

doi: 10.3788/gzxb20124111.1301

前置超光谱成像变焦系统的设计

宋玉龙¹, 刘智颖², 崔成君²

(1 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 航空光学成像与测量重点实验室, 长春 130033)

(2 长春理工大学 光电工程学院, 长春 130022)

摘 要:设计了一种前置超光谱成像变焦系统,其工作谱段在 400~1 000 nm, F 数为 3.5~5.6, 在焦距 28 mm 和 80 mm 处的全视场分别为 7.88° 和 2.76° . 前置超光谱成像变焦系统与传统变焦系统主要有两点不同:第一、由于该超光谱系统应用声光可调滤光器元件分光,更加关心分光后各个谱段下系统的整体传函情况,所以需要进行逐一离散评价;第二、由于实际应用中前置系统与后续成像模块综合应用达到总体变焦的目的,两个系统的传函在系统整体传函中均具有一定的贡献量,所以对前置超光谱成像变焦系统的评价需要综合考虑系统对后续成像模块传函要求的合理化及整体传函受人眼视觉阈约束的影响,从而对前置超光谱变焦系统的像质评价指标进行了具体分析. 根据物像交换原则对系统的初始结构进行了计算,并应用 ZEMAX 软件对系统进行了优化设计,设计结果表明,系统在各个焦距位置及超光谱各谱段下,像质均满足了设计指标要求.

关键词:超光谱;前置变焦系统;光学设计;像质评价指标

中图分类号:TH741

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2012)11-1301-6

0 引言

光谱成像技术是采用多个光谱通道来对目标进行探测和成像的技术,它是光学成像技术和光谱技术的有效结合. 光谱成像是依靠获取物体的二维空间信息和一维的光谱信息来实现对物体的成像和获取物体的光谱成分,从而实现获取三维信息的目的. 由于光谱成像技术同时具有空间分辨能力和光谱分辨的能力,其在识别目标、资源调查、精细农业和生物医学等众多领域具有广泛的应用前景^[1-2].

超光谱成像系统分成两大部分,即前置光学系统^[3]和后续成像模块. 陆强等设计了前置光学系统,其工作谱段为 486~656 nm,前置光学系统的主要作用是将被测目标所发出的光线汇聚到后续成像模块对其进行分光,最后在探测器上获取物体的二维空间信息和光谱信息.

与传统的定焦物镜相比,变焦物镜的焦距可变,无需调整光学系统的位置也可以获取不同距离目标物体的图像信息,使用前置超光谱成像变焦系统可有效提高探测效率^[4-6].

本文针对超光谱全部工作谱段 400~1 000 nm,对前置光学系统进行了设计与评价指标的分析.

1 系统设计

1.1 像质评价指标的分析

由于调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 能够比较全面地体现出光学成像系统的特性,所以一般采用 MTF 来评价系统的成像质量. 被测目标图像经过光学系统成像到探测器上,最终用人眼接收,所以只有当最终图像的调制传递函数大于人眼视觉阈时才可供人眼分辨,体现系统的最终分辨率.

在不考虑外界环境因素影响的情况下,超光谱成像系统总的 MTF 由三个部分组成,即可以表示为

$$MTF = MTF_{(g_1)} \cdot MTF_{(g_2)} \cdot MTF_{(d)} \quad (1)$$

式中各项如图 1 所示; $MTF_{(g_1)}$ 为前置超光谱成像变焦系统的调制传递函数; $MTF_{(g_2)}$ 为后续成像模块的调制传递函数; $MTF_{(d)}$ 为探测器的调制传递函数.

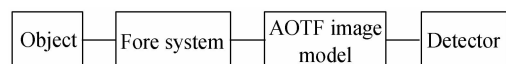


图 1 超光谱成像系统总体图

Fig. 1 Sketch of hyperspectral imaging system

第一作者:宋玉龙(1980-),男,副研究员,博士,主要研究方向为航空光学成像技术. Email: songyl@ciomp. ac. cn

收稿日期:2012-06-04;修回日期:2012-07-12

只有当式(1)中计算的超光谱成像系统总的传递函数 MTF 大于人眼的视觉阈传函 0.026 时,才可供人眼分辨。

由于后续成像模块的接收探测器单个像素大小为 $8.6 \mu\text{m} \times 8.3 \mu\text{m}$, 所以根据式(2), 可以计算探测器不同空间频率下的 MTF(d).

$$\text{MTF}_{(d)} = \frac{\sin(\pi dr)}{\pi dr} \cos(\pi dr) \quad (2)$$

式中 d 为探测器像素大小. 取 d 为 $8.6 \mu\text{m}$, 并利用 MATLAB 软件即可以拟合出探测器调制传递函数值随不同空间频率变化的曲线图, 如图 2.

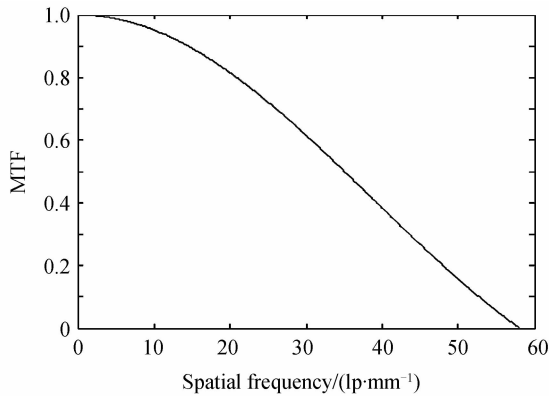


图 2 接收探测器 $\text{MTF}_{(d)}$
Fig. 2 $\text{MTF}_{(d)}$ of receiving detector

由图 2 可知, 在空间频率为 50 lp/mm 时, 探测器所对应的 $\text{MTF}_{(d)}$ 为 0.1576. 由对前置系统与后续系统设计要求合理化的角度出发, 根据式(1)可以计算系统的传函分配。

当后续成像模块的传函要求 $\text{MTF}_{(g_2)} \geq 0.5$ 时, 为了满足系统总的 MTF 满足人眼分辨的要求, 确定前置超光谱成像变焦系统的像质评价指标为, 在空间频率为 50 lp/mm 下, 调制传递函数 $\text{MTF}_{(g_1)} \geq 0.33$.

由于超光谱系统具有分光元件, 所以更加关心分光后各个谱段下系统的整体传函情况, 经验表明, 在最长谱段与最短谱段为系统优化难点, 需要着重考虑, 同时由于工作谱段范围较宽, 如果划分谱段不够细, 就会忽略某些谱段的成像信息, 而导致设计结果不理想, 所以需要对工作波段范围内各个谱段进行逐一离散评价。

综上所述, 前置超光谱成像变焦系统的技术指标要求如表 1 所示。

表 1 前置超光谱成像变焦系统的技术指标
Table 1 Technology indicators of fore hyperspectral imaging zoom system

Working spectrum	400~1 000 nm
F#	3.5~5.6
Focal length	28~80 mm
Field of view	$2\omega = 7.88^\circ \sim 2.76^\circ$
Image evaluation	50 lp/mm, $\text{MTF} > 0.33$

1.2 系统的结构选取

变焦系统的补偿方式分为光学补偿型与机械补偿型^[7-8], 为了能够在连续变焦过程中, 获得清晰稳定的图像, 本文选取机械补偿方式。

由于负组补偿方式的补偿组运动轨迹比正组补偿方式的简单, 不需要换根, 可在大范围内得到平滑的补偿曲线; 而且正组补偿的补偿组负担偏角较大, 为了尽可能地减少镜片数目和缩短系统的总长, 本文选取负组补偿方式进行设计. 图 3 为负组补偿结构图。

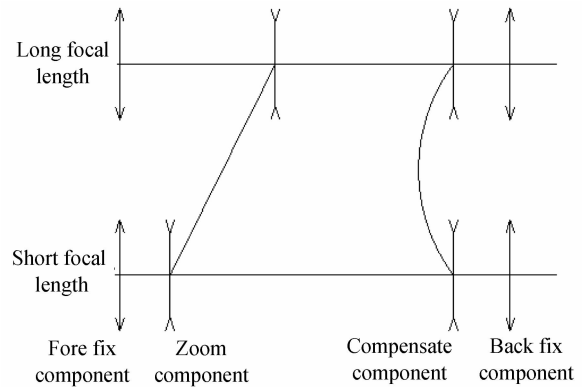


图 3 负组补偿方式的变焦系统
Fig. 3 Zoom system with negative compensation

1.3 系统初始结构计算

根据物像交换原则对系统的高斯解进行计算. 首先, 为了简便起见, 设变倍组的焦距为

$$f'_2 = -1 \quad (3)$$

当负组补偿系统满足物像交换原则时

$$m_{2L} = 1/m_{2S} \quad (4)$$

式中 m_{2L} 为长焦时变倍组倍率, m_{2S} 为短焦时变倍组倍率. 则长焦时变倍组的倍率可取为

$$m_{2L} = -\sqrt{\Gamma} \quad (5)$$

式中 Γ 为前置超光谱成像变焦系统的变倍比. 由于满足物像交换原则的负组补偿系统, 它的变倍组和补偿组间的最短距离发生在长焦处, 为了保证在长焦时, 变倍组和补偿组不发生相碰, 设 $d_{23L} = 0.4$, 可以得出

$$m_{3L} = \frac{f'_3}{f'_2(1-m_{2L}) - 0.4 + f'_3} \quad (6)$$

式中 f'_3 为补偿组的焦距. 因为满足物像交换原则的负组补偿系统, 它不存在无解区, 所以取 $f'_3 = -4.8$, 再根据式(6)即可计算出长焦时补偿组的倍率。

系统从长焦位置开始运动, 当到达短焦位置的时候, 变倍组向左移动到最左端, 如图 2 所示. 此时, 设短焦时前固定组和变倍组的间距 $d_{12S} = 0.8$, 就有

$$f'_1 = 0.8 + \frac{f'_2(1-m_{2S})}{m_{2S}} \quad (7)$$

式中 f'_1 为前固定组的焦距. 再由式(8)、(9)可得出其它位置处变倍组倍率 m_2 和补偿组倍率 m_3 间的关系.

$$b = -\frac{f'_2}{f'_3} \left(\frac{1}{m_2} - \frac{1}{m_{2L}} + m_2 - m_{2L} \right) + \left(\frac{1}{m_{3L}} + m_{3L} \right) \quad (8)$$

$$m_3 = \frac{b - \sqrt{b^2 - 4}}{2} \quad (9)$$

根据已知的倍率关系,再由式(10)、(11)可以算出不同位置处变倍组的移动量 q_2 和补偿组的补偿量 Δ_3 .

$$q_2 = f'_2 \left(\frac{1}{m_{2L}} - \frac{1}{m_2} \right) \quad (10)$$

$$\Delta_3 = f'_3 (m_3 - m_{3L}) \quad (11)$$

当系统位于短焦位置时,补偿组与后固定组的间隔最短,为了不使补偿组与后固定组相碰,取 $d_{34S} = 0.05 \text{ mm}$. 再令后固定组的倍 $m_{4S} = -0.5$, 即可算出后固定组的焦距 f'_4 . 由于负组补偿系统没有换根点,所以本文令 $f'_m = 54 \text{ mm}$ 处的位置作为系统的中焦位置. 再结合式(12)即可以算出中焦位置时,变倍组和补偿组的倍率.

$$\Gamma = \frac{m_{2L} m_{3L}}{m_2 m_3} \quad (12)$$

由以上公式即可以算出系统归一化的初始结构参量. 在变焦系统中由于变倍组的焦距会影响整个系统的外形尺寸,所以在像差允许的情况下,尽可能地减小变倍组的焦距. 通常情况下,变倍组的取值范围为

$$f'_S < |f'_2| < 2f'_S \quad (13)$$

本系统中取 $f'_2 = -45 \text{ mm}$, 经缩放后得到的初始结构参量如表 2 和表 3.

表 2 前置变焦系统的各组态光焦度分布

Table 2 The distribution of optical power

f'_1/mm	f'_2/mm	f'_3/mm	f'_4/mm
157.05	-45	-216	28.935

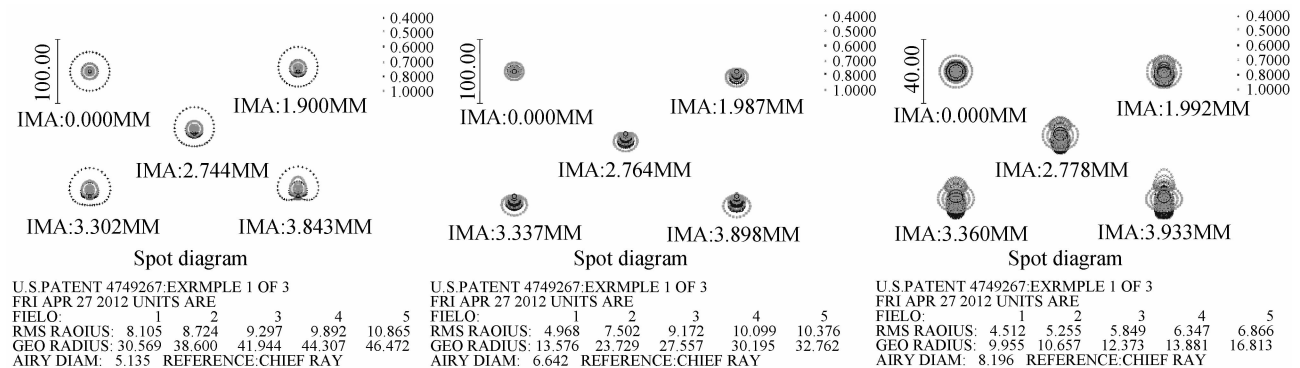


图 5 短焦、中焦、长焦的点列图
Fig. 5 Spot diagram of short, middle and long focal length

表 3 前置变焦系统的初始结构参量

Table 3 Initial structure parameters of zoom system

f'/mm	$f'_S = 28$	$f'_M = 54$	$f'_L = 80$
m_2	-0.592	-1.07	-1.69
m_3	0.608	0.645	0.608
d_{12}/mm	36	69.975	85.41
d_{23}/mm	67.41	25.425	18
d_{34}/mm	2.25	10.26	2.25

2 设计结果及像质评价

2.1 设计结果

根据已计算出的初始结构,利用 ZEMAX 软件,设置合理的优化函数,对系统进行优化设计. 由于系统的谱段宽,色差大,所以系统对每个组态都分别进行了消色差处理. 经优化后系统的总体结构图如图 4.

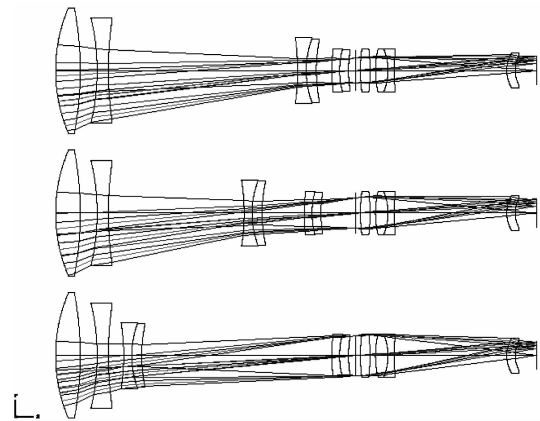


图 4 前置变焦系统结构图
Fig. 4 Sketch of fore zoom system

2.2 像质评价

超光谱成像是光谱技术和成像技术的结合,不仅要求有较高的光谱分辨率,而且还要求有良好的成像质量. 为了减小后续系统的设计难度,本系统要求在各个波长上都能达到系统提出的设计指标. 则优化后系统点列图如图 5 所示,系统各焦距处 0.707 视场的弥散斑均方根半径接近于所采用接收

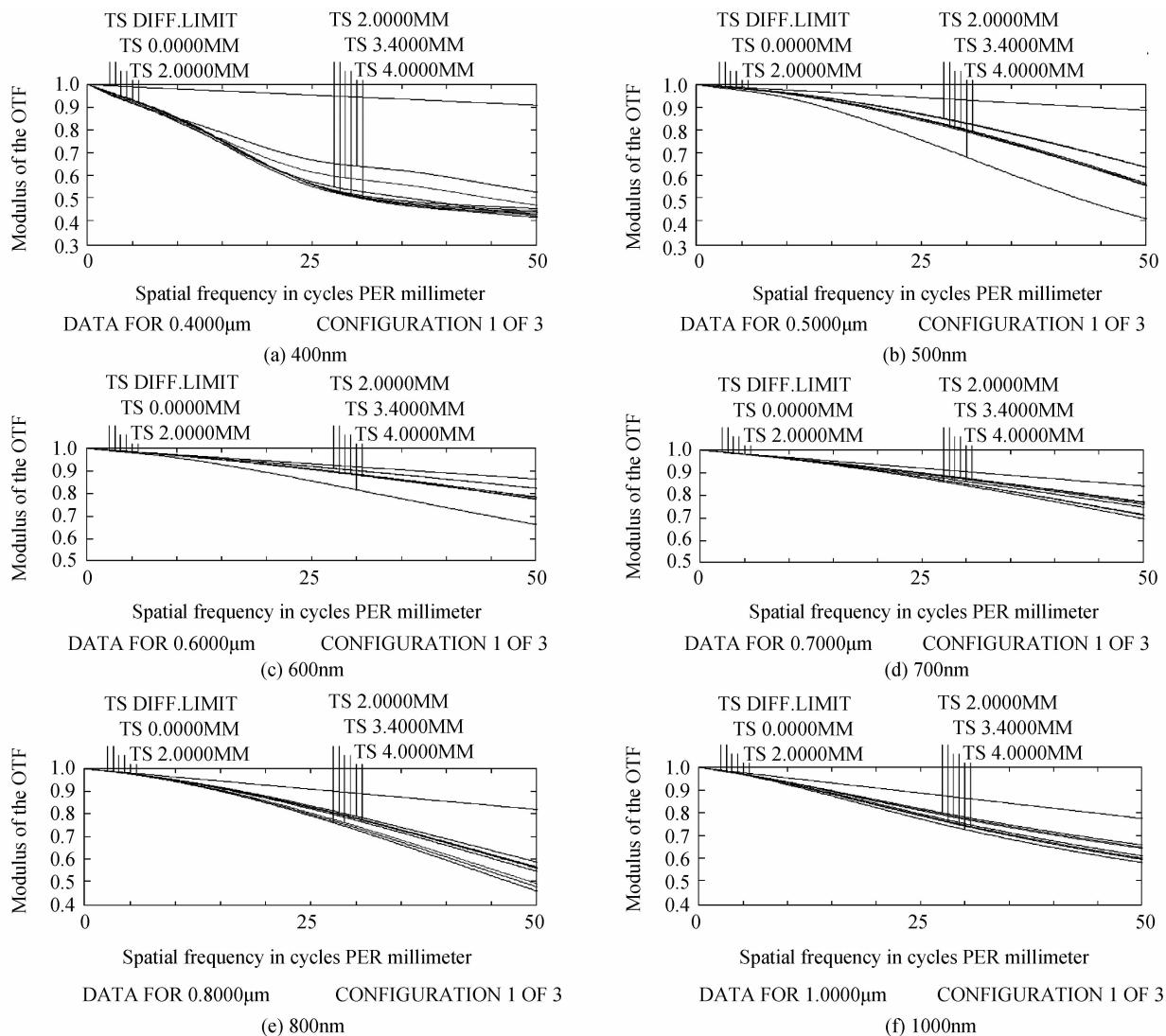
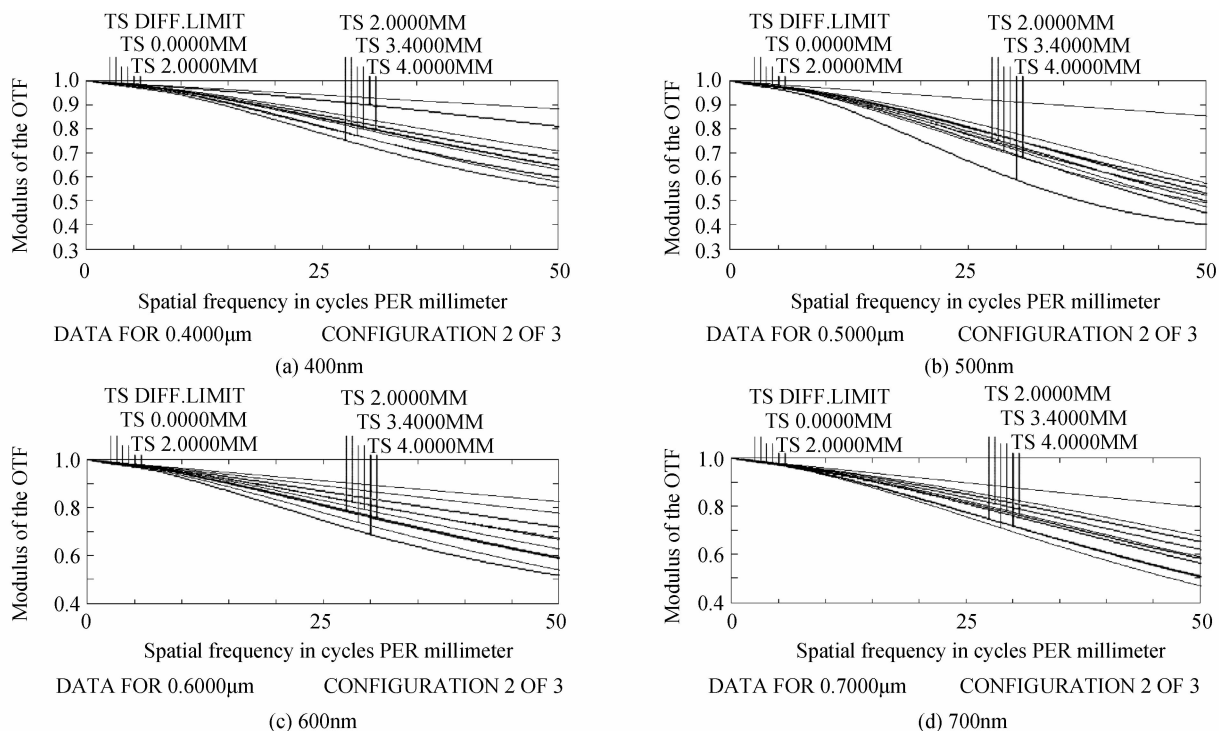


图6 短焦距处各谱段的调制传递函数
Fig.6 The MTF of every spectrum for short focal length



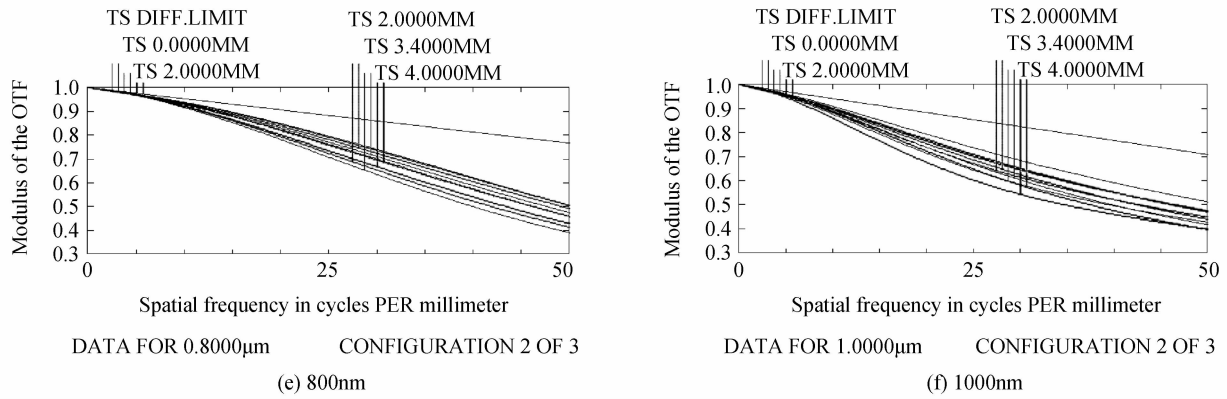


图 7 中焦处各谱段的调制传递函数
 Fig. 7 The MTF of every spectrum for middle focal length

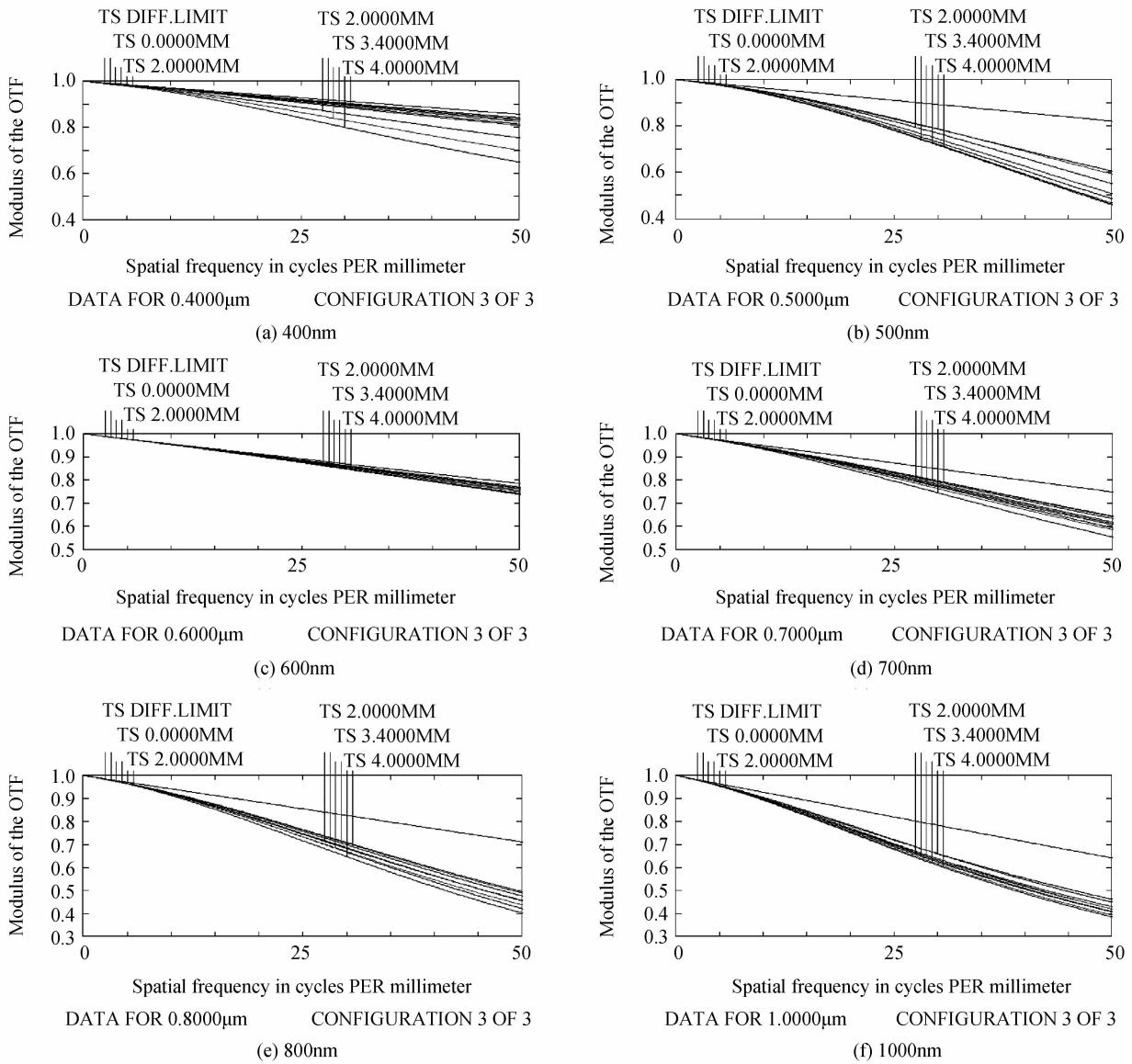


图 8 长焦处各谱段的调制传递函数
 Fig. 8 The MTF of every spectrum for long focal length

器的像元尺寸,故可认为系统的成像质量良好.系统优化后,在各个焦距位置及各个谱段下的 MTF 值如图 6~8 所示.在各焦距位置及各谱段下的调制传递函数均大于 0.33,满足系统的设计指标要求.

3 结论

前置成像系统的发展与超光谱成像技术的发展紧密相关,随着对超光谱成像系统光谱分辨率和空

间分辨率要求的提高,对其光学系统也提出更高的要求.由对后续成像模块要求合理化出发,对所设计的前置超光谱成像变焦系统的像质评价指标进行了具体分析,对系统的初始结构高斯解进行了计算.通过软件的优化,最终得到了符合使用要求的设计结果.

参考文献

- [1] QIAN Le-xiang, PAN Xue-qin, ZHAO Qian. Advances in the application and researches of hyperspectral imaging remote sensing in China[J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2004, **60**(2): 1-6.
钱乐祥, 泮学芹, 赵芊. 中国高光谱成像遥感应用研究进展[J]. 国土资源遥感, 2004, **60**(2): 1-6.
- [2] SCHAEPMAN M E, GREEN R O, UNGAR S G, *et al.* The future of imaging spectroscopy prospective technologies and applications[C]. IEEE International Conference on Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2006: 2005-2009.
- [3] LU Qiang, JI Yi-qun, SHEN Wei-min. Design of a fore continual zoom system with high speed [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2674-2679.
陆强, 季轶群, 沈为民. 大相对孔径连续变焦前置物镜的光学设计[J]. 光学学报, 2010, **30**(9): 2674-2679.
- [4] TIAN Hai-xia, YANG Jian-feng. Design for visible video zoom optical system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(9): 1797-1799.
田海霞, 杨建峰. 可见光变焦距电视光学系统设计[J]. 光子学报, 2008, **37**(9): 1797-1799.
- [5] CHOI J, KIM T H, KONG H J. Zoom lens design for a novel imaging spectrometer that controls spatial and spectral resolution individually[J]. *Applied Optics*, 2006, **45**(15): 3430-3441.
- [6] 陶纯堪. 变焦距光学系统设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 1988: 73-77.
- [7] CHENG Ke, ZHOU Si-zhong, ZHANG Heng-jin. Design of a short focal length zoom system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(12): 1825-1828.
程珂, 周泗忠, 张恒金. 短焦距变焦物镜设计[J]. 光子学报, 2005, **34**(12): 1825-1828.
- [8] DING Na, GAO Jiao-bo, WANG Jun. Camouflaged target recognition realized by AOTF multispectral imaging system [J]. *Applied Optics*, 2010, **31**(1): 65-68.
丁娜, 高教波, 王军, 等. 利用 AOTF 多光谱成像系统实现伪装目标的识别[J]. 应用光学, 2010, **31**(1): 65-68.
- [9] ZHANG Xiao-hui, HAN Chang-yuan, PAN Yu-long. Evaluation of general image quality of transfer optical remote sensing CCD camera[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(4): 697-701.
张晓辉, 韩昌元, 潘玉龙. 传输型 CCD 相机综合像质评价方法的研究[J]. 红外与激光工程, 2008, **37**(4): 697-701.
- [10] LIN Wei, XUE Feng, ZHANG Xiao-hui. Acousto-optic tunable filter and its application[J]. *Control & Automation*, 2005, **21**(10): 127-128.
林伟, 薛峰, 张晔晖, 等. 声光可调谐滤波器的原理与应用[J]. 微计算机信息, 2005, **21**(10): 127-128.

Optical Design of the Fore Hyperspectral Imaging Zoom System

SONG Yu-long¹, LIU Zhi-ying², CUI Cheng-jun²

(1 Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

(2 School of Opto-electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: A fore hyperspectral imaging zoom system is designed. The working spectrum is from 400 nm to 1 000 nm, the F number is from 3.5 to 5.6, and the full field of view at 28 mm focal length and 80 mm focal length is 7.88° and 2.76° respectively. There are two differences between the fore system and the traditional zoom system. First of all, because AOTF is applied for beam splitter in this hyperspectral system, the MTF after beam splitting will be highly focused on. Consequently, the MTF should be evaluated discretely. And, the fore system and the back imaging module will be applied together to reach the total zoom purpose. The two systems will both have certain constructions on the MTF of the total system. So the evaluation of fore hyperspectral imaging zoom system should consider the reasonable requirements of back imaging module and the total MTF, which will be constrained by the detector and threshold of visibility. After considering the above factors, the image quality evaluation indicators of the fore hyperspectral zoom system are analyzed in detail. The initial structure of system is calculated from principle of exchange object and image. And it is optimized with software of ZEMAX. The design result shows that the image quality of system can meet the design indicator requirements under every focal length position and every hyperspectrum.

Key words: Hyperspectrum; Fore zoom system; Optical design; Image quality evaluation