

## 多孔径分布式视场部分重叠仿生热成像理论与技术

罗琳, 杨建国, 裘溯\*, 金伟其, 李力

(北京理工大学光电学院光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081)

**摘要:** 热成像系统视场与空间分辨率(作用距离)的矛盾是常规成像模式难以解决的问题。多孔径热成像技术主要分为低重叠率、高重叠率和中度重叠率部分重叠成像模式。文中研究了一种视场部分重叠仿生热成像理论,利用 4 组红外物镜及 IRFPA 机芯构成了中心变分辨率 4 孔径分布式热成像系统,各子孔径的“并集”视场构成系统成像大视场,“交集”视场特别是中心重叠视场具有超分辨率能力,从而构成空间变分辨率视觉模式,可减缓传统单孔径热成像问题;利用重叠视场可构成 4 目和 2 目近场目标场景的立体成像;通过子孔径检偏偏振片,中心视场可构成全偏振热成像模式;对角探测器分别采用长波或中波红外焦平面探测器,则可构成双色热成像模式。分析表明:这种多孔径分布式视场部分重叠仿生热成像具有仿生智能的特性,可针对感兴趣目标进行智能观测,提高复杂背景条件下的目标探测和识别能力,具有广泛的应用前景。

**关键词:** 分布式多孔径; 热成像; 视场重叠; 仿生智能成像; 空间变分辨率

**中图分类号:** TH703; TP391 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20210062

## Theory and technology of bionic thermal imaging with multi-aperture distributed and partially overlapped field of view

Luo Lin, Yang Jianguo, Qiu Su\*, Jin Weiqi, Li Li

(MOE Key Laboratory of Optoelectronic Imaging Technology and System, School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** The contradiction between the field of view (FOV) and the spatial resolution (operating range) of the thermal imaging system is difficult to solve in the conventional imaging mode. Multi-aperture imaging technology is mainly divided into low overlapping rate, high overlapping rate and moderate partial overlapping imaging mode. In this paper, a theory of partially overlapped FOV bionic thermal imaging was studied. Four sets of infrared objective lens and infrared IRFPA cores were used to form a 4-aperture distributed thermal imaging system with central variable resolution. The "union" FOV of each sub-aperture constituted a large FOV for the system, and the "intersection" FOV of each sub-aperture, especially the central overlapped FOV, had super-resolution capability, thus forming a spatially variable resolution visual mode, which could alleviate the traditional single aperture thermal imaging problem. The overlapped field of view could be used to construct 4-eye and 2-eye stereo imaging for near-field target scene. Through polarizers on the sub-apertures, the central FOV

收稿日期:2021-01-24; 修订日期:2021-04-12

基金项目:国家自然科学基金面上项目(61871034);装备预研航天科工联合基金(6141B07090112);装备预研兵器工业联合基金(6141B012873)

作者简介:罗琳,女,博士生,主要研究方向为光电成像与检测、光电图像处理技术。

通讯作者:裘溯,男,讲师,硕士生导师,博士,主要从事微光与红外技术、数字图像处理等方面的研究。

导师简介:金伟其,男,教授,博士生导师,主要从事夜视与红外技术、光电图像处理、光电检测与仪器等方面的研究。

could form a fully polarized thermal imaging mode. The detectors on the diagonal with LW or MW infrared focal plane detectors respectively could form a dual-color thermal imaging mode. Theoretical analysis shows that this bionic thermal imaging system with multi-aperture distributed and partially overlapped FOV has the characteristics of bionic intelligence, which can intelligently observe the interested targets, improve the target detection and recognition capabilities in complex background conditions and has extensive application prospects.

**Key words:** distributed multi-aperture; thermal imaging; overlapped field of view; bionic intelligent imaging; spatially variable resolution

## 0 引言

常规的光电成像系统大多为单目成像模式,有限的探测器阵列在视场内均匀分布,造成成像视场与分辨率的相互限制,特别是目前 IRFPA 相对可见光成像探测器的规模小得多<sup>[1]</sup>,系统作用距离与成像视场的矛盾更为突出。此外,单目视觉欠缺运动目标空间定位、快速跟踪和偏振探测识别等智能特征。因此,新型多孔径分布式仿生热成像视觉成为人们关注的技术途径。

按照子孔径视场重叠程度,仿生复眼成像模式大致可分为 3 类:

(1) 低重叠率成像模式:主要完成大视场警戒搜索任务,典型研究有美国 DARPA 启动的大覆盖范围光学边搜索边跟踪和攻击 (LACOSTE) 项目<sup>[2-3]</sup>,能实现宽瞬时观察视场(近 90°锥角),在大覆盖范围(大约 500 km<sup>2</sup>)内实现高分辨率;Northrop Grumman 公司为美国联合攻击战斗机 F-35 开发的多功能红外分布孔径系统 (MIDAS)-(DAS) AN/AAQ-37<sup>[4-5]</sup>,采用 6 个覆盖 60°×60°视场小拱形红外传感器,探测器阵列 1000×1000 Pixel;美国海军新一代海军舰载红外搜索与跟踪系统的分布孔径传感器<sup>[6]</sup>,包括 3 个 5:1 方位比的中波红外焦平面阵列 (2560×512) 和 2.56:1 方位比的非对称光学系统的全凝视传感器,总的非对称比为 12.8:1。英国 Qineti Q 公司、Thales 光电公司和 Thales 光学公司为英国海军研制的多孔径中波红外搜索与跟踪系统演示验证样机<sup>[6]</sup>。

(2) 高重叠率成像模式:主要实现高分辨/超分辨成像,典型的研究有:2000 年日本 Jun Tanida 等提出的基于蜻蜓复眼结构的 TOMBO 复眼成像系统<sup>[7-8]</sup>,所有通道几乎同时观察目标的同一部分,对每个通道的低分辨率图像,最后通过超分辨率图像复原等方法实现目标像的超分辨重建;2007 年英国 BAE 系统公

司提出一种实用的仿昆虫复眼成像系统<sup>[9]</sup>—微型多孔径复眼摄像组件,120°大视场清晰图像,且由空间部分重叠区域可实现双目/多目视觉的距离判断,快速地获得距离信息;2012 年瑞士联邦理工学院研制出全景相机<sup>[10]</sup>,相机由 100 个镜头和独立的 CMOS 成像传感器组成,分布在 13 cm 的半径上,可获得分辨率为 1024×256 的全景图像;2013 年伊利诺大学 John Rogers 等受蜜蜂和苍蝇复眼结构的启发,设计的“复眼”数码相机<sup>[11]</sup>,相机半球状排列了 180 个显微透镜,具有 160°视野,这种复眼相机的分辨率相当于火蚁或者树皮甲虫,可用于一些特殊行业以及科学研究领域;2006 年杜克大学 D. J. Brady<sup>[12-13]</sup>等研究的超薄多孔径 (3×3) 红外成像系统,合成图像的分辨率相当于焦距 5.7 mm,总长度 26 mm 的传统红外成像系统图像质量;2013 年格拉斯哥大学 G Carlesp<sup>[14]</sup>等设计出的 3×3 多孔径复眼红外成像系统,每个低分辨率图像像素为 213×213 像素,重建图像类似于 639×639 像素的探测器分辨率;2017 年格拉斯哥大学 Andrew R. Harvey<sup>[15]</sup>等研究了多相机热成像系统,使用标准倾斜边缘方法得到系统空间频率响应进而由超分辨率增强了图像质量。

(3) 中度视场重叠成像模式:目前对此类成像模式的研究较少,笔者所在团队关注到此模式可实现多种仿生复眼特性,从 2012 年开始基于微端面光纤面板的多孔径可见光仿生复眼成像理论和方法研究<sup>[16]</sup>,设计了切角 40°和 20°的微端面光锥/光纤面板,搭建了基于单个成像传感器的 9 眼视场部分重叠仿生复眼成像实验系统,实现了 9 复眼成像及大视场图像拼接,并可实现多种仿生复眼特性。

为实现类似的仿生复眼热成像模式,借鉴了中度视场重叠可见光成像的效果,研究提出了多孔径分布式仿生复眼热成像模式<sup>[17-19]</sup>,文中主要介绍相应的成像原理,分析可实现的仿生复眼热成像功能及特点。

# 1 多孔径分布式视场部分重叠仿生热成像原理

多孔径仿生热成像技术是当前迅速发展的新型成像模式,可望解决或减缓传统单孔径热成像的诸多问题:(1)大视场与高分辨率的矛盾;(2)衍射限系统的小型化问题;(3)单孔径成像未发挥光学并行处理;(4)成像过程丢失景物三维信息问题;(5)缺乏生物视觉对运动物体的自身检测、跟踪和判断能力。因此,笔者所在团队力图在这些方面有所进展。

## 1.1 仿生复眼的子眼视场重叠率

视场重叠率描述仿生复眼相邻子眼之间视场区域的重叠程度。对于子眼视场相同的情况,视场重叠率对各子眼是相同的,但不排除在一些特殊的仿生复眼中采用不同子眼视场设计。

如图 1 所示,文中采用相同子眼视场的设计,且视场重叠沿水平和垂直方向进行,按照重叠程度大致分为高、中和低三种模式。其中低重叠率侧重于大视场成像,考虑到视场拼接的冗余,低重叠率需要一定的视场重叠;高重叠率侧重于视场重叠区域的高分辨或超分辨成像,因为子眼探测器的空间布局可能存在一些错位,在多子眼相邻条件下难以达到 100% 的视场重叠。中视场重叠是介于高和低视场重叠的一个视场重叠范围,其侧重点同时包含重叠与非重叠视场区域。

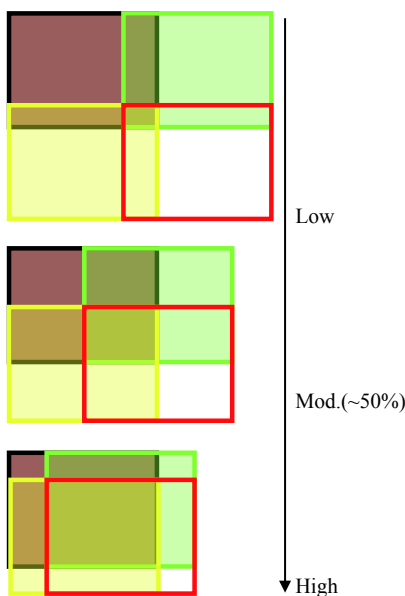


图 1 视场重叠率的变化

Fig.1 Variation of FOV overlapping rate

## 1.2 仿生热成像原理

笔者所在团队设计的多孔径分布式视场部分重叠仿生热成像采用视轴具有一定倾斜的 4 个子孔径热成像分布排列,子孔径的各子视场之间具有部分重叠区域,构成如图 2 所示的 4 孔径分布式视场部分重叠热成像模式。

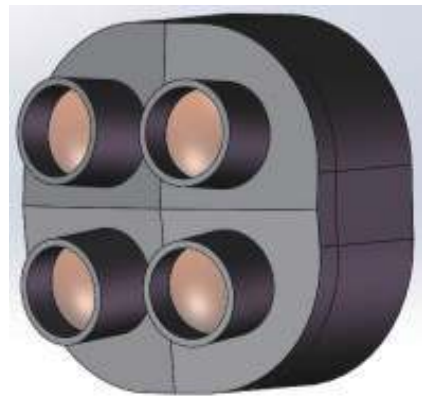


图 2 4 孔径分布式视场部分重叠系统

Fig.2 4-aperture distributed system with partially-overlapped-FOV

图 3 给出了视场重叠率 50% 时的视场重叠及分布示意图。整个大视场分为了中心、上下左右和对角等 3 类共 9 个分视场。中心视场重叠数为 4,上下左右视场重叠数为 2,对角视场重叠数为 1,从而衍生出不同的智能视觉模式和特色。



图 3 4 孔径视场重叠示意

Fig.3 Illustration of 4-aperture overlapped FOV

## 1.3 4 孔径分布式仿生热成像实验系统

按照以上基本思想,笔者所在团队研制了一个 4 孔径分布式仿生热成像实验系统,采用浙江红相科技有限公司非晶硅非制冷 IRFPA 组件 TC790 (见图 4, 640×480, 17 μm, NETD=60 mK, 帧频 50 Hz, CL 数字视频输出)+红外物镜(焦距 19 mm, F=1),数

字视频图像处理板采用自研制的 FPGA 处理板 (见 图 5, 4 路 CL 数字视频输入, 2 路 CL 数字视频输出), 按照 图 2 设计多孔径热成像组件支架 (其中为后续研究微位移成像方法, 在每个组件支架上均连接二维微位移调控台, 故体积略显大, 若去除位移平台, 则孔径不超过  $\phi 180$  mm), 构成视场部分重叠的多孔径变空间分辨率热成像实验系统如图 6 所示。

按照 IRFPA 组件及红外物镜厂家资料, 对于 19 mm 焦距红外物镜, 系统成像视场  $32^{\circ} \times 24^{\circ}$ , 对



图 4 非制冷 IRFPA 组件 TC790

Fig.4 Uncooled IRFPA module TC790



图 5 数字视频 FPGA 处理板

Fig.5 Digital video processing board with FPGA



图 6 4 孔径分布式仿生热成像实验系统

Fig.6 4-aperture distributed bionic imaging test system

人 ( $1.8 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ ) 的探测距离约 640 m, 识别距离约 160 m; 对车辆 ( $2.3 \text{ m} \times 2.3 \text{ m}$ ) 的探测距离约 1 950 m, 识别距离约 500 m。构成多孔径视场部分重叠热成像系统后, 系统成像视场  $48^{\circ} \times 36^{\circ}$ , 其中中心视场约  $16^{\circ} \times 12^{\circ}$ , 通过变空间分辨率图像处理, 中心视场预期探测/识别距离可提高到 120%。

## 2 多孔径分布式视场部分重叠仿生热成像的智能成像模式

在以上实验系统基础上, 通过适当的硬件添置和处理算法, 可以实现诸多仿生复眼的特色成像模式和智能处理功能。

### 2.1 变空间分辨率成像模式

#### 2.1.1 大视场与高分辨

如图 7 所示, 将 4 个子孔径的“并集”视场进行视场拼接, 可构成系统成像大视场, 获得了比单个子孔径更大的成像视场。同时 4 个子孔径的“交集”视场构成系统的重叠视场区域, 由于子孔径之间难免存在亚像素微位移 (实验系统中可利用微位移平台作调整), 在中心视场区域可利用 4 个子视场重叠区域图像进行亚像元和超分辨图像重构。同理, 上下左右视场区域可构成一维亚像元或超分辨成像, 一维线性插值; 四角视场区域则可采用二维插值放大图像。由此可构成类似人眼视轴中心高分辨, 周边大视场搜索的成像模式。这是复眼成像的特色模式, 可用于多种应用。

2-D interp-imaging	H-High-Res. /V-interp.	2-D interp-imaging
V-High-Res. /H-interp.	2-D High/Super Res. Imaging	V-High-Res. /H-interp.
2-D interp-imaging	H-High-Res. /V-interp.	2-D interp-imaging

图 7 高分辨成像的实现

Fig.7 Realization of high resolution imaging

#### 2.1.2 立体视觉

分布式多孔径视场部分重叠仿生热成像的中心视场区域构成视轴偏离的 4 目立体视觉, 其近场 3D

成像效果优于双目立体视觉,即利用双孔径或 4 孔径子视场重叠图像信息重构出目标的三维空间信息,弥补传统光学系统对深度信息丢失的缺陷,实现空间目标的测距和空间定位。这也是仿生复眼的特色成像模式,可用于近程引信、紧凑型立体视觉系统等。

2.1.3 运动目标快速检测

如图 8 所示,当目标具有运动特性时,即目标角度、位置、距离、方向发生变化,其在各子孔径视场中的映射信息也将发生变化。当目标沿一定轨迹运动时,在不同子视场中出现和消失的顺序将具有一定的规律性。根据目标在不同子视场中出现和消失的顺序,通过对复眼成像的人工智能图像处理,可形成对目标运动方向、位置的快速判断和锁定,实现目标的智能跟踪。这是仿生复眼的特色智能处理功能。

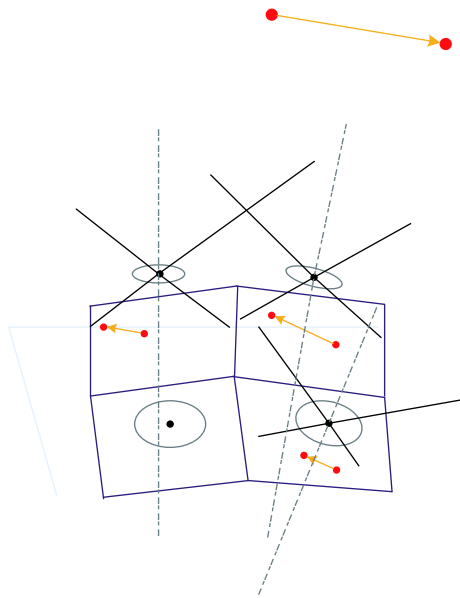


图 8 目标运动时其在子孔径视场中的运动

Fig.8 Displacement of the target in the subaperture FOV during its movement

2.2 多孔径偏振热成像模式

不同子孔径获取不同偏振方向的场景信息,可构成多孔径偏振热成像模式。通常为了获得完整的场景偏振信息,需要三四个偏振方向相差一定角度的检偏图像。偏振信息在导航以及目标识别方面具有独特的优势,也是一些典型昆虫复眼的重要特征。

如图 9 所示的 1 种偏振成像模式,设计其中 1 个子孔径无偏,另外 3 个子孔径偏振方向相差 60°,则在

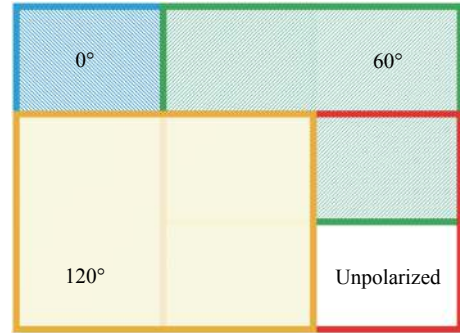


图 9 偏振方向与偏振成像

Fig.9 Polarization direction and polarization imaging

中心视场可解出完整的目标场景偏振度和偏振角图像;而在其他视场区域,可部分解出目标场景的偏振图像。

2.3 多孔径双波段热成像模式

在不同子孔径设置不同波段的探测器场可构成多孔径多波段热成像模式,通常,可设置为短波、中波及长波红外波段。通过不同波段信息的互补以及相互印证,获得更丰富准确的场景和目标信息,增强对场景理解。这是仿生复眼的特色智能处理功能。

目前非制冷 IRFPA 的响应波段已拓展到 3~14 μm,并在 3~5 μm 的中波红外波段也有较好的成像质量(见图 10),因此,在实验系统的两个对角孔径上分别设置中波和长波 IRFPA 探测器,可在中心视场构成双波段、立体高分辨的热成像模式,在上下左右视场则为双波段热成像模式,通过双波段红外图像融合处理,增加场景的多波段信息及目标探测和识别的能力。



图 10 中波红外非制冷成像的图像

Fig.10 Image of MW uncooled infrared imaging

3 4 孔径分布式仿生热成像的大视场成像

3.1 图像输出和成像特点

在 4 孔径视场部分重叠热成像系统中,各子孔径

的光轴呈发散状态,上下左右探测器的视场存在约 50% 的重叠率,各子孔径图像对应的空间点表现为中心对称,且在视场重叠区域目标位置的变化总存在探测器成像位置的差异。

经测试可得 4 孔径分布式仿生热成像实验系统实际的总视场大小为  $48.0^\circ \times 36.5^\circ$ ,中心视场为  $15.9^\circ \times 12^\circ$ ,系统采集的图像如图 11 所示。

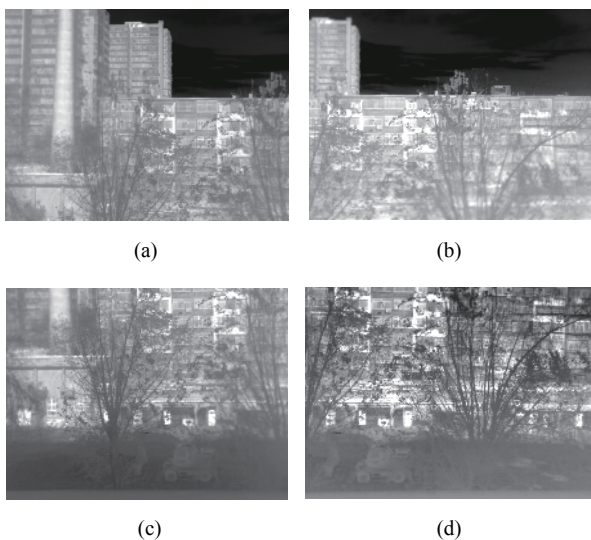


图 11 4 孔径分布式仿生热成像系统的原始图像。(a) 子孔径 1; (b) 子孔径 2; (c) 子孔径 3; (d) 子孔径 4

Fig.11 Original images collected by 4-aperture distributed bionic thermal imaging. (a) Sub-aperture 1; (b) Sub-aperture 2; (c) Sub-aperture 3; (d) Sub-aperture 4

### 3.2 图像拼接处理

由于各子孔径图像成像特点,在对子孔径的“并集”视场拼接成大视场前需要进行视场的投影和平移变换。

针对 4 孔径视场部分重叠热成像系统多视轴呈一定夹角的大视场特点,充分利用系统设计的先验条件,采用 SIFT 算法进行了图像的旋转、平移和投影变换,实现了大视场拼接,并在图像采集软件的 SDK 端进行了处理,实现了大视场拼接的准实时化,帧频为 25 Hz。

在图像拼接阶段所采取的拼接策略是:已配准的各子孔径图像,乘以权重再相加求和,实现图像融合拼接。对于各子孔径的图像,在重叠区域具有相同的融合权重,且权重和为 1。这样设置的融合权重保证了各子孔径图像对最终融合图像的贡献都是平等的,

且最终融合图像的像素值与各子孔径保持相同数量级,且避免在各不同重叠度区域加入新的不均匀因素。

具体步骤为:选取其中 1 个子孔径图像为基准,对于基准图像上某点  $P$ ,视场重叠子孔径为  $N$  ( $N \leq 4$ ) 个;则子孔径  $n$  在  $P$  点的权重  $W_n$  为:

$$W_n = 1/N \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^N W_n = 1 \quad (2)$$

$P$  点经过拼接处理后的像素值  $\bar{I}$  为:

$$\bar{I} = \sum_{i=1}^N W_n I_n \quad (3)$$

式中:  $I_n$  为重叠子孔径  $n$  经配准后在  $P$  点的灰度。

大视场拼接图像如图 12 所示。子孔径之间存在一些拼接缝痕迹,主要是因为 4 个独立的红外探测器响应存在一定差异及在图像投影变换时对边界像素处理引入像素偏差,通过探测器的先行标定处理及进一步的算法处理可消除。



图 12 4 孔径分布式仿生热成像大视场拼接图像

Fig.12 Stitched image with large FOV for 4-aperture distributed bionic thermal imaging

## 4 结 论

多孔径分布式视场部分重叠仿生热成像采用视轴具有一定倾斜的 4 个子孔径热成像分布排列,可实现诸多仿生复眼的特色成像模式和智能处理功能,解决或减缓传统单孔径热成像存在的一些缺陷:

- (1) 实现系统大视场及高分辨成像,构成类似人眼中心高分辨率成像,周边大视场搜索的变空间分辨率视觉模式;
- (2) 多目立体视觉获取空间深度感觉,获得类似

昆虫近场目标空间定位及快速检测能力;

(3) 偏振成像实现对场景和目标特有信息的理解,提高场景和目标的探测和识别能力;

(4) 双波段热成像获取景物更丰富互补的信息,提高复杂背景下对目标的识别能力。

多孔径分布式仿生热成像可为新型热成像理论和技术的发展提供技术途径,是未来光电成像的重要发展方向,在制导、导航和观瞄等方面具有广泛的应用前景。

#### 参考文献:

- [1] 白廷柱,金伟其.光电成像原理与技术[M].北京:北京理工大学出版社,2006.
- [2] Keith Lewis. Systems for persistent surveillance[C]//SPIE, 2011, 8165: 816514.
- [3] Slinger C W, Bennett C R, Dyer D, et al. An adaptive coded aperture imager: building, testing and trialing a super-resolving terrestrial demonstrator[C]//Proc of SPIE, 2011, 8165: 816511.
- [4] Mark Hewish. Passive target detection for air combat gathers pace-performance enhancements in infrared search and track systems [J]. *International Defense Review*, 1998(2): 32-37.
- [5] Mark Hewish. Moderating MAN PAPS mean streak-aircraft strive for increased awareness of IR missile attack [J]. *International Defense Review*, 1998(3): 50-57.
- [6] 张渊. 分布孔径红外系统及其新进展[J]. 科技咨询导报, 2007, 14(18): 8-12.
- [7] Laycock Leslie, Handerek Vincent. Multiple-aperture imaging device for airborne platforms[C]//Electro-Optical and Infrared Systems: Technology and Applications IV, SPIE, 2007, 6737: 1-11.
- [8] Laycock Leslie, Handerek Vincent. Miniature imaging devices for airborne platforms[C]//Electro-Optical and Infrared Systems: Technology and Applications V, SPIE, 2008, 7113: 1-9.
- [9] Duparre J, Dannberg P, Schreiber P, et al. Micro-optically fabricated artificial apposition compound eye[C]//SPIE, 2004, 5301: 25-33.
- [10] Afshari Hossein, Popovic Vladan, Tasci Tugce, et al. A spherical multi-camera system with real-time omnidirectional video acquisition capability [J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2012, 58(4): 1110-1118.
- [11] Song Young Min, Xie Yizhu, Malyarchuk Viktor, et al. Digital cameras with designs inspired by the arthropod eye [J]. *Nature*, 2013, 497(7447): 95-99.
- [12] Shankar M, Willett R, Pitsianis N, et al. Ultra-thin multiple-channel LWIR imaging systems[C]//Proc of SPIE, 2006, 6294: 629411.
- [13] Shankar M, Willett R, Pitsianis N, et al. Thin infrared imaging systems through multichannel sampling [J]. *Applied Optics*, 2008, 47(10): B1-B10.
- [14] Carles G, Muyo G, Bustin N, et al. Multi-aperture imaging in the visible and thermal infrared[C]//Imaging and Applied Optics, 2013: CM3C. 3.
- [15] Harvey Andrew R, Carles Guillem, Cowan Laura, et al. The simplicity, complexity, and benefits of multi-aperture imaging in the thermal infrared[C]//Proc of SPIE, Emerging Imaging and Sensing Technologies for Security and Defence II, 2017, 10438: 1043806.
- [16] Qiu Su, Ni Yu, Jin Weiqi, et al. FOV modeling of multi-aperture superposition compound eye based on micro-surface fiber faceplate [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(11): 2018-3025. (in Chinese)
- [17] 金伟其, 王霞, 罗琳, 等. 一种多孔径变空间分辨率仿生热成像方法与装置: 中国, CN108965678A[P]. 2018-12-07.
- [18] 金伟其, 罗琳, 裘溯, 等. 一种多孔径视场部分重叠的偏振热成像方法与装置: 中国, CN109164463A[P]. 2019-01-08.
- [19] 金伟其, 李力, 罗琳, 等. 多孔径视场部分重叠的双波段热成像方法与装置: 中国, CN109163809A[P]. 2019-01-08.