7] LEI Hua, XU Zhi-hai, FENG Hua-jun, *et al.* Imaging characteristics of an optical butting camera[J]. *Proceedings of the SPIE- The International Society for Optical Engineering*, 2010, 7564(5): 15-21.
- [8] HE Xin, WEI Zhong-hui, HAO Zhi-hang. Digital camera modeling of butting 9 CCD chips in the concentric spherical lens system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, 11(4): 421-425.
- [9] LI Yi-min, LIU Yan-jun, He Xin, *et al.* Research of calibration method for high-precision CCD butting cameras[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2008, 29(5): 799-802.
- [10] HE Kai, TANG Ping-fan, WANG Cheng-you. Vignetting correction method of image based on gaussian quadrics fitting [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 37(1): 67-71.
何凯,唐平凡,王成忱. 基于高斯曲面拟合的影像渐晕复原方法[J]. *电子学报*, 2009, 37(1): 67-71.
- [11] YU W. Practical anti-vignetting methods for digital cameras [J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2004, 50(4): 975-983.
- [12] HE Kai, ZHAO Hong-ying, LIU Jing-jing. Vignetting correction method for aviaic remote sensing image [J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2007, 37(6): 1447-1450.
何凯,赵红颖,刘晶晶. 航空遥感影像渐晕复原方法 [J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2007, 37(6): 1447-1450.
- [13] FENG Qiang, HUO Jun-yan, YANG Hai-tao. A novel image anti-vignetting method [J]. *Electronic Science and Technology*, 2007, 10(8): 67-70.
冯强,霍俊彦,杨海涛. 一种新颖的图像抗渐晕技术 [J]. *电子科技*, 2007, 10(8): 67-70.
- [14] 谢敬辉,廖宁放,曹良才. 傅里叶光学与现代光学基础[M]. 北京:北京理工大学出版社,2007.
- [15] FAN Wei-jun, ZHOU Bi-fang, XIA Liang-zheng, *et al.* Extracting optical aperture synthesis observation objective fourier information based on least-squares approach[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(4): 472-475.
范伟军,周必方,夏良正,等. 基于最小二乘法准则的光学综合孔径观测目标傅里叶信息提取[J]. *光子学报*, 2004, 33(4): 472-475.