

文章编号 1004-924X(2007)02-0155-05

大 F 数高分辨率空间望远镜光学系统

金 光¹, 张 亮^{1,2}, 胡福生^{1,2}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要: 针对离轴三反射镜光学系统, 分析了改变入射光的平均波长时, 大 F 数望远镜系统在奈奎斯特频率处实验室静态传递函数的变化规律, 进而论证了大 F 数望远镜的可行性。分析结果表明: 对于大 F 数空间望远镜, 其入射光平均波长愈短, 它的传递函数值愈高, 愈能满足对地面分辨率的要求, 该结论可作为研制轻型空间望远镜的参考。

关键词: 空间望远镜; 入射光波长; 相对孔径; 灵敏度

中图分类号: TH751 文献标识码: A

Investigation on space optical system of high F number and high resolution

JIN Guang¹, ZHANG Liang^{1,2}, HU Fu-sheng^{1,2}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China; 2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

Abstract: Space telescope with high F number can satisfy the requirements that the optical system should have the characteristics of high resolution and light weight. In this paper, we describe a uncoaxial three-mirror system simply and discuss on the rule of variation of laboratory static Modulation Transfer Function(MTF) at Nyquist frequency of the optical system with average wavelength of incident rays. Accordingly, the feasibility of telescope with big F number is analyzed. It is shown that the shorter average wavelength of incident rays and the higher MTF are; the better satisfaction ground resolution requires, which will offer the reference to the lightweight space telescope.

Key words: space telescope; wavelength of incident rays; F number; sensitivity

1 引 言

空间望远镜是航天遥感器中重要的遥感器。

利用搭载在航天器上的光学遥感器进行对地观测, 具有速度快、视野广、覆盖范围大等优点。以往所设计的空间望远镜的 F 数都在 10 以下, 而现今空间望远镜的发展趋势是轻型化与高分辨

率,采用大 F 数(15~20)的光学系统,可以满足上述要求,且有利于增大焦距和视场。大 F 数可以使光学系统设计难度相对降低并能使可行解域拓宽,利于合理安排结构布局,以解决一般长焦距光学系统消杂光困难的问题。

本文重点介绍了大 F 数(17)空间望远镜在选择不同入射光的波长时,奈奎斯特(Nyquist)频率处的实验室静态传递函数(MTF_{fN})的变化规律,分析结果表明大 F 数空间望远镜其入射光平均波长愈短,它的传递函数值愈高,愈能满足对地面分辨率的要求。但减小入射光波长,会使探测器的灵敏度降低,需要采用 TDI CCD 元件,弥补灵敏度下降所造成的影响。

2 相对孔径大小与波长之间的关系

在空间望远镜系统中, f 为系统的焦距, a 为 CCD 像元尺寸, α 为望远镜极限分辨角,根据瑞利判据可知,望远镜的分辨率公式为:

$$\alpha = \frac{1.22\lambda}{D}, \quad (1)$$

式中:

λ —入射光波长;

D —望远镜入瞳直径。

由公式(1)得

$$f \cdot \frac{1.22\lambda}{D} = a, \quad (2)$$

$$a = 1/(2N). \quad (3)$$

其中 N —探测器空间频率

由式(2)与(3)得

$$D/f = 2.44\lambda \cdot N, \quad (4)$$

式(4)表明,当探测器的空间频率不变时,既探测器的像元尺寸即不变,那么,波长愈小,望远镜的 F 数愈大。

3 相机的静态传递函数(MTF_{fN})

MTF 是空间望远镜系统再现图像质量的主要标准,因此 MTF 是评价望远镜的关键指标,一般对望远镜实验室传递函数提出明确的要求是 $MTF_{fN} \geq 0.2$ 。

望远镜的实验室 MTF 用下式计算:

$$MTF_{fN} = MTF_O \times MTF_T \times MTF_S \times MTF_{\Delta f} \times MTF_{\Delta d} \times MTF_d, \quad (5)$$

式中:

MTF_{fN} —望远镜系统的实验室 MTF(fN 频率处,以下同);

MTF_O —光学系统的 MTF;

MTF_T —CCD 探测器的 MTF;

MTF_S —信号链路的 MTF;

$MTF_{\Delta f}$ —相机调焦误差 MTF;

$MTF_{\Delta d}$ —电荷移动的速度与像移速度不同的 MTF;

MTF_d —显示器的 MTF;

望远镜系统的实验室静态 MTF 主要是由光学系统和 CCD 决定的,必须保证两者相乘的静态 $MTF_{fN} \geq 0.2$ 。本文简要讨论二者对望远镜 MTF 的影响,从而得出了要达到大 F 数的要求,需要选择较短的平均波长的结论。

4 入射光波长对大 F 数望远镜 MTF 的影响

4.1 探测器的 MTF

影响 CCD 静态 MTF 的因素有三个:像元几何尺寸大小、扩散和电荷转移效率。对所有像元尺寸的 CCD 理论 MTF 为 $0.63^{[1-8]}$;现代技术研制的 CCD 的电荷转移效率 > 0.99995 ,对 MTF 影响可忽略,因此扩散是除像元几何尺寸外影响 MTF 的主要因素。在像元尺寸不变的情况下,随着入射光波长的增加,在探测器材料深处发生光吸收,使 MTF 值下降。图 1 是某种像元尺寸 CCD 的 MTF 与波长的关系。

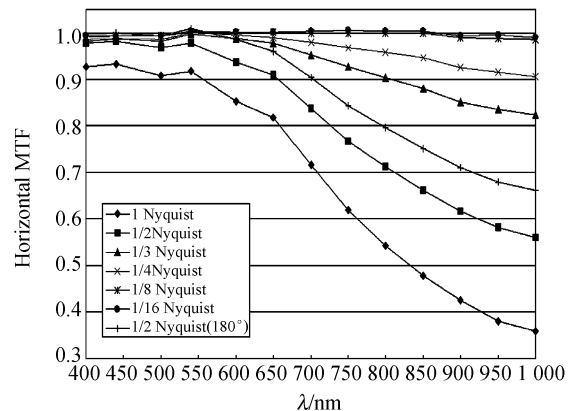


图 1 探测器 MTF 与波长的关系

Fig. 1 Relation of detector MTF and wavelength

从图 1 中可以看出,当波长 $\lambda < 0.6 \mu\text{m}$ 时,MTF 基本不变; $\lambda > 0.6 \mu\text{m}$ 时,MTF 明显下降。

4.2 光学系统的 MTF

由于实际光学系统有像差,还有遮拦,MTF 要下降;光学零件加工、系统装调等因素都会影响系统的 MTF,实际光学系统的 MTF 低于光学设计的 MTF。实际光学系统的 MTF 等于光学设计 MTF 乘以实际光学系统的 MTF 质量因子,通常质量因子为 $0.8 \sim 0.85$ 。本文采用焦距 2 m, F 数分别是 $1/17$ 与 $1/10$ 的三反望远镜系统为例进行分析比较,图 2 为不同 F 数的三反系统结构简图。

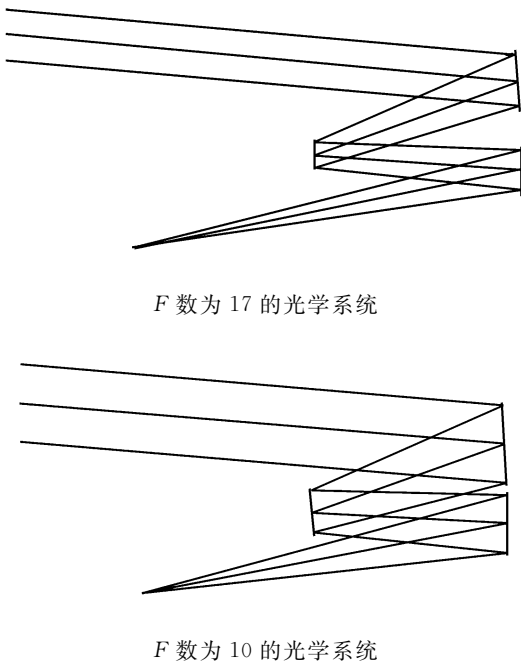


图 2 空间望远镜光学系统简图

Fig. 2 Picture of optical system of space telescope

对两种 F 数下的光学系统,在入射光波段 $0.4 \sim 0.6 \mu\text{m}$ 与 $0.7 \sim 0.9 \mu\text{m}$ 时光学设计 MTF 的比较结果如图 3~图 5 所示。

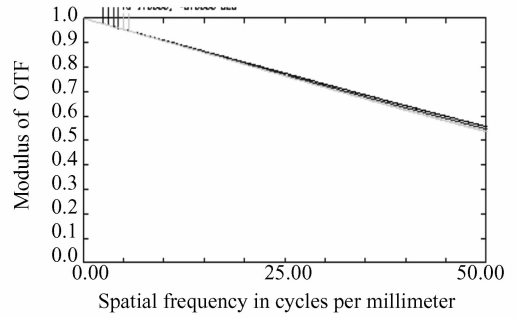
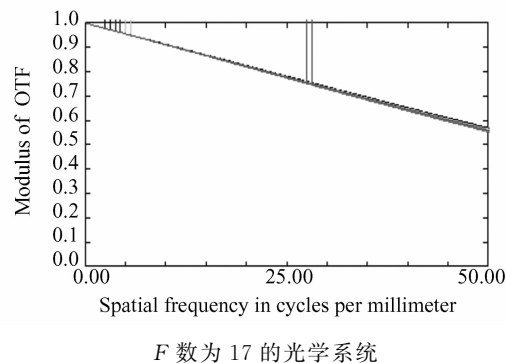


图 3 平均波长 $0.4 \mu\text{m}$ 与 $0.7 \mu\text{m}$ 时两种 F 数望远镜光学设计 MTF 曲线

Fig. 3 MTF plots of two telescopes with different F numbers at $0.4 \mu\text{m}$ and $0.7 \mu\text{m}$

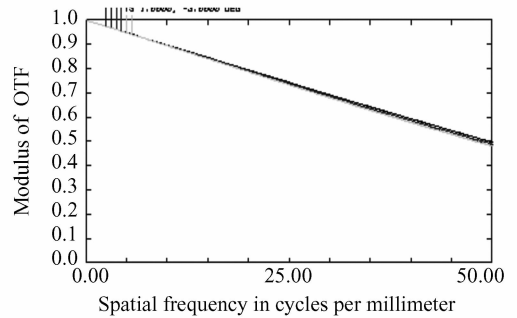
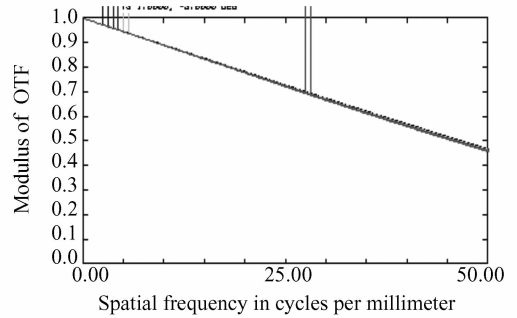
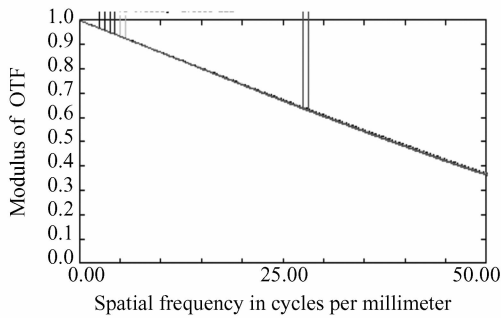
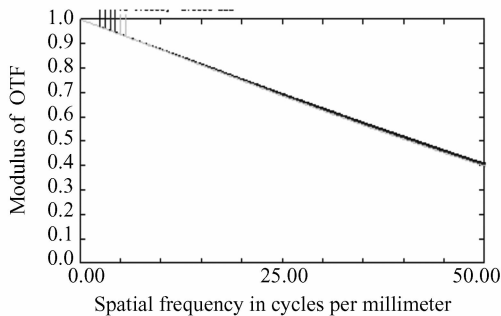


图 4 平均波长 $0.5 \mu\text{m}$ 与 $0.8 \mu\text{m}$ 时两种 F 数望远镜光学设计 MTF 曲线

Fig. 4 MTF plots of two telescopes with different F numbers at $0.5 \mu\text{m}$ and $0.8 \mu\text{m}$



F 数为 17 的光学系统



F 数为 10 的光学系统

图 5 平均波长 $0.6 \mu\text{m}$ 与 $0.8 \mu\text{m}$ 时两种 F 数望远镜光学设计 MTF 曲线Fig. 5 MTF plots of two telescopes with different F numbers at $0.6 \mu\text{m}$ and $0.8 \mu\text{m}$

从以上三幅图中能够看出:在同一 CCD 像元尺寸下,光学系统的 F 数愈大,需要入射光的平均波长愈短,才能达到系统对地分辨率的要求。图 6 表示了 CCD 像元尺寸为 $10 \mu\text{m}$ 时,入射光平均波长与 F 数为 17 的光学系统 MTF 值曲线图。表 1 列出了 CCD 像元尺寸为 $10 \mu\text{m}$ 时,不同入射光波长对 F 数为 17 的上述光学系统配用时的 MTF 值。

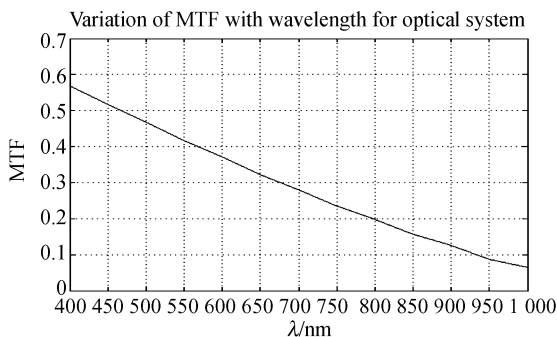


图 6 不同波长对 MTF 值的影响

Fig. 6 Effect of different wavelengths on MTF

表 1 不同波长与 F 数为 17 的光学系统配用时的 MTFTab. 1 MTF of optical system with F number 17 when matching with different wavelengths

入射光平均波长(μm)	MTF _O (计算)	MTF _O (实际)
0.4	0.568	0.477
0.5	0.467	0.378
0.6	0.369	0.310

4.3 望远镜静态 MTF

本文列举了在不同的入射光波长下,像元尺寸为 $10 \mu\text{m}$ CCD 的 MTF 与上述 F 数为 17 的光学系统配用,计算相机静态 MTF,如表 2 所示。

表 2 不同波长与 F 数为 17 的光学系统配用时的静态 MTFTab. 2 Static MTF of optical system with F number 17 when matching with different wavelengths

入射光平均波长(μm)	MTF _T	MTF _O (实际)	MTF _{fn} (静态)
0.4	0.7	0.477	0.33
0.5	0.6	0.467	0.28
0.6	0.5	0.369	0.18

从表 2 可以看出,当入射光波长为 $0.4 \mu\text{m}$ 时,望远镜静态 MTF_{fn} 值最大,满足设计要求;当入射光波长 $>0.6 \mu\text{m}$ 时,望远镜静态 MTF_{fn} 均 <0.2 ,不满足设计要求。

4.4 望远镜探测器光谱灵敏度分析

绝对光谱灵敏度特性 $S_{\lambda}(\lambda)$ 是光波波长与绝对灵敏度之间的关系,通常以曲线表示。当入射光波长在 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 范围内的多色光灵敏度如下式:

$$S_{\lambda_1 \sim \lambda_2} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_{\lambda}(\lambda) d\lambda, \quad (6)$$

图 7 是美国 DALSA 公司研制的像元尺寸 $10 \mu\text{m}$ 的 CCD 光谱灵敏度曲线,从图 7 中可以看出入射光的波段在 $0.4 \sim 0.6 \mu\text{m}$ 时,探测器的灵敏度较低,大约是波段在 $0.7 \sim 0.9 \mu\text{m}$ 探测器的 60%。因此,可采用 TDI CCD 元件来弥补灵敏度下降所造成的影响。

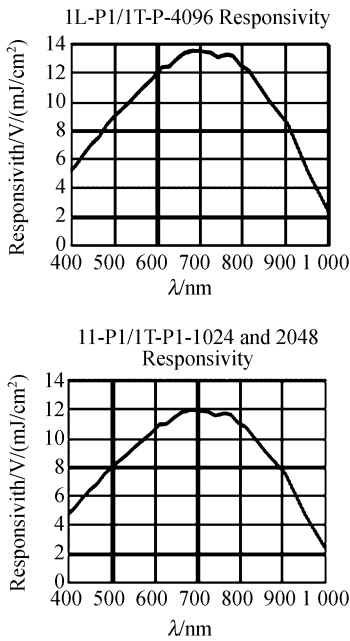


图7 CCD光谱灵敏度曲线

Fig. 7 The plot of CCD spectral sensitivity

5 小结

本文通过改变入射光的平均波长,分析了大 F 数望远镜系统在奈奎斯特频率处实验室静态传递函数的变化规律,进而论证了大 F 数望远镜的可行性。通过上述分析,得出以下结论:

(1) 对于大 F 数的空间望远镜(如本文中的 $F=17$),其入射光的波长愈短,望远镜的静态愈大,能满足对地面的分辨率的要求。

(2) 随着入射光波段的减小,望远镜探测器的灵敏度也随之降低,可采用TDI CCD技术以拟补灵敏度下降所造成的影响。

参考文献:

- [1] 杨秉新. TDICCD相机的相对孔径与器件像元尺寸关系的研究[J]. 航天返回与遥感, 2001, 22(2): 9-12.
YANG B X. Investigation on the relationship of relative aperture to pixel dimensions for TDICCD camera[J]. *Spacecraft Recov. Remot. Sens.*, 2001, 22(2): 9-12. (in Chinese)
- [2] 陈荣利, 李英才, 樊学武. TDICCD相机像质综合评价研究[J]. 航天返回与遥感, 2003, 24(4): 10-13.
- [3] BAKLANOV A I. Specialized CCD for the time delay and integration (TDI) regime with variable vector of an image movement velocities[J]. *SPIE*, 1996, 2790: 59-66.
- [4] 赵贵军, 陈长征, 万志, 等. 推扫型TDICCD光学遥感器动态成像研究[J]. 光学精密工程, 2006, 14(2): 291-296.
ZHAO G J, CHEN CH ZH, WAN ZH, *et al.*. Study on dynamic imaging on push-broom TDI CCD optical remote sensor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(2): 291-296. (in Chinese)
- [5] 常军, 翁志成, 姜会林, 等. 宽覆盖、离轴空间相机光学系统的设计[J]. 光学精密工程, 2003, 11(1): 55-58.
CHANG J, WENG ZH CH, JIANG H L, *et al.*. Design of optical system for space camera with long focal length, wide coverage and high resolution[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11(1): 55-58. (in Chinese)
- [6] 史光辉. 卫星对地观测高分辨率光学系统和设计问题[J]. 光学精密工程, 1999, 7(1): 16-24.
SHI G H. High resolution optical systems used to observation from the satellites to the earth and problems in design[J]. *Opt. Precision Eng.*, 1999, 7(1): 16-24. (in Chinese)
- [7] 刘全国, 李杰, 郝志航. APS星敏传感器探测灵敏度研究[J]. 光学精密工程, 2006, 14(4): 33-37.
LIU J G, LI J, HAO ZH H. Study on detection sensitivity of APS star tracker[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4): 33-37. (in Chinese)
- [8] 李春艳, 李怀锋, 孙才红. 高精度星敏传感器天文标定方法及观测分析[J]. 光学精密工程, 2006, 14(4): 38-43.
LI CH Y, LI H F, SUN C H. Astronomical calibration method and observaton analysis for high-accuracy star sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4): 38-43. (in Chinese)