

红外双谱段傅里叶变换成像光谱仪光学设计

计云兵^{1,2}, 梁静秋¹, 梁中翥¹, 吕金光¹, 秦余欣¹, 王维彪¹, 陶金¹, 孟德佳¹

¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 提出了一种基于静态干涉系统的中长波红外双谱段时空联合调制傅里叶变换成像光谱仪(FTIS), 分别对前置望远系统及后置成像系统进行了设计。根据像差理论, 通过添加约束的方式计算了反射式前置望远系统的初始结构, 通过光学设计软件优化, 矫正了系统中倾斜分束器和补偿器带来的大数量级像散和彗差; 在中波和长波双谱段范围内, 前置系统的调制传递函数(MTF)均接近衍射极限。该光谱仪的两个后置成像系统均采用透射式结构, 点列图结果显示, 后置系统成像像斑均方根(RMS)值在双谱段范围均小于 $7.0 \mu\text{m}$ 。将前置望远系统和后置成像系统进行对接, 最终得到了视场角为 1.5° , 中波通道 F 数为 4, 长波通道 F 数为 2 的整体光学系统。在双谱段范围内, 整体系统的点列图 RMS 值小于 $10.7 \mu\text{m}$, MTF 在探测器的特征频率 17 lp/mm 处大于 0.5, 具有良好的成像效果。

关键词 光学设计; 中长波; 傅里叶变换; 成像光谱仪; 离轴三反

中图分类号 TH7

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0322001

Optical Design of Infrared Bispectrum Fourier Transform Imaging Spectrometer

Ji Yunbing^{1,2}, Liang Jingqiu¹, Liang Zhongzhu¹, Lü Jinguang¹,
Qin Yuxin¹, Wang Weibiao¹, Tao Jin¹, Meng Dejia¹

¹ State Key Lab of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China;

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract A Fourier transform imaging spectrometer (FTIS) of medium and long wave infrared bispectrum spatiotemporal joint modulation based on static interference system is presented, and the front telephoto system and post-imaging system are designed. According to the theory of aberration, the initial structure of the reflective front telephoto system is calculated by adding the constraint. The large-scale astigmatism and coma aberration caused by the tilt beam splitter and compensation plate in the system are corrected through the optimization of the optical design software. The modulation transfer function (MTF) of the front telephoto system is close to the diffraction limit in the range of the medium wave and long wave bispectrums. The transmission structure is adopted in the two post-imaging systems of the spectrometer. The results of spot diagram show that the root mean square (RMS) values of the imaging spots of the post-imaging systems are less than $7.0 \mu\text{m}$ in the bispectrum range. The overall optical system is made up of the front telephoto system and the post-imaging system, whose field of view is 1.5° , medium wave channel F number is 4 and long wave channel F number is 2. In bispectrum range, the spot diagram RMS value of the overall system is less than $10.7 \mu\text{m}$, and the MTF of the overall system is more than 0.5 at the detector's characteristic frequency of 17 lp/mm . The overall system has a good imaging effect.

收稿日期: 2017-09-18; 收到修改稿日期: 2017-11-07

基金项目: 国家自然科学基金(61627819, 61575193, 61376122, 61727818, 61735018)、吉林省科技发展计划(20150520101JH, 20150204072GX, 20150101049JC, 20170204077GX)、中国科学院青年创新促进会基金(2014193, 2018254)、应用光学国家重点实验室开放基金

作者简介: 计云兵(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事成像光谱仪光学系统设计方面的研究。

E-mail: jiyunbing4814@163.com

导师简介: 梁静秋(1962—), 女, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事红外光谱成像技术及微光机电系统等方面的研究。

E-mail: liangjq@ciomp.ac.cn(通信联系人)

Key words optical design; medium and long wave; Fourier transform; imaging spectrometer; off-axis three mirror
OCIS codes 220.1000; 220.3620; 110.3080

1 引 言

成像光谱探测技术是一种以光谱分析理论为核心,集成像与光谱探测为一体的新一代光学探测技术。作为一种极其重要的探测手段,成像光谱探测技术被广泛应用于空间监测、环境保护等军用和民用领域^[1-2]。随着安全生产形势日益严峻、环境污染及灾害事故频发,研发能够快速检测、环境适用性强、稳定性高、可靠性好及小型化的宽波段中波红外成像光谱仪^[3-5]成为人们的迫切需求。

傅里叶变换成像光谱仪(FTIS)是一种调制干涉型光谱仪,其调制原理分为时间调制、空间调制和时空联合调制。其中,时间调制型及空间调制型 FTIS 的发展较为成熟。2011 年,法国巴黎大学研制了时间调制型 FTIS 样机(IFTSUV)^[6],其光谱范围为 80~145 nm,空间分辨率为 1",光谱分辨率可达 0.005 nm。2012 年,美国夏威夷大学研制了机载 Sagnac 型空间调制型长波红外 FTIS 工程样机^[7],其光谱范围为 7.5~11 μm ,空间分辨率在探测距离 457.2 m 时为 0.27 m,光谱分辨率达到 20 cm^{-1} 。

本文研究了以阶梯微反射镜作为干涉系统核心器件的时空联合调制型 FTIS,这种成像光谱仪可实现红外中波和长波谱段的同时测量,拓展了一般成像光谱仪器的光谱探测范围。该仪器的干涉系统由平面反射镜和阶梯微反射镜组成,并且不含可移动部件,实现了干涉系统的静态化,具有更强的抗干扰能力。此外,该成像光谱仪还具有多通道、高通量、高信噪比等特点,集合了时间调制和空间调制两种调制方式的优势^[8-9]。

本文设计了时空联合调制型红外双波段 FTIS 的前置望远系统及后置成像系统。其中,前置望远系统采用离轴反射式共口径像方远心光学结构,基于像差理论计算了前置望远系统的初始结构^[10-12],并对倾斜分束器和补偿器带来的像差进行补偿。后置成像系统采用透射式物方远心光学结构,采用加入柱面镜的方式矫正了倾斜片状分束器和补偿器带来的大数量级像散。最后对前置系统和后置系统进行对接优化,实现良好的成像质量。

2 工作原理及系统参数

2.1 红外双波段成像光谱仪的工作原理

红外双波段 FTIS 的工作原理如图 1 所示,整个系统由前置望远系统、干涉系统、后置成像系统以及红外探测器组成。入射光线经过离轴反射式共口径前置望远系统以及分束系统后,到达由平面镜、分束镜和阶梯微反射镜组成的干涉系统,由多级阶梯微反射镜实现入射光线光程差的空间调制。由平面反射镜和阶梯微反射镜反射的光经过分色镜分色后,进入后置成像系统,分别成像在中波红外(MWIR)和长波红外(LWIR)探测器上。通过载体与目标场景之间的相对运动,使不同目标物点依次经过阶梯微反射镜的各级阶梯,从而获得目标物体的三维数据立方体(图 2)。为保证成像质量,前置望远系统需将目标物体清晰地成像在阶梯微反射镜上,同时,为保证干涉条纹不发生混叠,需要主光线垂直入射到阶梯微反射镜的多个阶梯上,即要求前置望远系统为像方远心结构,而后置成像系统为物方远心结构。

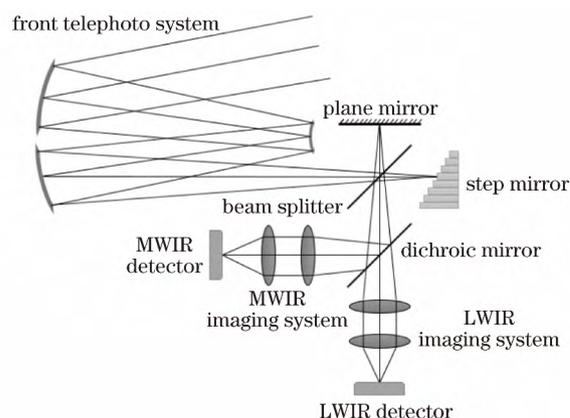


图 1 成像光谱仪工作原理

Fig. 1 Working principle of imaging spectrometer

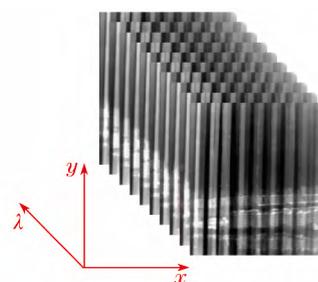


图 2 三维数据立方体

Fig. 2 Tridimensional data cube

2.2 设计参数

成像光谱仪的主要设计要求如表 1 所示。

表 1 成像光谱仪主要设计指标要求

Table 1 Main specifications of the imaging spectrometer

Parameter	Value
Wavelength coverage	3.7-4.8 μm , 8-12 μm
Spatial resolution	0.3 m@2000 m
Modulation transfer function (MTF)	>0.5@17 lp/mm

该成像光谱仪属于二次成像系统,在确定前置望远镜参数时,需要综合考虑后置成像系统与其孔径匹配的问题。选取中波红外探测器面阵像元数量为 320×256 ,单个像元直径 $a = 30 \mu\text{m}$, F 数为 4,阶梯微反射镜尺寸为 $32 \text{ mm} \times 32 \text{ mm}$,则后置成像系统放大率为 $\beta = 0.24$ 。根据系统指标要求,在探测距离 $H = 2000 \text{ m}$ 处,望远镜的空间分辨率为 $R_{\text{GSD}} = 0.3 \text{ m}$,则焦距 $f'_1 \geq 833.3 \text{ mm}$ 。由数值孔径(NA)公式 $NA = 1/(2F)$ 可得中波后置成像系统的像方数值孔径为 $NA'_{\text{back}} = 0.125$ 。后置成像系统的物方数值孔径 NA_{back} 要与前置望远系统像方数值孔径匹配,故前置望远系统像方数值孔径 $NA'_{\text{front}} = NA_{\text{back}} = \beta \times NA'_{\text{back}} = 0.03$ 。

选取长波红外探测器面阵像元数量为 320×256 ,单个像元直径 $a = 30 \mu\text{m}$, F 数为 2。考虑长波后置成像系统要和前置望远系统孔径匹配,则长波后置成像系统的放大倍率为 0.12。同样要求望远镜在探测距离 $H = 2000 \text{ m}$ 的空间分辨率为 $R_{\text{GSD}} = 0.3 \text{ m}$,则其焦距 $f'_2 \geq 1666.6 \text{ mm}$ 。

综合中长波两种情况,选取前置望远系统的焦距 $f' = 1700 \text{ mm}$,像方数值孔径为 0.03。设 ω 为前置望远系统半视场角,则有 $2\omega = 2 \arctan \frac{\sqrt{2}b}{2f'}$,得出全视场角 2ω 为 1.5° 。其中, b 为阶梯微反射镜尺寸。前置望远系统的参数如表 2 所示。

表 2 前置望远系统参数

Table 2 Parameters of the front telephoto system

Parameter	Value
Field of view	1.5°
Wavelength coverage	3.7-4.8 μm , 8-12 μm
Focal length	1700 mm
Image spare NA	0.03

3 前置望远系统设计

3.1 倾斜分束器像差分析

干涉系统中存在倾斜分束器及补偿器,在进行

离轴三反初始结构的计算时,要考虑倾斜分束器及补偿器所带来的影响。本成像光谱仪所使用的分束器材料为硒化锌材料,其厚度为 10 mm ,绕 X 方向 45° 倾斜, Y 方向的偏心量为:

$$dy = \frac{t \sin \theta \cos \theta}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}, \quad (1)$$

式中 t 为分束器和补偿器厚度, n 为硒化锌折射率, θ 为倾斜角。

对于倾斜平行平板来讲,有如下像差公式:

$$B_{\text{spher}} = \frac{(n^2 - 1)tNA^3}{4n^3}, \quad (2)$$

$$B_{\text{coma}} = \frac{(n^2 - 1)tu_p NA^2}{2n^3}, \quad (3)$$

$$B_{\text{astig}} = \frac{(n^2 - 1)tu_p^2 NA}{n^3}, \quad (4)$$

式中 u_p 为主光线入射角, NA 为像方数值孔径。(2)~(4)式分别代表倾斜平板的球差、彗差和像散。由于前置望远系统是应用于中波和长波红外双谱段的,在计算初始结构消除倾斜平板带来的影响时,可先考虑一个谱段,在后续优化的过程中再令双谱段都满足要求。取长波红外中心波长 $\lambda = 10 \mu\text{m}$,得到 $B_{\text{spher}} = 0.047 \mu\text{m}$, $B_{\text{coma}} = 2.431 \mu\text{m}$, $B_{\text{astig}} = 127.276 \mu\text{m}$ 。可见,倾斜平板所带来的像差主要为像散。求解初始结构时,可令三反系统的像差与倾斜平板的像差相互抵消,从而达到消像差的目的。

3.2 前置望远系统初始结构计算

离轴三反系统^[13-15]是在共轴三反系统(图 3)的基础上进行离轴实现的。对于共轴三反系统,系统三个反射面一般是二次曲面,因此共有 8 个自由变量,即三个反射面的曲率半径 r_1, r_2, r_3 ,三个二次非球面系数 K_1, K_2, K_3 及主镜与次镜间隔 d_1 、次镜与三镜间隔 d_2 。其中,用 5 个自由变量来保证焦距并校正 4 种像差:球差、彗差、像散和场曲。若选取 d_1, d_2 及第三个反射镜到像面的距离 d_3 为设计参数,当这三个参数给定之后,系统就可以完全确定。

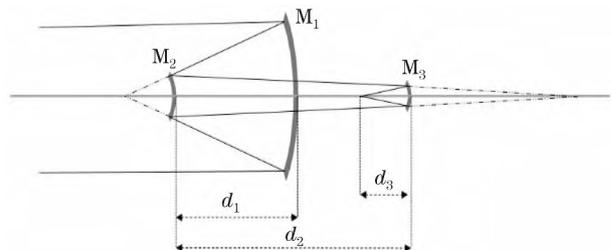


图 3 共轴三反系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of coaxial three mirror system

可考虑从以下三方面约束光学系统:1)为实现像方远心,可将光阑设置在次镜上,并使次镜在三镜的焦点处;2)为保证系统结构紧凑,可令次镜到主镜距离与三镜到次镜距离相等;3)考虑到阶梯微反射镜、分束器等光学元件与前置望远系统在空间上不能相互干扰,可令像面距离略大于次镜与三镜间隔,以保证有足够大的后工作距。上述三个约束条件即为:

$$\begin{cases} d_2 = -r_3/2 \\ d_2 = -d_1 \\ d_3 = 1.25d_1 \end{cases} \quad (5)$$

由三个条件结合离轴三反基础理论^[16],可得以下变量值: $r_1 = -3585.739$ mm, $r_2 = -1456.625$ mm, $r_3 = -1745.598$ mm, $d_1 = -872.779$ mm, $d_2 = 872.779$ mm, $d_3 = -1090.974$ mm。由此可计算出次镜对主镜的遮拦比 α_1 、三镜对次镜的遮拦比 α_2 以及次镜放大率 β_1 和三镜放大率 β_2 ,并将 α_1 、 α_2 、 β_1 、 β_2 代入到像差公式^[17],令:

$$\begin{cases} S_I = -B_{spher} \\ S_{II} = -B_{coma} \\ S_{III} = -B_{astig} \end{cases} \quad (6)$$

式中 S_I 、 S_{II} 、 S_{III} 分别是系统的球差、彗差和像散,从而可以算出 $K_1 = -1.636$, $K_2 = -0.755$, $K_3 = 0.041$ 。初始结构参数如表 3 所示。

表 3 前置望远系统初始结构参数

Table 3 Initial structural parameters of the front telephoto system

Mirror	Parameter
Primary	$r_1 = -3585.739$, $d_1 = -872.779$, $K_1 = -1.636$
Secondary	$r_2 = -1456.625$, $d_2 = 872.779$, $K_2 = -0.755$
Tertiary	$r_3 = -1745.598$, $d_3 = -1090.974$, $K_3 = 0.041$

为保证系统无中心遮挡,需要对初始结构进行离轴。该系统光阑设置在次镜上,可采用视场离轴的方式对初始结构进行离轴,此种离轴方式使系统有较对称的结构,易得到较好的成像质量。离轴后的视场为图 4 所示的矩形视场,为保证全视场都有良好的成像质量,可选取矩形视场对角线上的 5 个点作为参考点。由于视场是左右对称的,故这 5 个参考点可基本说明系统的成像质量。

3.3 前置望远系统优化与像质评价

利用光学设计软件对初始结构进行离轴并优化。在初始结构求解时,考虑了分束器和补偿器的影响,预留了充足的空间余量,并在优化时按实际情况作调整,优化过程中始终保持远心。优化后的出

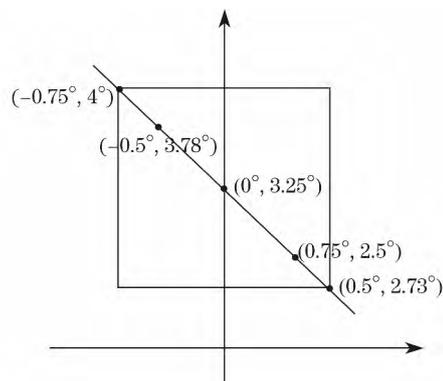


图 4 矩形视场示意图

Fig. 4 Schematic diagram of rectangular field of view

瞳距离大于 10^5 mm,图 5 是离轴并优化后的结构图,其参数如表 4 所示。系统的调制传递函数如图 6 所示,可以看到,中波和长波谱段的调制传递函数都接近衍射极限,像散可以很好地平衡。

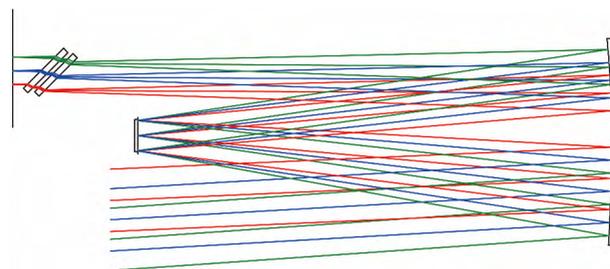


图 5 优化后前置望远系统的结构图

Fig. 5 Optimized structure diagram of the front telephoto system

表 4 优化后的前置望远系统的结构参数

Table 4 Optimized structural parameters of the front telephoto system

Mirror	Parameter
Primary	$r_1 = -3037.247$, $d_1 = -780$, $K_1 = -0.975$
Secondary	$r_2 = -1262.266$, $d_2 = 780$, $K_2 = -0.022$
Tertiary	$r_3 = -1638.680$, $d_3 = -991.932$, $K_3 = 0.084$

4 后置成像系统设计

后置成像系统分为中波和长波两个通道,两个后置系统共用前置望远物镜。光线经过干涉系统,使用镀有二向色膜层的分色镜对其分束,之后分别进入两个后置成像系统成像。根据目前的镀膜工艺,对中波反射、长波透射的分色镜较易加工,并且膜层不易脱落。所以光学系统采用对中波谱段反射、长波谱段透射的分光方式。因此在长波后置成像系统设计中需考虑分色镜带来的像差,而中波后置成像系统则无需考虑。

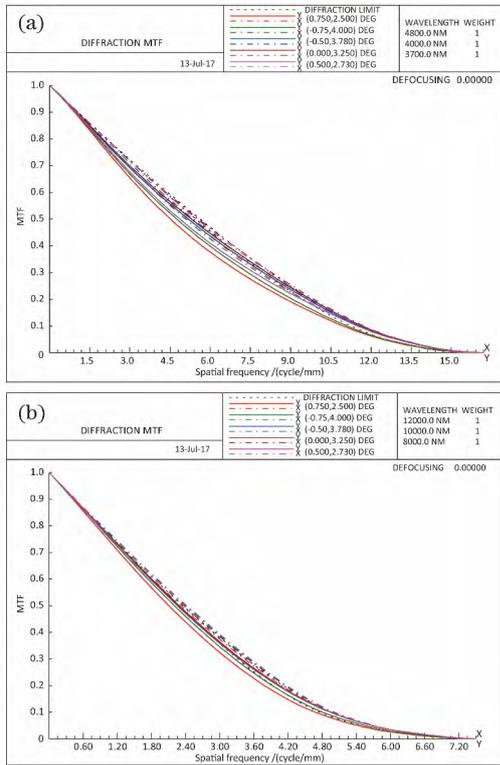


图 6 (a)中波调制传递函数;(b)长波调制传递函数

Fig. 6 (a)Medium wave MTF ; (b) long wave MTF

4.1 中波后置成像系统设计

前置望远系统在阶梯微反射镜上的像经中波后

置成像系统后,二次成像在探测器上。由于前置望远系统为像方远心结构,故后置成像系统采用物方远心结构。中波后置成像系统采用硅-锗组合的七片式结构,设计时需要考虑倾斜分束器和补偿器带来的像差。同时,由于需要在后置成像系统前放置分色镜,所以要留有充足的空间余量。根据上文参数设计结果,中波后置成像系统的主要参数如表 5 所示。

表 5 中波后置成像系统参数

Table 5 Parameters of medium wave post-imaging system

Parameter	Value
Height of object	22.5 mm
Wavelength coverage	3.7-4.8 μm
Magnification	0.24
Object NA	0.03

中波后置成像系统的结构如图 7(a)所示。该系统使用探测器的冷阑作为系统的光阑,可实现 100%的冷光阑匹配。系统的第二片镜子前表面为柱面镜,可在子午和弧矢两个方向上提供不同的光焦度,用于消除倾斜平行平板带来的像差。图 7(b)为系统的调制传递函数曲线,图 7(c)为系统的点列图,可以看到系统的调制传递函数在特征频率 17 lp/mm 处高于 0.5,成像像斑均方根(RMS)值小于 3.8 μm 。

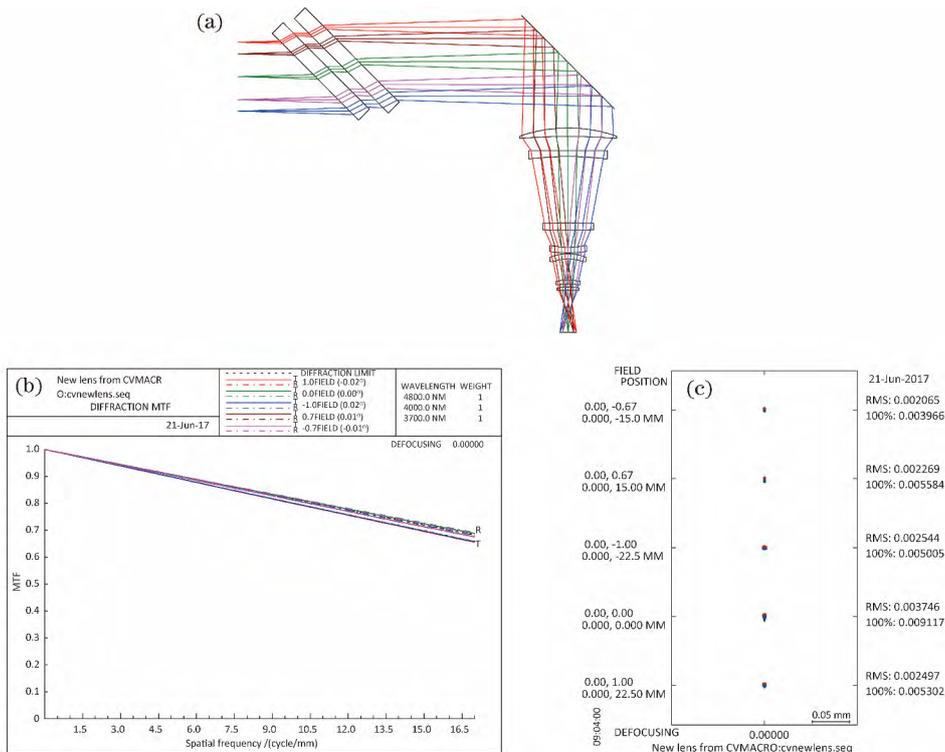


图 7 中波后置成像系统的(a)结构图;(b)调制传递函数曲线;(c)点列图

Fig. 7 (a) Structure diagram ; (b) MTF curve ; (c) spot diagram of medium wave post-imaging system

4.2 长波后置成像系统设计

长波后置成像系统采用锗-硒化锌组合的六片式结构,同样为物方远心结构。设计时考虑了倾斜分束器和补偿器带来的像差,并在空间上留足分色镜的空间余量。长波后置成像系统的主要参数如表 6 所示。

长波后置成像系统设计结构如图 8(a)所示,该系统使用探测器的冷阑作为系统的光阑,以实现 100%的冷光阑匹配。系统第二片镜子的前表面为柱面镜,用于消除倾斜平行平板带来的像差。第三片镜子的前表面为二次曲面,利于减少镜片数量。

图 8(b)为系统的调制传递函数曲线,图 8(c)为系统的点列图,可以看到系统的调制传递函数在特征频率 17 lp/mm 处高于 0.5,成像像斑的 RMS 值小于 7.0 μm 。

表 6 长波后置成像系统参数

Table 6 Parameters of long wave post-imaging system

Parameter	Value
Height of object	22.5 mm
Wavelength coverage	8-12 μm
Magnification	0.12
Object NA	0.03

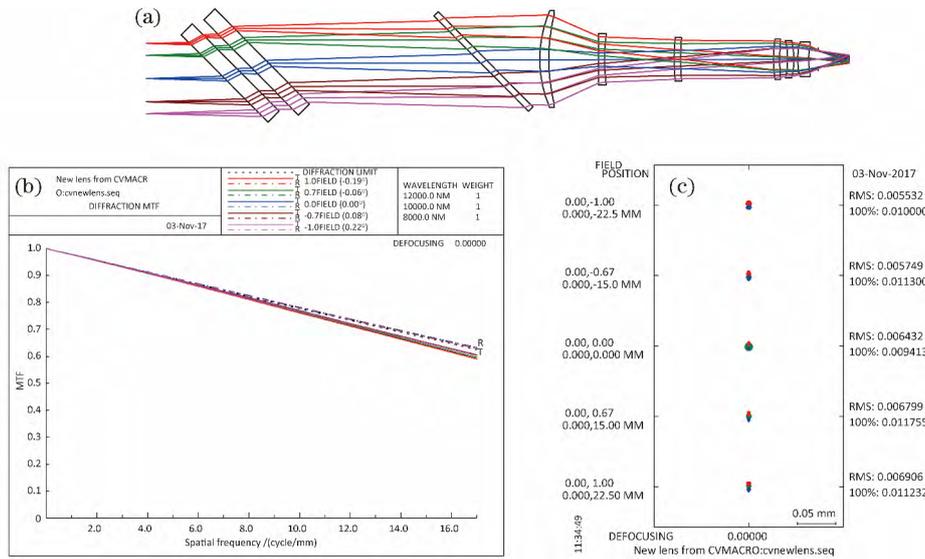


图 8 长波后置成像系统的(a)结构图;(b)调制传递函数曲线;(c)点列图

Fig. 8 (a) Structure diagram ; (b) MTF curve ; (c) spot diagram of long wave post-imaging system

5 整体系统像质评价

5.1 中波通道整体系统像质评价

图 9(a)为中波谱段前置、后置成像系统对接后的整体结构图,由于前置望远系统以及后置成像系统并非百分百的远心,故在对接后需要对系统进行优化。优化时,将光阑放置在前置望远系统的次镜上,由于两个后置成像系统共用一个前置物镜,所以前置望远系统不能设置优化变量。优化完成后,再使用探测器的冷光阑作为整体系统的光阑。

中波通道整体系统的调制传递函数曲线如图 9(b)所示,点列图如图 9(c)所示。从图 9 可以看到,中波通道整体系统的调制传递函数在特征频率 17 lp/mm 处高于 0.5,成像像斑的 RMS 值小于 10.7 μm ,满足仪器的设计需求。

5.2 长波通道整体系统像质评价

将前置望远系统与长波后置成像系统进行对接

优化,对接方式和中波通道相同。图 10(a)为长波谱段前置、后置成像系统对接后的整体结构图。图 10(b)为长波通道整体系统的调制传递函数曲线,图 10(c)为系统的点列图。从图 10 可以看到,长波通道整体系统的调制传递函数在特征频率 17 lp/mm 处高于 0.5,成像像斑的 RMS 值小于 7.3 μm ,满足仪器的设计要求。

6 结 论

提出了一种可同时探测中波和长波红外谱段的基于阶梯微反射镜的新型时空联合调制 FTIS,对其前置望远系统及两个后置成像系统分别进行了设计。通过添加约束的方式得到了反射式前置望远系统的初始结构,利用光学设计软件优化,得到了调制传递函数接近于衍射极限的前置望远系统。并将中波和长波两个后置成像系统与前置望远系统进行对接,最终得到视场角为 1.5°,中波通道 F 数为 4、长

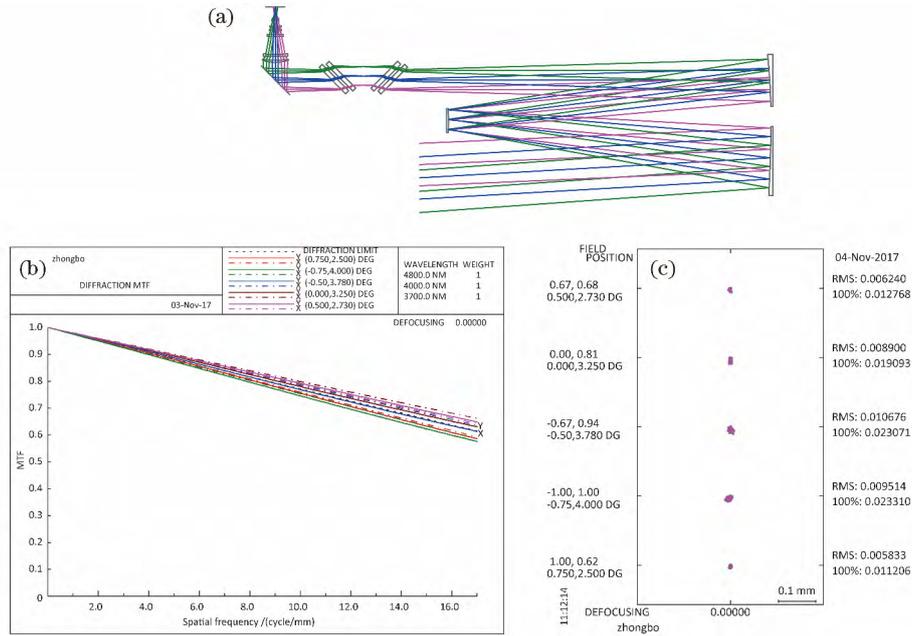


图 9 中波通道整体系统的(a)结构图;(b)调制传递函数曲线;(c)点列图

Fig. 9 (a) Structure diagram ; (b) MTF curve ; (c) spot diagram of medium wave channel overall system

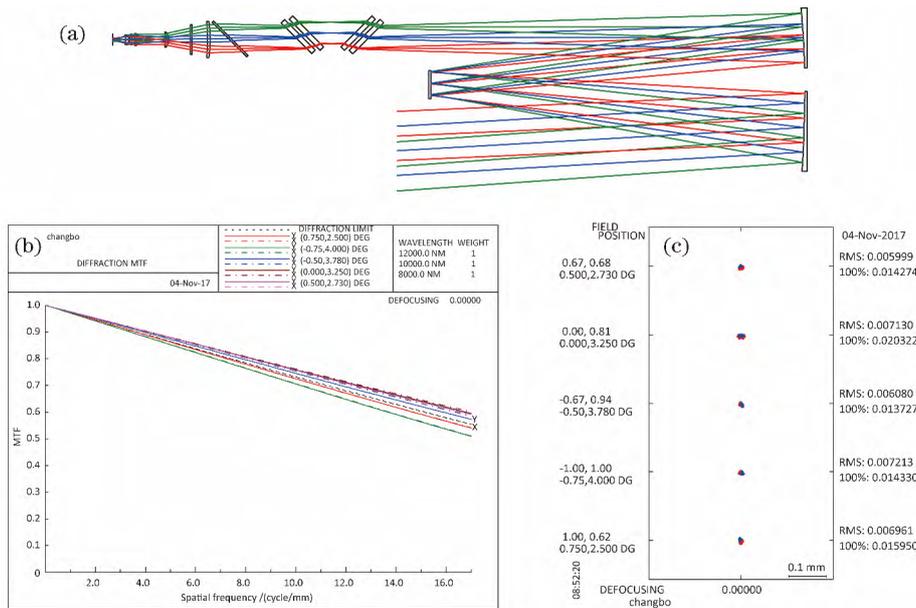


图 10 长波通道整体系统的(a)结构图;(b)调制传递函数曲线;(c)点列图

Fig. 10 (a) Structure diagram ; (b) MTF curve ; (c) spot diagram of long wave channel overall system

波通道 F 数为 2, 空间分辨率在探测距离 2000 m 处高于 0.3 m 的成像光谱仪整体结构。该光学系统的成像效果优良, 其设计方法可应用于其他空间光学遥感仪器的设计中。

参 考 文 献

[1] Kudenov M W, Dereniak E L. Compact real-time birefringent imaging spectrometer[J]. Optics Express, 2012, 20(16): 17973-17986.
 [2] Ferrec Y, Taboury J, Sauer H, et al. Experimental

results from an airborne static Fourier transform imaging spectrometer[J]. Applied Optics, 2011, 50 (30) : 5804-5904.

[3] Gao Z Y, Fang W, Song B Q, et al. Design of off-plane Offner spectrometer with high spectral resolution[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(2) : 0211002.
 高震宇, 方伟, 宋宝奇, 等. 非共面 Offner 结构高分辨率成像光谱仪设计[J]. 光学学报, 2016, 36(2) : 0211002.
 [4] Wei R Y. Study on time-resolved Fourier transform infrared spectral imaging technology and its

- applications[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics & Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2013. 魏儒义. 时间调制傅里叶变换红外光谱成像技术与应用研究[D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2013.
- [5] Liang J Q, Liang Z Z, Lü J G, *et al.* Micro spatial modulation Fourier transform infrared spectrometer[J]. Chinese Optics, 2015, 8(2): 277-298. 梁静秋, 梁中翥, 吕金光, 等. 空间调制微型傅里叶变换红外光谱仪研究[J]. 中国光学, 2015, 8(2): 277-298.
- [6] de Galarreta Fanjul C R, Philippon A, Vial J C, *et al.* Metrology for an imaging Fourier transform spectrometer working in the far-UV (IFTSUV)[C]. SPIE, 2011, 8169: 816907.
- [7] Lucey P G, Wood M, Crites S T, *et al.* A LWIR hyperspectral imager using a Sagnac interferometer and cooled HgCdTe detector array[C]. SPIE, 2012, 8390: 83900Q.
- [8] Wang S, Xiang L B, Li L B, *et al.* Research of spectrum signal-to-noise ratio of large aperture static imaging spectrometer[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(3): 851-856. 王爽, 相里斌, 李立波, 等. 大孔径静态干涉成像光谱仪光谱信噪比研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(3): 851-856.
- [9] Fu Q, Xiang L B, Lü Q B, *et al.* Design of a dual-channel Mach-Zehnder lateral shearing interferometer for the large aperture static imaging spectrometer[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, 32(2): 553-557. 付强, 相里斌, 吕群波, 等. 大孔径静态干涉成像光谱仪中双通道 Mach-Zehnder 横向剪切干涉仪的设计[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(2): 553-557.
- [10] Yu X, Zhang B, Hong Y F. A method for initial configuration of off-axis three-mirror system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(11): 112201. 于鑫, 张葆, 洪永丰. 一种离轴三反射系统初始结构的求解方法[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(11): 112201.
- [11] Deng J, Li R G, Deng X C, *et al.* Athermalizing mirror-lens infrared optical system[J]. Journal of Applied Optics, 2014, 35(1): 146-149. 邓键, 李锐钢, 邓显池, 等. 折反式红外镜头的无热化研究[J]. 应用光学, 2014, 35(1): 146-149.
- [12] Qu R, Deng J. Methods of correcting between-band chromatic aberration in infrared dual-band dual-field of view athermalized optical design[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1): 122006. 曲锐, 邓键. 红外双波段双视场消热差光学系统设计中消波段间色差条件(方法)的研究[J]. 光学学报, 2015, 35(1): 122006.
- [13] Chen Z, Zhang X X, Chen C Z, *et al.* Coaxial and off-axis hybrid three-mirror optical system with long focal length[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(4): 0416002. 陈哲, 张星祥, 陈长征, 等. 长焦距同离轴混合式三反光学系统[J]. 中国激光, 2016, 43(4): 0416002.
- [14] Liu X M, Xiang Y. Research and design of telecentric off-axis three-mirror system with real entrance pupil[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(11): 1122002. 刘晓梅, 向阳. 具有实入瞳的远心离轴三反系统研究与设计[J]. 光学学报, 2011, 31(11): 1122002.
- [15] Gao D R, Hu H, Wang W, *et al.* Optical design for a kind of simply processed and installed off-axis three-reflection[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(6): 0616001. 高铎瑞, 胡辉, 汪伟, 等. 一种改进的易于加工、装调的离轴三反光学系统设计[J]. 中国激光, 2015, 42(6): 0616001.
- [16] Guo Y H. Research on modern infrared optical system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 1999. 郭永洪. 现代红外光学系统研究[D]. 杭州: 浙江大学, 1999.
- [17] Pan J H. The design, manufacture and test of the aspherical optical surface[M]. Suzhou: Soochow University Press, 2004: 130-141. 潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检验[M]. 苏州: 苏州大学出版社, 2004: 130-141.