

# 基于压缩感知的红外大视场高分辨成像系统设计

姜来, 霍娟, 杨静琦, 王智斌, 朱云亮, 周洁, 马喆\*

中国航天科工二院未来实验室, 北京 100854

**摘要** 针对红外探测器件大阵面技术缺乏、单孔径红外探测系统难以兼顾大视场和高分辨率等问题,设计了一种基于压缩感知技术的红外大视场高分辨成像系统。该系统由成像物镜和中继透镜组成,成像物镜对场景进行大视场高分辨率一次成像,一次成像的像面经空间光调制板的调制后由中继透镜二次成像在探测器阵列,利用图像重建算法可将探测器阵列接收的图像进行恢复。设计结果显示,所提系统的工作波段为 3.8~4.8  $\mu\text{m}$ ,成像物镜具有  $F/1.999$  的大数值孔径,视场为  $\pm 16^\circ$ ,像元数达到  $1280 \times 1024$ ,中继透镜像元数达到  $640 \times 512$ ,成像质量完全匹配所选的探测器阵列。此外,对比现有红外单孔径探测系统,所设计的系统具有大视场、高分辨、结构简单紧凑等优势,在航空遥感探测领域具有较大的应用前景。

**关键词** 成像系统; 压缩感知; 中红外波段; 物镜; 中继透镜; 航空遥感; 红外探测器阵列

中图分类号 TN216

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0811003

## Design of Infrared Imaging System with Wide Field of View and High Resolution Based on Compression Sensing

Jiang Lai, Huo Juan, Yang Jingqi, Wang Zhibin, Zhu Yunliang, Zhou Jie, Ma Zhe\*

X LAB, The Second Academy of CASIC, Beijing 100854, China

**Abstract** Due to the lack of large scale technology of infrared focal plane arrays and the conflict between the wide field-of-view and high resolution for a single aperture infrared detection system, an infrared imaging system with wide field-of-view and high resolution based on compression sensing was designed. The system consists of the objective lens and the relay lens. Firstly, the imaging objective can image a scene with wide field-of-view and high resolution. Secondly, the relay lens images the image surface of a single image modulated by a spatial light modulator. Finally, the scene image received by detector arrays can be restored by image reconstruction algorithm. The design results show that the working wavelength of the system is 3.8~4.8  $\mu\text{m}$ , and the objective lens has large numerical aperture of  $F/1.999$ . The field-of-view is  $\pm 16^\circ$ , and the pixel number can reach  $1280 \times 1024$ . The pixel number of the relay lens is  $640 \times 512$  with a good matching with the detector array. Comparing to the current single aperture infrared detection system, the designed system has the characteristics of the wide field-of-view, high resolution, and simple and compact structure, and has wide potential application in the field of aerial remote sensing.

**Key words** imaging systems; compressive sensing; middle-infrared band; objective lens; relay lens; aerial remote sensing; infrared detector array

## 1 引言

红外探测技术具有隐蔽性好、不易受电子干扰、

识别伪装、昼夜工作、透雾等优点,在侦察、地形测绘等军事领域上得到广泛应用<sup>[1-3]</sup>。在航空遥感领域中,小型化大视场高分辨红外系统需求日益凸显。

收稿日期: 2021-04-06; 修回日期: 2021-04-11; 录用日期: 2021-04-22

通信作者: \*mazhe\_thu@163.com

一方面,大面阵红外探测器需要的制冷机、杜瓦组件体积较大,使得系统整体体积过大;另一方面,大面阵红外探测器件具有高度的军事敏感性,我国常年受到国外封锁禁运,而国产红外探测器阵列规模较小<sup>[4-5]</sup>,单孔径红外成像系统难以兼具大视场和高分辨率特点。为实现红外系统的大视场高分辨成像,一般采用机械扫描<sup>[6-7]</sup>或多孔径镜头<sup>[8-9]</sup>成像拼接的方法,机械扫描系统需增加伺服,多孔径镜头成像系统增加了镜头数目,因此系统体积难以减小。

在红外波段,基于压缩感知技术的探测系统使用低分辨率探测器即可获得高分辨率图像,这使得在现有条件下实现大视场、高分辨率、小型化的红外探测系统成为可能。随着信息计算以及图像编码和图像恢复算法能力的快速提升,基于压缩感知技术的探测系统通过远小于图像规模的测量即可将图像恢复,在阵列式探测器件分辨率有限的红外波段有较大优势<sup>[10-11]</sup>。但目前红外波段压缩感知的研究中<sup>[12-13]</sup>使用的空间光调制器件为DMD(digital micromirror device)器件,DMD器件需要驱动控制电路对其进行控制,且DMD器件为反射结构,使得光路较为复杂,进而使得系统小型化受限。此外,目前针对压缩感知技术的研究主要集中在孔径编码<sup>[14]</sup>、重建算法<sup>[15-17]</sup>,鲜有关于光学系统的设计工作。

针对航空遥感领域对单个孔径红外成像系统的大视场、高分辨率成像和小型化的需求,受压缩感知研究启发<sup>[18-20]</sup>,本文设计了一种基于压缩感知的红外大视场高分辨成像的光学系统,该系统使用像元尺寸更小的空间光调制板代替DMD器件,结合较小分辨率的红外探测器阵列实现系统体积的减小,利用小型化大视场高分辨率物镜对物方场景进行一次成像,利用空间光调制板对一次成像进行调制,并利用中继透镜将调制后的图像二次成像在较低分辨率探测器阵列,最后利用重建算法即可实现大视场高分辨图像重建。

## 2 工作原理

基于压缩感知的成像技术利用信号具有稀疏或可稀疏表示的特点对信号进行重建。对于稀疏信号  $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^{N \times 1}$ ,其经测量矩阵  $\Phi \in \mathbf{R}^{M \times N}$  的调制后,测量值向量  $\mathbf{y}$  可表示为

$$\mathbf{y} = \Phi \mathbf{x}, \mathbf{y} \in \mathbf{R}^{M \times 1}. \quad (1)$$

根据压缩感知理论要求,原始信号须具备稀疏特性,若信号本身不具有稀疏特性,则需要将其稀

疏化<sup>[21]</sup>,即将原始信号乘上一个矩阵  $\Psi$ ,使原始信号转换成稀疏矩阵:

$$\mathbf{x} = \Psi \boldsymbol{\alpha}, \quad (2)$$

式中:  $\Psi$  为稀疏矩阵或稀疏变换基;  $\boldsymbol{\alpha}$  为  $\mathbf{x}$  基于稀疏基的稀疏表示。

为了获得有效的目标恢复,测量矩阵需要满足 RIP(restricted isometric property) 准则<sup>[22]</sup>,对于稀疏信号  $\mathbf{x}$ ,有

$$(1 - \delta_k) \|\mathbf{x}\|_2^2 \leq \|\Phi \mathbf{x}\|_2^2 \leq (1 + \delta_k) \|\mathbf{x}\|_2^2, \quad (3)$$

式中:  $\delta_k$  为任意常数,  $0 \leq \delta_k \leq 1$ 。对于非稀疏信号  $\mathbf{x}$ , (3) 式可表示为

$$(1 - \delta_k) \|\boldsymbol{\alpha}\|_2^2 \leq \|\Phi \Psi \boldsymbol{\alpha}\|_2^2 \leq (1 + \delta_k) \|\boldsymbol{\alpha}\|_2^2. \quad (4)$$

当满足上述条件时,根据测量值向量  $\mathbf{y}$  和测量矩阵  $\Phi$ ,通过求解最优范数  $l_0$  可精确估计出原始信号  $\mathbf{x}$ ,则估计信号  $\hat{\mathbf{x}}$  可表示为

$$\hat{\mathbf{x}} = \arg \min \|\mathbf{x}\|_0 \text{ s.t. } \mathbf{y} = \Phi \mathbf{x}, \quad (5)$$

式中:  $\|\mathbf{x}\|_0$  表示  $\mathbf{x}$  中的非零元素个数。

由于基于  $l_0$  范数的优化问题属于一个 NP-hard 问题,计算复杂度非常高,直接进行求解比较困难,使用  $l_1$  范数替换  $l_0$  范数进行求解可精确估计原始信号,即

$$\hat{\mathbf{x}} = \arg \min \|\mathbf{x}\|_1 \text{ s.t. } \mathbf{y} = \Phi \mathbf{x}, \quad (6)$$

式中:  $\|\mathbf{x}\|_1 = \sum_{i=1}^n |x_i|$ ,  $x_i$  为信号向量  $\mathbf{x}$  的一个元素。将

(5) 式的非凸最优化问题转化为 (6) 式的凸最优化问题,使用  $l_1$  范数进行求解,也可精确估计出原始信号。

基于压缩感知的红外大视场高分辨成像系统(图 1)主要包括 4 个功能模块,即大视场高分辨率光学系统、空间光调制器、探测器及数据采集模块、图像重建模块。大视场高分辨率光学系统包括成像物镜和中继透镜,其在工作时,大视场物镜将目标一次成像(航空遥感中的原始信号  $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^{N \times 1}$  可稀疏表示)在空间光调制板,中继透镜将编码后的图像二次成像(测量矩阵  $\mathbf{y} \in \mathbf{R}^{M \times 1}$ ) 在探测器阵列上;空间光调制器通过散射对大视场高分辨红外图像进行随机编码(测量矩阵  $\Phi \in \mathbf{R}^{M \times N}$ );探测器及数据采集模块对光信号进行收集,所使用探测器阵列的分辨率远小于空间光调制板上红色图像的分辨率( $M$  远小于  $N$ ),数据采集系统将信号进行 A/D 转换与采集;图像重建模块通过重建算法将采集信号重建为物镜对目标的一次成像。其中,孔径编码<sup>[14]</sup>、重建算法<sup>[15-17]</sup>的相关工作已成熟,少有针对压缩感知

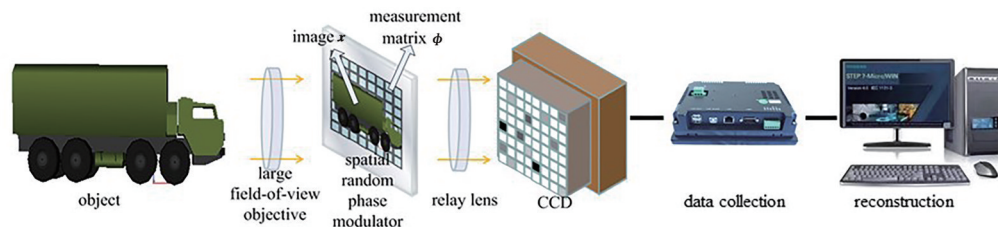


图 1 基于压缩感知的红外大视场高分辨成像系统结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of structure of infrared large-field-of-view high-resolution imaging system based on compressed sensing

相关光学系统的设计工作开展,基于压缩感知的红外大视场高分辨光学系统设计是一项关键技术。目前研究人员需针对大视场高分辨的需求,开展满足航空遥感领域小口径、紧凑型的光学系统设计。

图 2 表示了空间光调制板的测量矩阵  $\Phi$  的标校过程<sup>[18]</sup>,在标校过程中,在空间光调制板某一位置

前放置点光源,使用探测器阵列记录这一位置对光源的散射矩阵  $A_i \in \mathbf{R}^{M \times 1} (1 \leq i \leq N)$ 。根据大视场高分辨物镜在空间光调制板上的成像区域,以成像区域的分辨率重复上述标校过程  $N$  次,组成测量矩阵  $\Phi \in \mathbf{R}^{M \times N}$ :

$$\Phi = [A_1 \dots A_N]。 \quad (7)$$

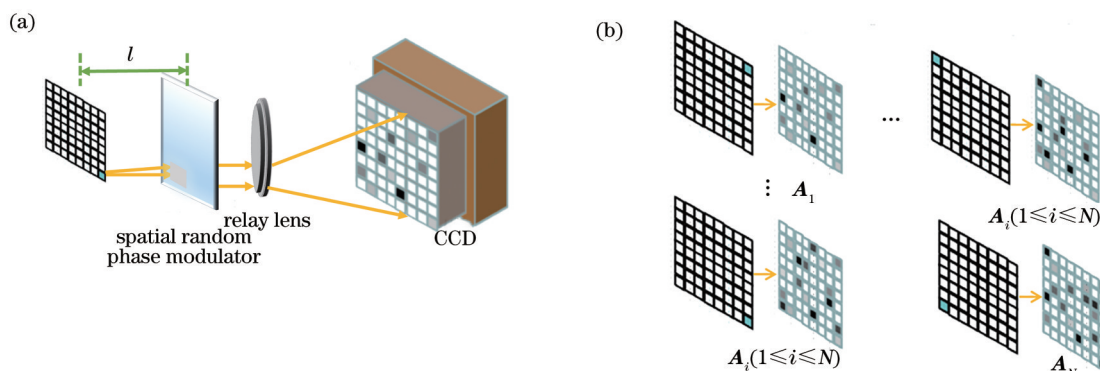


图 2 空间光调制板的测量矩阵  $\Phi$  的标校过程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of calibration process of measurement matrix  $\Phi$  of spatial light modulator

### 3 成像物镜设计

本文选用的探测器为中波红外探测器阵列,其规模为  $640 \times 512$ ,像元大小为  $12 \mu\text{m}$ 。由压缩成像原理可知,对探测器阵列上  $M$  个像素单元进行测量得到的测量值为向量  $\mathbf{y} \in \mathbf{R}^{M \times 1}$ ,根据清华大学马坚伟教授提出的将压缩感知技术应用于航天遥感的方法,通过计算模拟,在测量率(测量次数与像素总数的比值即  $M/N$ )为 25%<sup>[23-24]</sup>时能精确地恢复出图像  $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^{N \times 1}$ 。测量像元数  $M$  为  $640 \times 512$ ,利用压缩感知技术即可恢

复出像元数  $N$  为  $1280 \times 1024$  的图像,因此将成像物镜的成像像元数设为  $1280 \times 1024$ 。

成像物镜和中继透镜系统之间的耦合连接关系如图 3 所示。

物镜将目标一次成像在空间光调制板前,中继透镜将编码后的图像二次成像在探测器阵列上,成像物镜和中继透镜系统共光轴。根据文献[19],设物镜像面与空间光调制器的距离为  $z_1$ ,中继透镜的物面与空间光调制器的距离为  $z_2$ 。为保证系统的信噪比与空间分辨能力,要求  $z_1/z_2$  远大于 1,因此  $z_1$  取

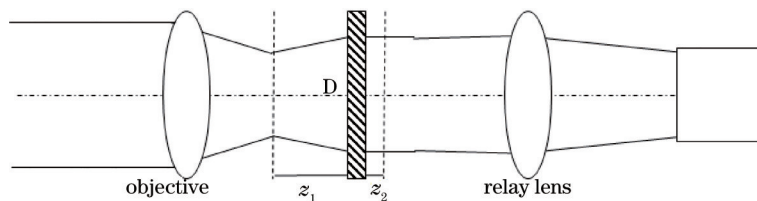


图 3 成像物镜和中继透镜系统之间的连接关系

Fig. 3 Connection relationship between imaging objective lens and relay lens systems



1 cm,  $z_2$  取 0.1 cm。

### 3.1 视场角

设成像系统对物方距离  $L=1.5$  km 的物方像元的分辨率  $R=0.5$  m, 对于成像像元数为  $1280 \times 1024$  的物镜, 其对角线方向的视场角可表示为

$$2\omega = \arctan\left(\frac{R}{L}\sqrt{n_1^2 + n_2^2}\right), \quad (8)$$

式中:  $n_1, n_2$  分别为物镜成像的列像元数和行像元数。根据(8)式可求得在满足物方分辨率时, 系统视场角  $\omega$  需达到  $16^\circ$ 。

### 3.2 相对孔径

光学系统的空间分辨率与其相对孔径( $F$  数的倒数)的选取有关, 空间分辨率可由调制传递函数(MTF)表示。对于无遮拦的理想圆开口光学系统, 其 MTF( $F_{\text{MTF}}$ ) 可表示为<sup>[25]</sup>

$$F_{\text{MTF}} = \frac{2A}{\pi}, \quad (9)$$

其中

$$A = \arccos \nu - \nu\sqrt{1 - \nu^2}, \quad (10)$$

式中:  $\nu$  为归一化空间频率,  $\nu = N/f_c$ ,  $N$  为系统空间分辨率,  $f_c = 1/(\lambda F)$  为系统截止频率,  $\lambda$  为工作波长。系统工作波长为  $3.8 \sim 4.8 \mu\text{m}$ , 波长的平均值为  $4.3 \mu\text{m}$ , 光学系统的  $F$  数为 2。根据(9)式计算出理想光学系统 MTF 值随空间分辨率的变化曲线, 结果如图 4 所示。从图中可以看出, 光学系统的  $F$  数为 2 时, 在空间频率为  $55 \text{ cycle/mm}$  处的 MTF 值高于 0.4, 参考有关红外系统设计<sup>[26-28]</sup>, 可知该光学系统的成像质量满足要求。

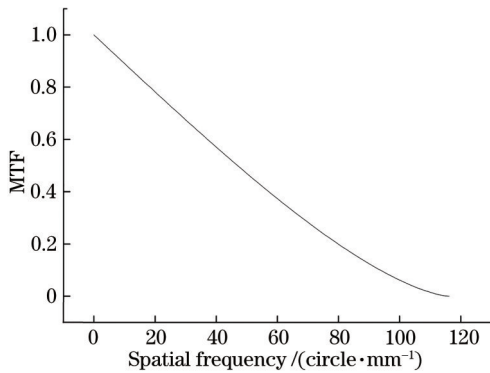


图 4 理想光学系统的 MTF

Fig. 4 MTF of ideal optical system

### 3.3 焦距

在系统空间分辨率为  $55 \text{ cycle/mm}$  时, 其对应的像元大小可表示为

$$N = \frac{1000}{2a}, \quad (11)$$

式中:  $N$  为空间分辨率;  $a$  为像元尺寸(即标记间隔)。

系统成像的像元尺寸为  $9 \mu\text{m}$  时, 物镜在空间光调制板上的成像区域尺寸为  $11.635 \text{ mm} \times 9.308 \text{ mm}$ 。在已知像面尺寸和视场角后, 系统焦距可表示为

$$f' = y' \times \tan \omega, \quad (12)$$

式中:  $y'$  为成像区域的对角线半长;  $\omega$  为视场角。根据(12)式求得系统的焦距需达到  $26 \text{ mm}$ 。

至此可以得到该成像物镜的主要设计参数, 如表 1 所示。

表 1 成像物镜设计目标

Table 1 Design objectives of imaging objective lens

Parameter	Value
Wavelength / $\mu\text{m}$	3.8-4.8
Pixel number	1280×1024
Image plane size / (mm×mm)	11.635×9.308
Field of view / ( $^\circ$ )	$\pm 16$
Focal length / mm	26
F number	<2
Total length / cm	<10

## 4 中继透镜设计

中继透镜将空间光调制模板编码后的图像二次成像在低分辨率探测器阵列上, 通过计算可知, 探测器阵列中  $12 \mu\text{m}$  像元对应的奈奎斯特采样频率为  $41.7 \text{ cycle/mm}$ , 图 5 为 MTF 值随系统  $F$  数的变化曲线, 可以看出: 在系统  $F$  数小于 2.5 时, MTF 高于 0.4, 系统满足成像质量要求。

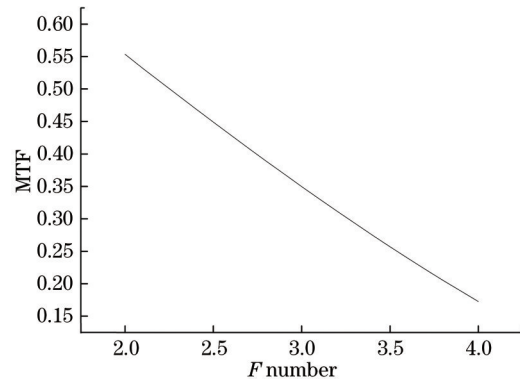


图 5 空间分辨率在  $41.7 \text{ cycle/mm}$  处时 MTF 值随  $F$  数的变化

Fig. 5 MTF value varying with  $F$  number at spatial resolution of  $41.7 \text{ cycle/mm}$

如表 2 所示,将中继透镜的工作波长设为中红外波段(3.8~4.8 μm),考虑到物镜像面与空间光调制器的距离  $z_1=1$  cm,空间光调制器上的有效调制区域 D 要比物镜的像面尺寸(11.635 mm×9.308 mm)大,根据物镜的 F 数与距离  $z_1$  可计算出有效调制区域 D 的口径不超过 19.9 mm。考虑到系统的体积,系统长不大于 10 cm,至此可以得到该成像中继透镜的主要设计参数。

表 2 中继透镜的设计目标  
Table 2 Design objectives of relay lens

Parameter	Value
Wavelength / μm	3.8-4.8
Pixel number	640×512
Object plane diameter /mm	19.9
F number	<2.5
Total length /cm	<10

## 5 设计结果分析

### 5.1 成像物镜

优化完成后的成像物镜参数如表 3 所示,可以看出系统参数达到了设计目标,F 数为 1.999,焦距

表 3 物镜的设计规格

Table 3 Specifications of objective lens

Parameter	Value
Wavelength / μm	3.8-4.8
Pixel number	1280×1024
Image plane size / (mm×mm)	11.635×9.308
Field of view / (°)	±16
Aperture size /cm	2.3
Focal length /mm	26.99
F number	1.999
Total length /mm	54.812

为 26.99 mm,最大口径为 2.3 cm,系统长度为 54.812 mm。系统具有结构紧凑、数值孔径大、分辨率高等特点,其具体结构如图 6 所示。

图 7(a)~(c)分别为红外大视场高分辨成像物

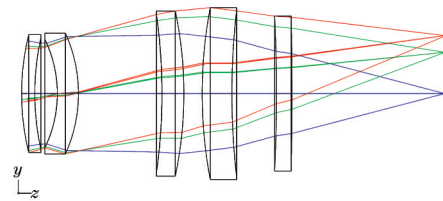


图 6 成像物镜结构图

Fig. 6 Structure diagram of imaging objective lens

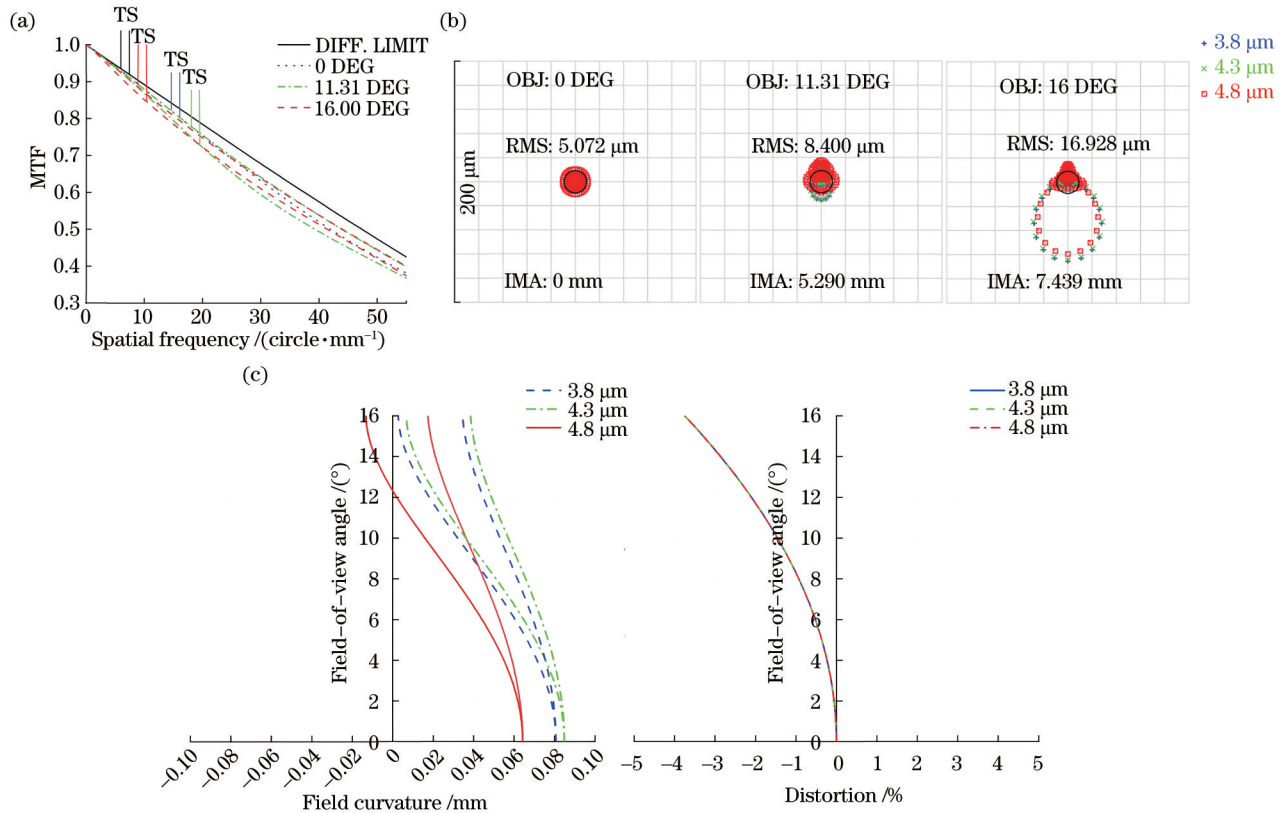


图 7 成像物镜成像特性。(a)调制传递函数曲线;(b)点列图;(c)场曲及畸变曲线。

Fig. 7 Imaging characteristics of imaging objective lens. (a) Modulation transfer function curves; (b) spot diagrams; (c) field curvature and distortion curves

镜的 MTF 曲线、点列图、场曲及畸变曲线。从图 7(a)可以看出系统在  $0^\circ$ 、 $0.7^\circ$  和全视场下的 MTF 曲线(图中 OTF 表示光学传递函数),由图可知在空间频率为 55 cycle/mm 处(对应  $1280 \times 1024$  的像元数),三个视场的 MTF 值均高于 0.3;从图 7(b)可以看出点列图均方根(RMS)半径在全视场范围内的尺寸可接受,其中 IMA 为距离像面中心的距离;从图 7(c)可以看出全视场范围内系统的场曲小于 0.1 mm,畸变小于 4.8%。红外大视场高分辨成像物镜的成像质量优异。

### 5.2 中继透镜

优化完成后的中继透镜参数如表 4 所示,可以看出系统参数达到了设计目标, $F$  数为 2.15,焦距为 18 mm,最大口径为 1.63 cm,系统长度为 73.11 mm,系统具有结构紧凑、数值孔径大等特点,其具体结构如图 8 所示。

图 9(a)~(c)分别为中继透镜的 MTF 曲线、点列图、场曲及畸变曲线。从图 9(a)可以看出系统在  $0^\circ$ 、 $0.7^\circ$  和全视场下的 MTF 曲线。由图 9(a)可知在空间频率为 41.7 cycle/mm 处(对应  $640 \times 512$  像元

表 4 中继透镜的设计结果

Table 4 Specifications of relay lens

Parameter	Value
Wavelength / $\mu\text{m}$	3.8-4.8
Pixel number	$640 \times 512$
Object plane diameter / mm	19.9
Aperture size / cm	1.63
Focal length / mm	18
$F$ number	2.15
Total length / mm	73.11

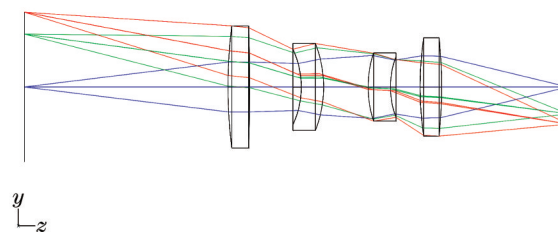


图 8 中继透镜结构图

Fig. 8 Structure of relay lens

数),三个视场的 MTF 值均高于 0.4;从图 9(b)可以看出点列图 RMS 半径在全视场范围内与衍射极限

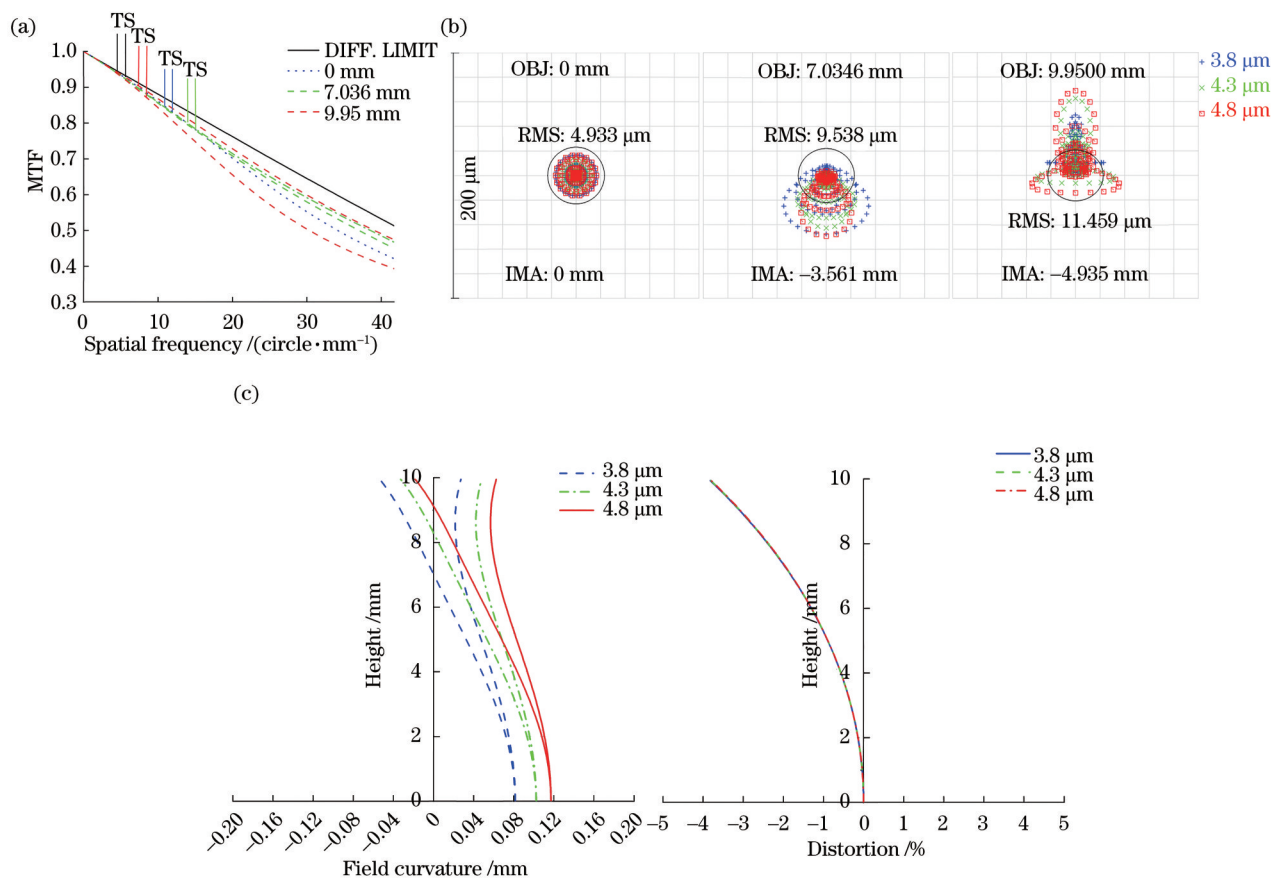


图 9 中继透镜成像特性。(a)调制传递函数曲线;(b)点列图;(c)场曲及畸变曲线。

Fig. 9 Imaging characteristics of relay lens. (a) MTF; (b) spot diagrams; (c) field curvature and distortion curves

尺寸相当;从图 9(c)可以看出全视场范围内系统的场曲小于 0.15 mm,畸变小于 4%,系统完全匹配所选的探测器阵列。

## 6 结 论

设计了一款结构简单紧凑、质量小且具有高分辨率的红外大视场高分辨成像系统,基于压缩感知技术并使用较低分辨率的探测器阵列即可重构出高分辨率图像。该光学系统由红外大视场高分辨成像物镜和中继透镜组成,成像物镜具有  $F/1.999$  的大数值孔径,全视场范围内的场曲小于 0.1 mm,畸变小于 4.8%,像元数达到  $1280 \times 1024$ ,成像质量优异。中继透镜在全视场范围内的场曲小于 0.15 mm,畸变小于 4%,像元数达到  $640 \times 512$ ,中继透镜完全匹配所选的探测器阵列。所设计的红外大视场高分辨成像系统具有成像质量优异、结构紧凑等特点,使用  $640 \times 512$  阵列探测器即可实现  $1280 \times 1024$  像元数的成像,在航空遥感探测领域具有较大的应用前景。

## 参 考 文 献

- [1] Chen L P, Hewitt M J, Gulbransen D J, et al. Overview of advances in high-performance ROIC designs for use with IRFPAs[J]. Proceedings of SPIE, 2000, 4028: 124-138.
- [2] Krishna S. 4th generation infrared detectors and focal plane arrays[C]//2015 IEEE Avionics and Vehicle Fiber-Optics and Photonics Conference (AVFOP), November 10-12, 2015, Santa Barbara, CA, USA. New York: IEEE Press, 2015: 44-45.
- [3] Rogalski A, Antoszewski J, Faraone L. Third-generation infrared photodetector arrays[J]. Journal of Applied Physics, 2009, 105(9): 091101.
- [4] Liang Q H, Jiang D Z, Chen H L, et al. Design of  $640 \times 512$  infrared ROIC based on time-sharing method[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(10): 1004001.  
梁清华, 蒋大钊, 陈洪雷, 等. 基于分时共享方案的  $640 \times 512$  红外读出电路设计[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(10): 1004001.
- [5] Wang F Q. Design of a low-power readout integrated circuit for  $640 \times 512$  IRFPAs[D]. Nanjing: Southeast University, 2018.  
王辅强.  $640 \times 512$  低功耗红外焦平面阵列读出电路设计[D]. 南京: 东南大学, 2018.
- [6] Huang C M, Lin S W, Chen J H. Efficient image stitching of continuous image sequence with image and seam selections[J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(10): 5910-5918.
- [7] Song Z L, Zhou S G, Guan J H. A novel image registration algorithm for remote sensing under affine transformation[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(8): 4895-4912.
- [8] Yang W, Liu J W, Han P L, et al. Design of an infrared zoom imaging system based on concentric spherical lens with wide FOV and high resolution[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2019, 38(6): 805-812.  
杨威, 刘佳维, 韩平丽, 等. 基于共心球透镜的大视场高分辨率红外变焦成像系统设计[J]. 红外与毫米波学报, 2019, 38(6): 805-812.
- [9] Liu F, Wei Y Z, Han P L, et al. Design of monocentric wide field-of-view and high-resolution computational imaging system[J]. Acta Physica Sinica, 2019, 68(8): 084201.  
刘飞, 魏雅喆, 韩平丽, 等. 基于共心球透镜的多尺度广域高分辨率计算成像系统设计[J]. 物理学报, 2019, 68(8): 084201.
- [10] Kutyniok G. Compressed sensing: theory and applications[EB/OL]. (2012-03-15)[2021-04-06]. <https://arxiv.org/abs/1203.3815v1>.
- [11] Antonini M, Barlaud M, Mathieu P, et al. Image coding using wavelet transform[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1992, 1(2): 205-220.
- [12] Chen H J, Asif M S, Sankaranarayanan A C, et al. FPA-CS: focal plane array-based compressive imaging in short-wave infrared[C]//2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), June 7-12, 2015, Boston, MA. New York: IEEE Press, 2015: 2358-2366.
- [13] Mahalanobis A, Shilling R, Murphy R, et al. Recent results of medium wave infrared compressive sensing [J]. Applied Optics, 2014, 53(34): 8060-8070.
- [14] Hitomi Y, Gu J W, Gupta M, et al. Video from a single coded exposure photograph using a learned over-complete dictionary[C]//2011 International Conference on Computer Vision, November 6-13, 2011, Barcelona, Spain. New York: IEEE Press, 2011: 287-294.
- [15] Li C, Yin W, Zhang Y. TVAL3: TV minimization by augmented Lagrangian and alternating direction algorithms[EB/OL]. [2021-04-06]. <https://www.caam.rice.edu/optimization/L1/TVAL3/>.
- [16] Pati Y C, Rezaiifar R, Krishnaprasad P S. Orthogonal

- matching pursuit: recursive function approximation with applications to wavelet decomposition[C]//Proceedings of 27th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, November 1-3, 1993, Pacific Grove, CA, USA. New York: IEEE Press, 1993: 40-44.
- [17] Tropp J A, Gilbert A C. Signal recovery from random measurements via orthogonal matching pursuit[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2007, 53(12): 4655-4666.
- [18] Weinberg G, Katz O. 100, 000 frames-per-second compressive imaging with a conventional rolling-shutter camera by random point-spread-function engineering [J]. Optics Express, 2020, 28(21): 30616-30625.
- [19] Liu Z, Tan S, Wu J, et al. Spectral camera based on ghost imaging via sparsity constraints[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 25718.
- [20] Liu S Y, Liu Z T, Hu C Y, et al. Spectral ghost imaging camera with super-Rayleigh modulator[J]. Optics Communications, 2020, 472: 126017.
- [21] Chatterjee B C, Sarma N, Oki E. Routing and spectrum allocation in elastic optical networks: a tutorial[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015, 17(3): 1776-1800.
- [22] Candès E J. The restricted isometry property and its implications for compressed sensing[J]. Comptes Rendus Mathématique, 2008, 346(9/10): 589-592.
- [23] Ma J W. Single-pixel remote sensing[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2009, 6(2): 199-203.
- [24] Ma J W. A single-pixel imaging system for remote sensing by two-step iterative curvelet thresholding[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2009, 6(4): 676-680.
- [25] Mei G, Zhai Y, Miao J Y, et al. Design of a high resolution and wide field space infrared optical system [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(12): 1222004. 梅贵, 翟岩, 苗健宇, 等. 空间高分辨率宽视场红外光学系统设计[J]. 光学学报, 2014, 34(12): 1222004.
- [26] Hu Y, Cui Q F, Sun L, et al. Optical-digital joint design of a dual-waveband infrared refractive-diffractive system[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(14): 1422002. 胡洋, 崔庆丰, 孙林, 等. 红外双波段衍衍混合光学-数字联合系统设计[J]. 光学学报, 2020, 40(14): 1422002.
- [27] He H X. Medium wave infrared optical system based on three group linkage continuous zoom[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(19): 190801. 何红星. 三组联动连续变焦中波红外光学系统[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(19): 190801.
- [28] Wang Y, Xu Y Y, Liu A Y, et al. Design and simulation of long-wavelength infrared microscopic imaging optical system[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(6): 0622001. 王宇, 许阳阳, 刘爱云, 等. 长波红外显微成像光学系统的设计与仿真[J]. 光学学报, 2020, 40(6): 0622001.