文章编号：1672-8785(2018)03-0001-08

高集成度四视场中波红外光学系统

何红星

（昆明物理研究所，云南 昆明　650223）

摘　要：为了实现超小型化、长焦距和超大视场，提出并设计了一种高集成度四视场中波红外光学系统。该系统采用双光路结构形式，包括超小视场光路和小/中/大视场光路，两支光路共用中继组；对超小视场光路进行了四次立体折叠，并对小/中/大视场光路进行了二次折叠。通过以上六次折叠，整个双光路光学系统的外形尺寸得到了有效约束，其外形包络在 242 mm×150 mm×85 mm（局部125 mm）范围内，系统集成度高。这种双光路光学系统包括超小视场、小视场、中视场和大视场四个视场。其中，超小视场的焦距为 688 mm，视场为0.8°；大视场的焦距为 13.19 mm，视场为 40°，实现了长焦距和超大视场并存，并获得了 50×的变倍比；超小视场光学系统仅采用 5 片透镜，透过率高，并具有光学被动消热差设计；整个双光路光学系统结构紧凑，体积小，实现了超小型化。设计结果表明，该光学系统像质良好，可以满足高性能热像仪的使用要求。

关键词：高集成度；长焦距；超大视场；超小型化；四视场中波红外光学系统

中图分类号：TN216　**文献标志码**：A　**DOI**：10.3969/j.issn.1672-8785.2018.03.001

Highly Integrated Four Field-of-View MWIR Optical System

HE Hong-xing

(*Kunming Institute of Physics*, *Kunming 650223*, *China*)

Abstract: To realize super miniature, long focal length and super wide field-of-view, a highly integrated infrared optical system with four fields of view is proposed and designed. The system adopts a double optical path structure including a super narrow field-of-view optical system and a narrow field-of-view/middle field-of-view/wide field-of-view optical system. The two optical paths share a relay group. The super narrow field-of-view optical system is folded four times in three dimensions. The narrow field-of-view/middle field-of-view/wide field-of-view optical path is folded twice. Through above six folds, the size of the optical system including two optical paths is reduced effectively. Its shape envelope is in the range of 242 mm×150 mm × 85 mm (local 125 mm). Thus, the optical system is highly integrated. This double optical path optical system has four fields of view including a super narrow field-of-view, a narrow field-of-view, a middle field-of-view and a wide field-of-view. Among them, the super narrow field-of-view has a focal length of 688 mm and a field-of-view of 0.8 degree. The large field-of-view has a focal length of 13.19 mm and a field-of-view of 40 degree, in which

收稿日期：2018-01-20

基金项目：云南省创新人才计划项目(2016HB022)

作者简介：何红星(1977-)，男，贵州盘县人，研究员级高级工程师，博士，主要从事红外光学及热像仪总体技术研究。E-mail：hxhe2000@163.com

long focal length, super large field-of-view and zoom ratio of 50 are realized. The super narrow field-of-view optical system merely uses five lenses. It has the features of high transmittance and passive optical athermalization design. The whole dual optical path optical system has compact structure and small size and realizes its super miniaturization. The design results show that the image quality of the optical system is good, which meets the requirements of thermal imagers.

Key words: highly integrated level; long focal length; super wide field-of-view; super miniature; four field-of-view MWIR optical system

0 引言

近年来，由于光电成像技术的进步，红外成像技术也取得了极大的进展。其中，多视场和连续变焦红外系统已经广泛应用于军事侦察、探测、识别以及边海防等领域。虽然连续变焦系统能够实现对目标的不间断观察，但是在光学系统的小型化、光轴稳定性、光轴平行性、成像质量以及视场切换的便捷性等方面仍不及多视场红外系统，因而机载系统中主要采用多视场红外系统。国内外就此开展了大量的研究工作，其中增加集成度、实现轻量化和小型化、提高整体性能是机载红外系统研究的热点。具体说来，前两项主要体现在光学结构方面，后一项则要求增加系统焦距。为了兼顾功能要求，光学系统还要求具有超大视场，以满足辅助导航的需要。然而在常用的单支光路中，长焦距与超大视场以及超小型化又是相互矛盾的，不易同时满足。为了克服这一困难并实现以上几个目标，人们需要寻求新的光学结构形式。

文献[1]采用分孔径技术实现了具有长焦距和大视场的三视场中波红外光学系统，但在超大视场、超小型化以及减重等方面仍存在不足。文献[2]针对机载环境的狭小空间设计了一款长焦距较短的紧凑型中波红外相机光学系统(双视场光学系统)。文献[3]通过切入/切出一组透镜构建了一种长焦距较短的双视场光学系统。文献[4]针对无人机对光学系统小型化、轻量化的需求，设计了一种四反射镜光学系统(单视场光学系统)。文献[5]采用基于双孔径的切入不同变倍组的方式实现了三视场光学系统。文献[6-8]采用了全反射式望远物镜叠加折射式物镜的光学结构形式。这些光学系统在实现高集成度、长焦距、超大视场、多视场以及超小型化等方面均存在不足。基于上述现状，本文采用双光路、超小视场光路四次立体折叠、小视场/中视场/大视场光路二次折叠、共用中继组的光学结构形式来实现四视场中波红外光学系统。这种结构形式能够极大地减小光学系统的体积和提高整体集成度，以实现光学系统的超小型化和轻量化，同时实现超大视场，以满足飞机辅助导航的需求。设计结果表明，本文实现了 688 mm 长焦距、40°超大视场、高集成度、超小型化的四视场中波红外光学系统。

1 系统要求及设计方案

1.1 技术参数

表 1 列出了根据高性能热像仪的技术要求而设定的光学系统参数。

表 1 光学系统参数

项目	数值
工作波段	3.6～4.9 μm
视场	超小视场(SNFOV)：0.8°×0.64° 小视场(NFOV)：3.2°×2.56° 中视场(MFOV)：9.6°×7.68° 大视场(WFOV)：40°×32°
F 数	*F*/5.5
探测器	640×512 元中波红外焦平面阵列 像元大小：15 μm×15 μm
外形包络	250 mm×155 mm×90 mm（局部 128 mm）

1.2 设计方案

图 1 所示为双光路四视场光学系统的结构

形式及设计方案，其中包括超小视场光路和小视场/中视场/大视场光路。

光学系统四个视场的切换包含光路切换和视场切换。通常多视场光学系统的视场切换方式可以分为径向切入/切出镜组和轴向移动镜组两种方式。前者通过用不同镜组切入/切出光路来实现视场切换，后者则通过轴向移动不同镜组实现视场切换。双光路四视场光学系统综合应用切入/切出和轴向移动两种方式来实现视场切换。采用反射镜 M_5 切入超小视场光路，对超小视场物镜光路进行遮挡并接入小/中/大视场光学系统的物镜光路，从而实现小/中/大视场光学系统；将反射镜 M_5 切出超小视场光路且不遮挡超小视场光学系统的物镜光路，从而实现超小视场光学系统；对于小视场至大视场之间的切换，根据光学补偿原理，通过轴向移动固定连接的变倍镜组 T_{11} 和补偿镜组 T_8、T_9 来实现；如此循环，即可实现超小视场、小视场、中视场、大视场之间的视场切换以及超小视场与小/中/大视场之间的光路切换。在视场切换过程中，超小视场光路与小/中/大视场光路共用中继组。

超小视场光路采用二次成像方式，可同时控制入瞳与大物镜的匹配、出瞳与探测器冷光阑的匹配，进而为控制光学系统的外形尺寸奠定基础。如图 1 所示，超小视场光路结构包括透镜 T_1～T_5 和反射镜 M_1～M_4；小/中/大视场光路采用光学补偿以及三次成像方式，可同时控制入瞳和出瞳以及各组透镜的位置与口径，并将光路拉长以满足折叠需要；小/中/大视场光路结构包括透镜 T_4～T_{12} 和反射镜 M_5、M_6；两支光路共用中继透镜组 T_4、T_5 以及探测器。超小视场与小视场/中视场/大视场之间的切换通过切入切出反射镜 M_5 完成。对于小视场/中视场/大视场光路，小视场至大视场之间的切换采用光学补偿方式，通过轴向移动固定连接的透镜 T_8、T_9、T_{11} 来实现。位于 P_1 位置时为大视场；位于 P_2 位置时为小视场；在 P_1 和 P_2 之间时为中视场。采用反射镜 M_1～M_4 对超小视场光路进行四次立体折叠；采用反射镜 M_5 和 M_6 对小/中/大视场光路进行二次折叠；控制光学系统的外形包络尽量小，并保证光路恰好不被干涉和遮挡。通过采用双光路、超小视场光路四次立体折叠、小视场/中视场/大视场光路二次折叠、共用中继组的结构形式，可以同时控制超小视场光路中前三块大物镜的口径和小/中/大视场光路中大物镜的口径、两支光路的外形尺寸、像差以及其他性能指标。

光学系统的集成设计包括结构集成和功能集成。前者主要通过两支光路光学系统的独立设计和合并设计来满足性能与外形要求。后者

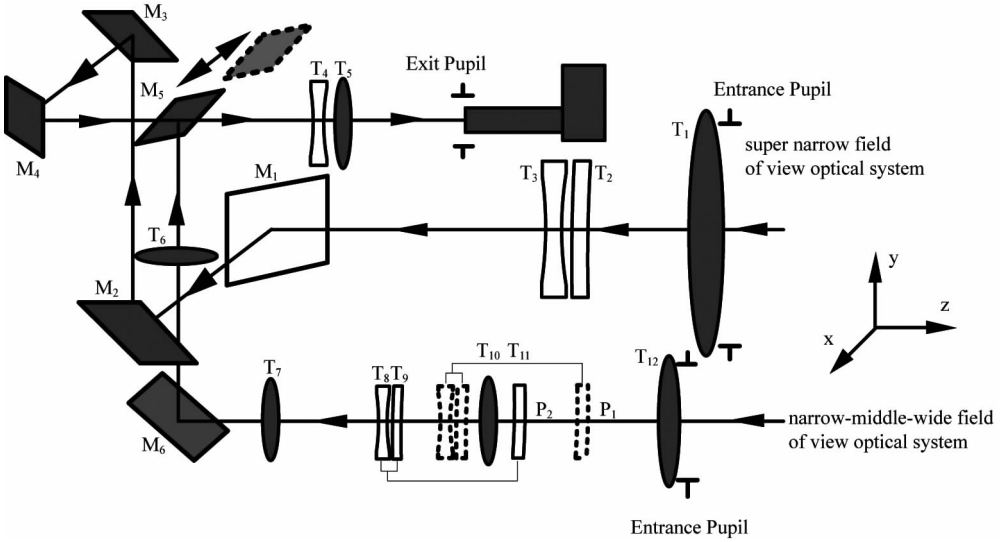


图 1　双光路四视场中波红外光学系统的结构图

主要是指对四个视场功能的集成，其中超小视场用于观察瞄准目标，小视场和中视场主要用于搜索观察目标，大视场主要用于飞机导航。总的看来，功能集成需要依靠结构集成来实现，结构集成又可体现功能要求。

2 设计结果与分析

2.1 外形尺寸计算

光学系统的外形尺寸主要由超小视场光路决定。在超小视场光路的基础上叠加小/中/大视场光路，使光学系统的外形尺寸满足指标要求。超小视场为 0.8°×0.64°，探测器焦面大小为 9.6 mm×7.68 mm，焦距为 $f'=(9.6/2)/\tan(0.8°/2)=687.5$ mm。

超小视场光学系统采用摄远物镜叠加中继组的二次成像方式。其光焦度主要由物镜承担，倒像和校正像差则由中继组完成。该光学系统的长度为 $L=L_1+L_2=372.3+62.7=435$ mm。经过四次折叠后，其三维尺寸为 220 mm×95 mm×55 mm（局部 125 mm）。

小/中/大视场光学系统通过三次成像将系统拉长以满足折叠需要，其物镜后的两个中继组用于实现倒像和校正像差。该光学系统的长度为 $L'=L_1'+L_2'+L_3'=121+121.3+62.7=305$ mm。经过二次折叠后，其三维尺寸为 175 mm×50 mm×63 mm。

2.2 镜头设计

基于外形尺寸计算结果以及上述方案对光学系统进行设计。设计过程包括超小视场光路和小/中/大视场光路的独立设计以及两支光路的集成设计。先独立设计两支光路，保持超小视场光路的中继组不变，然后通过集成设计使整个光学系统的光学性能、外形包络、重量等指标满足要求。若双光路光学系统的结构外形包络无法满足指标要求，则返回光学系统的初始参数并重新设计，直至满足性能指标和外形包络为止。

图 2 所示为光学系统的三维设计结果。其中，超小视场光路包括 5 片透镜，能量利用率高；小/中/大视场光路包括 9 片透镜；两支光路共用中继组 T_4～T_5 透镜以及探测器。该光学系统的四个视场所对应的焦距设计值分别为 688.12 mm、171.84 mm、57.16 mm 和 13.19 mm，视场值分别为 0.8°×0.64°、3.2°×2.56°、9.6°×7.68°和 40°×32°。其中，超小视场的焦距为 688 mm，视场为 0.8°；大视场的焦距为 13.19 mm，视场为 40°。结果表明，该设计兼具长焦距和超大视场，且光学系统的变倍比达到 50×。

由于超小视场光路为独立光路，我们对其进行了光学被动消热差设计。在－40℃～＋70℃范围内，超小视场光学系统通过材料及透镜参数搭配实现了消热差，且其焦距值的变化

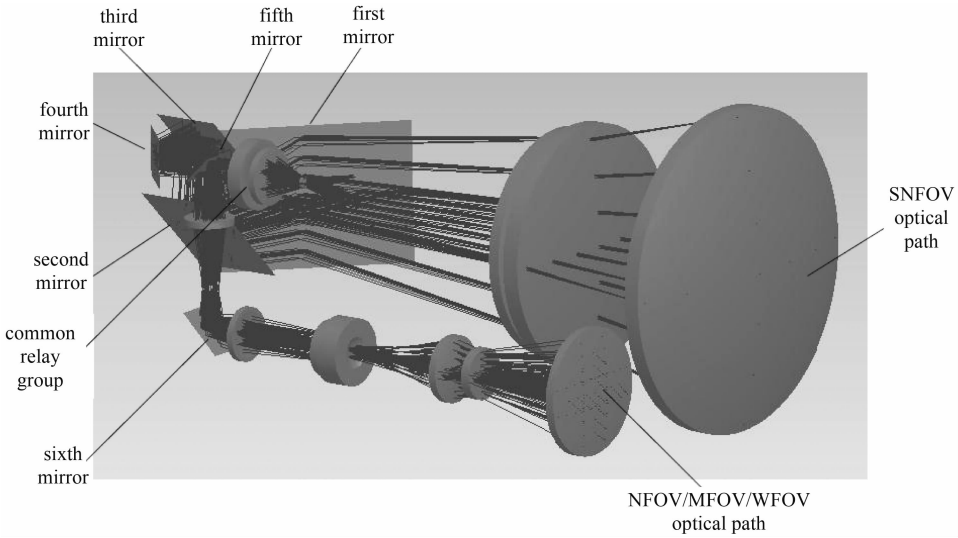


图 2 双光路四视场中波红外光学系统的三维图

范围为 674.86～697.68 mm，焦距变化量为-1.9%～+1.4%。由于超小视场光学系统实现了光学被动消热差，所以可保证超小视场光轴的稳定性。

整个光学系统只有两组运动机构，包括超小视场光路与小/中/大视场光路之间的切换机构和小/中/大视场之间的视场切换机构。由于透镜口径和反射镜口径大大减小，整个光学系统实现了极大的轻量化。四个视场依据需要进行切换以满足不同的功能：超小视场用于观察瞄准目标，小视场和中视场主要用于搜索观察目标，大视场主要用于飞机的辅助导航，由此实现了当前观察型和导航型两种热像仪的功能。两支光路可以分别调试，较好地保证了四个视场的光轴平行性和成像质量。对超小视场光路进行了四次立体折叠，并对小/中/大视场光路进行了二次折叠。通过以上六次折叠，可以有效地约束光学系统的外形尺寸。其外形包络在 242 mm×150 mm×85 mm（局部125 mm）范围内。结果表明，该系统结构紧凑、重量轻，实现了高度集成化和超小型化。

非球面参数公式为

$$z=\frac{c_0Y^2}{1+\sqrt{1-(1+K)c_0^2Y^2}}+AY^4+BY^6+CY^8+DY^{10} \quad (1)$$

式中，$c_0=1/R_0$；$K=0$。

表 2 列出了超小视场光路光学系统的设计结果。其中，非球面参数如下：EVENASPH4：$A=8.8695384e-008$，$B=-7.8990144e-012$，$C=2.7931732e-015$，$D=0$；EVENASPH 12：$A=-8.2298488e-005$，$B=-4.9955886e-008$，$C=D=0$；EVENASPH 13：$A=-7.0134648e-005$，$B=6.8184893e-008$，$C=D=0$。

表 3 列出了小/中/大视场光路光学系统的设计结果。其中，* 代表小/中/大视场的透镜间隔。非球面参数如下：EVENASPH 4：$A=-1.9265732e-006$，$B=2.6403532e-010$；EVENASPH 9：$A=-2.2476657e-006$，$B=$

表 2 超小视场光路的透镜参数

Surf	Type	Radius	Thickness	Glass
STO	STANDARD	164.86	10.5	SILICON
2	STANDARD	222.93	72.48	
3	STANDARD	254.19	4.61	GERMANIUM
4	EVENASPH	153.92	4.41	
5	STANDARD	162.88	7.13	AMTIR3
6	STANDARD	343.75	119.86	
7	STANDARD	Infinity	60	MIRROR
8	STANDARD	Infinity	30	MIRROR
9	STANDARD	Infinity	35	MIRROR
10	STANDARD	Infinity	45	MIRROR
11	STANDARD	-38.28	3.01	ZNS_BROAD
12	EVENASPH	26.25	2.2	
13	EVENASPH	25.80	5.60	SILICON
14	STANDARD	-71.02	37.30	

表 3 小/中/大视场光路的透镜参数

Surf	Type	Radius	Thickness	Glass
1	STANDARD	135.54	6	SILICON
2	STANDARD	315.38	54/38.99/15.15*	
3	STANDARD	-880.7	3	GERMANIUM
4	EVENASPH	68.05	9/24.01/47.85*	
5	STANDARD	52.86	4.03	SILICON
6	STANDARD	-1100	47.85/32.83/9*	
7	STANDARD	-9.15	3	ZNS_BROAD
8	STANDARD	-53.94	1.13	
9	EVENASPH	-52.06	5.91	SILICON
10	STANDARD	-19.82	23.2/38.2/62.1*	
11	EVENASPH	-25.03	3.52	SILICON
12	STANDARD	-21.10	15	
13	STANDARD	Infinity	40	MIRROR
14	STANDARD	-60.80	3.34	SILICON
15	STANDARD	-1300	15	
16	STANDARD	Infinity	25	MIRROR
17	STANDARD	-38.28	3.01	ZNS_BROAD
18	EVENASPH	26.25	2.20	
19	EVENASPH	25.80	5.60	SILICON
20	STANDARD	-71.02	37.30	

−5.1154694e−008；EVENASPH 11：$A=-1.0229273e-005$，$B=-1.0604692e-008$；EVENASPH 18：$A=-8.2298488e-005$，$B=-4.9955886e-008$；EVENASPH 19：$A=-7.0134648e-005$，$B=6.8184893e-008$；$C=D=0$。

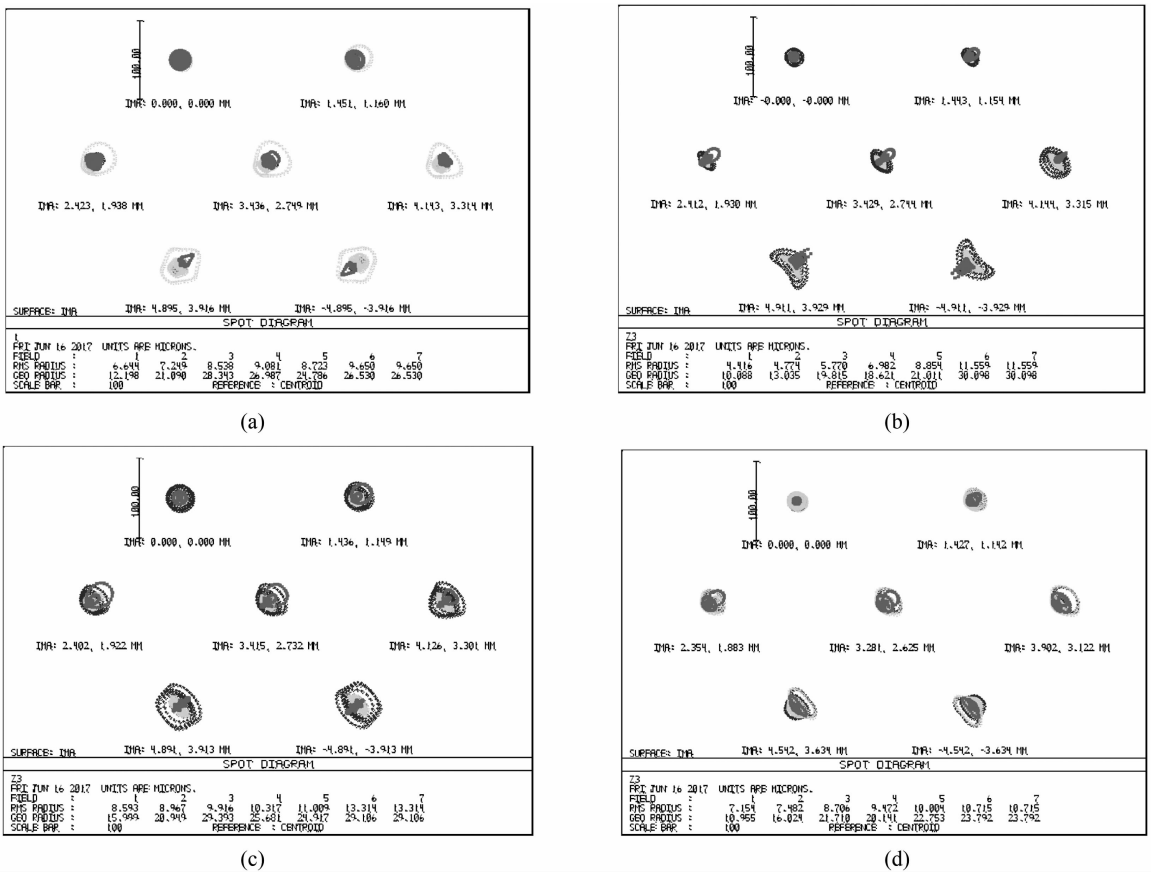
2.3 像质评价

采用点列图和调制传递函数(Modulation Transfer Function，MTF)对光学系统的成像质量进行评价。图 3 为常温条件下光学系统的点列图。其中，图 3(a)为超小视场光学系统的点列图，图 3(b)为小视场光学系统的点列图，图 3(c)为中视场光学系统的点列图，图 3(d)为大视场光学系统的点列图。其均方根弥散斑半径的最大值均小于探测器的像元大小，80%以上的能量都落在探测器像元之内，成像质量较好。

图 4、图 5 和图 6 所示分别为常温(20℃)、低温(−40℃)和高温(+70℃)下光学系统的 MTF。其中，(a)图为超小视场光学系统的 MTF；(b)图为小视场光学系统的 MTF；(c)图为中视场光学系统的 MTF；(d)图为大视场光学系统的 MTF。可以看出，在16.67 lp/mm特征频率处，光学系统的 MTF 值大于 45%，接近衍射限，表明系统性能较好。

3 实验测试

由于该光学系统多次折叠，无法利用现有设备对其 MTF 进行测试，所以使用装有该光学系统的热像仪进行了以下测试：(1)最小可分辨温差(Minimum Resolvable Temperature Difference，MRTD)测试。结果表明，MRTD(3.82 cyc/mrad)=0.06 K，MRTD(7.64 cyc/mrad)=0.13 K，MRTD(11.47 cyc/mrad)=0.21 K，MRTD(17.2 cyc/mrad)=0.56 K，



(a) (b) (c) (d)

图 3 光学系统的点列图

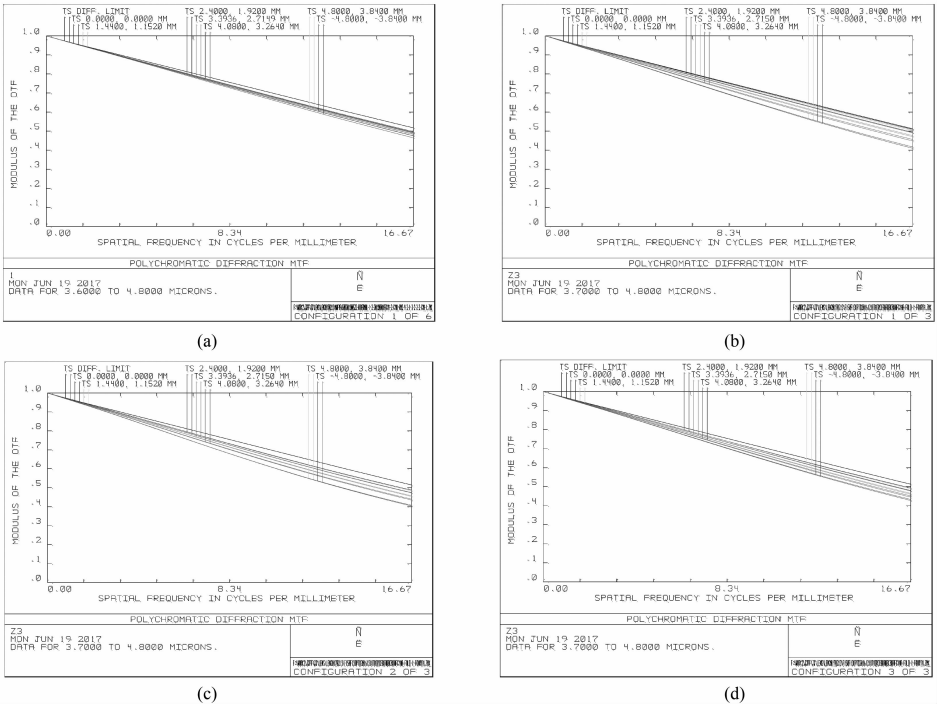


图 4 常温下光学系统的 MTF

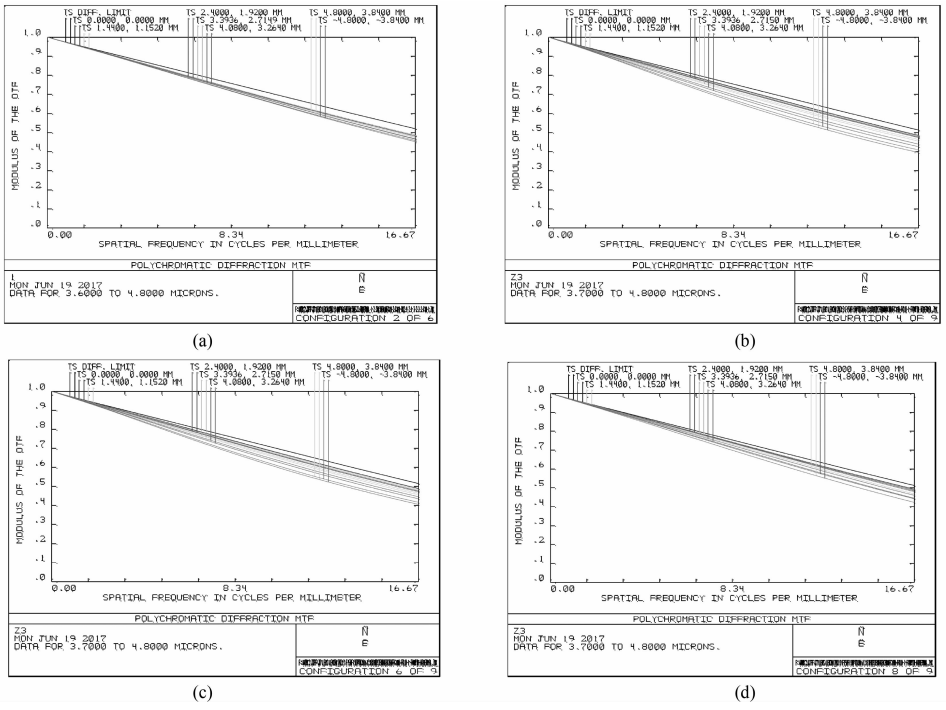


图 5 −40℃下光学系统的 MTF

MRTD (22.93 cyc/mrad)＝1.12 K。(2)光轴稳定性和光轴平行性测试。冲击振动和高低温环境试验结果表明，超小视场光轴稳定性的误差为 0.03 mrad，超小视场光轴(瞄准轴)稳定；视场转换光轴平行性的误差如下：大视场/中视场为 2.5 mrad、中视场/小视场为0.3 mrad、小视场/超小视场为 0.1 mrad。(3)作用距离测试。使用装有该光学系统的热像仪对 2.3 m×

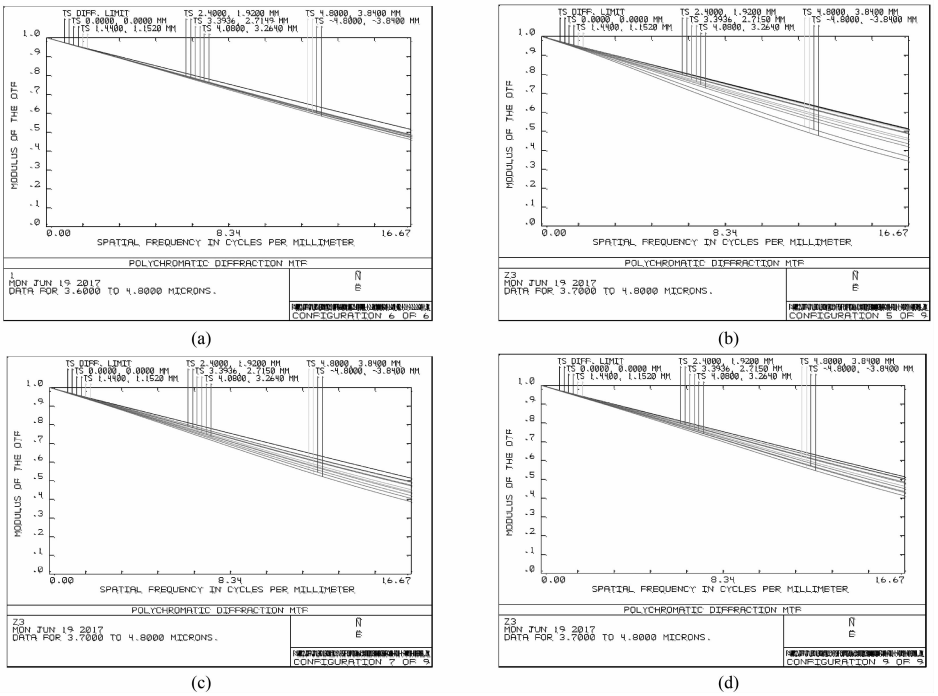


图 6 +70℃下光学系统的 MTF

2.3 m 大小的目标进行了作用距离测试，其识别距离为 13.2 km。从测试结果来看，该光学系统能够满足高性能热像仪的要求。

4 结束语

本文设计的高性能小型化四视场中波红外光学系统采用双光路、超小视场光路四次立体折叠、小视场/中视场/大视场光路二次折叠、共用中继组的结构形式，实现了高度集成化。该系统包括超小视场光路和小视场/中视场/大视场光路，两支光路共用中继组和探测器；对超小视场光路进行了四次立体折叠，并对小视场/中视场/大视场光路进行了二次折叠。通过以上六次折叠，可以有效地控制光学系统的外形尺寸。其外形包络在 242 mm×150 mm×85 mm (局部 125 mm)范围内。由于系统紧凑、重量轻，不仅实现了超小型化，而且还兼具了长焦距和超大视场，其变倍比达到 50×。设计结果表明，该光学系统像质优良。相关测试结果满足高性能机载热像仪的使用要求，因此本文设计是超小型化、长焦距、超大视场中波红外光学系统的一种较好的技术方案。

参考文献

[1] 何红星. 分孔径三视场中波红外光学系统 [J]. **光学精密工程**, 2017, **25**(7): 1757-1763.

[2] 徐新行, 陈宁, 王兵, 等. 机载紧凑型中波红外相机的设计 [J]. **中国激光**, 2014, **41**(8): 0816002.

[3] 曲贺盟, 张新. 高速切换紧凑型双视场无热化红外光学系统设计 [J]. **中国光学**, 2014, **7**(4): 622-629.

[4] 陈建发, 王合龙, 刘欣, 等. 紧凑型四反射镜光学系统设计 [J]. **电光与控制**, 2012, **19**(12): 76-79.

[5] 赵坤, 李升辉. 双孔径红外变焦光学系统设计 [J]. **红外与激光工程**, 2013, **42**(11): 2889-2893.

[6] 王合龙, 陈建发. 双波段双视场折反式光学系统无热化设计 [J]. **激光与光电子学进展**, 2013, **50**: 112201.

[7] Jay Vizgaitis. Third Generation Infrared Optics [C]. *SPIE*, 2008, **6940**: 69400S.

[8] Jay Vizgaitis, Jason Miller, John Hall, et al. 3rd Generation FLIR Demonstrator [C]. *SPIE*, 2008, **6940**: 69400U.