

文章编号: 1672-8785(2023)05-0008-07

## 分布式光电协同图像 综合处理技术

黄 畅 陈晓露 闾家亮 杜叶宣

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

**摘 要:** 分布式光电协同是提升单机光电载荷探测识别能力的有效途径。对采集的图像进行综合处理是协同应用的基础。多源图像超分辨率重建、多源图像信息融合和多视点图像拼接能够实现广域高分辨率成像, 提升系统的探测识别能力, 但对分布式光电系统实际能力的提升仍有待验证。因此搭建了分布式光电协同半实物仿真平台, 讨论经综合处理后的图像性能。结果表明, 可同时完成 4 路视频的图像拼接; 融合后图像的各向同性局部对比度和感知对比度有所提升, 且重建后图像的峰值信噪比提升了 30.88%, 在一定程度上可提升侦察效果。

**关键词:** 分布式系统; 多视点; 协同侦察; 光电成像

**中图分类号:** TP391 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2023.05.002

## Integrated Image Processing Technology Based on Distributed Opto-Electronic Cooperation

BEN Chang, CHEN Xiao-lu, CHUANG Jia-liang, DU Ye-xuan

(North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

**Abstract:** Distributed opto-electronic cooperation is an efficient way to enhance the detection and recognition ability of single-machine opto-electronic load. Comprehensive processing of collected images is the foundation of collaborative applications. Multi source image super-resolution reconstruction, multi-source image information fusion, and multi-view image mosaic stitching can achieve wide-area high-resolution imaging and improve the detection and recognition capabilities of the system. However, the improvement of the practical ability of distributed opto-electronic systems still needs to be verified. Therefore, a distributed opto-electronic cooperative partial-real simulation platform was established to discuss the image performance after comprehensive processing. The results show that image mosaic of 4-channel videos can be completed simultaneously, and the isotropic local contrast ratio and perceived contrast ratio of the fused image are improved. The peak signal-to-noise ratio of the reconstructed image is increased by 30.88%, which can improve the reconnaissance effect to a certain extent.

**Key words:** distributed system; multi-view; cooperative reconnaissance; opto-electronic imaging

收稿日期: 2022-10-25

作者简介: 黄畅(1988-), 男, 黑龙江绥滨人, 工程师, 硕士, 主要从事机载光电系统总体技术研究。

E-mail: mtantony@sina.com

## 0 引言

未来战场空间态势瞬息万变, 而现阶段光电侦察系统仍以人工规划为主、受计算机辅助支持, 战场灵活性差, 难以长期生存, 且传统的单机光电系统所发挥的工作效能非常有限。为实现广域高分辨率成像, 在光电载荷探测器一定的情况下, 需设计较大的光学口径。随之而来的是载荷体积、重量、功耗和成本的增加, 再加上飞机平台的限制, 进一步制约了光电系统的发展。

与单机光电系统相比, 分布式光电系统能够在高对抗环境下执行任务, 可克服由于单机发生故障或毁伤造成任务失败的问题。基于多光电设备组网, 分布式光电系统通过任务协同规划提高任务的完成效率, 即利用携带的多个光电传感器, 能够在扩展的感知范围内获取更多的侦察信息, 从而提升探测能力。

近年来, 虽然国内外专家学者在无人机协同探测方面做了很多研究, 但大多都是针对航迹规划、任务规划或者区域的覆盖问题, 而研究多传感器协同探测问题时又多是针对雷达信号或者电子与雷达的协同<sup>[1-3]</sup>。仅在光电载荷间协同的相关研究鲜有报道。在本文提出的分布式光电协同侦察方法中, 由多架无人机分别挂载光电载荷进行协同侦察; 任务依靠被动成像光电载荷, 在满足无人机运动约束的同时, 根据探测任务的视点需求在合适的时间将光电传感器布置到合适的位置; 通过多源图像超分辨率重建、多源图像信息融合和多视点图像拼接, 实现多个光电载荷相互协同侦察能力的提升。

本文首先介绍分布式光电协同图像综合处理方案, 然后分别对多源图像超分辨率重建、多源图像信息融合和多视点图像拼接中的关键问题进行研究, 最后通过半实物仿真试验对采集到的数据进行分析。

## 1 分布式光电协同图像综合处理

分布式光电协同图像综合处理涉及到软硬

件协同、高效计算和实时显示, 如图 1 所示。由装载于无人机平台的多个光电吊舱采集可见光、红外视频图像。在采集数据的过程中, 所有无人机需保持时间和空间上的协同, 并将各自拍摄的可见光和红外视频存储到本机的记录存储设备中, 供后续图像综合处理。图像综合处理包括三项核心任务: 图像拼接、图像融合和图像超分辨率重建。其中, 图像拼接是将多路(本文试验软件采用 4 路)可见光视频或红外视频按帧拼接, 然后将拼接后的视频输出, 达到扩大视场的目的, 以便进行目标捕获和跟踪。图像融合是将可见光图像和红外图像融合, 达到增强目标的目的。图像融合可以是同一视场两种图像的融合, 也可以是拼接后图像与感兴趣区域原有图像的融合。图像超分辨率重建是将低分辨率图像经过运算后得到高分辨率图像, 其目的是增加图像纹理特征, 更多地显示目标细节, 为目标识别奠定基础。最后态势显示是根据各任务需要显示拼接、融合、超分辨率重建的不同内容, 并将信息存储到数据库中待后续查询。

## 2 协同图像处理算法研究

不同光电载荷之间的有效协同根本体现在图像上, 分布式光电协同图像综合处理主要包含三个模块的算法开发。

### 2.1 多源图像超分辨率重建

图像的空间分辨率给出了对图像细节分辨能力的一种度量, 是侦察系统的一个关键指标。若多源视角间图像在超分辨率重建过程中没有得到相互约束, 则会导致重建结果中对应像素不一致。本文基于稀疏表示的图像超分辨率重建, 通过使用先验知识增强了线性模型的能力。

#### 2.1.1 超分辨率重建模型

对于一幅分辨率为  $m \times n$  的原始图像  $X$ , 得到的低分辨率退化图像可表示为<sup>[4]</sup>

$$Y = SHX + V \quad (1)$$

式中,  $S$  为下采样算子;  $H$  为模糊算子;  $V$  为加性高斯白噪声。

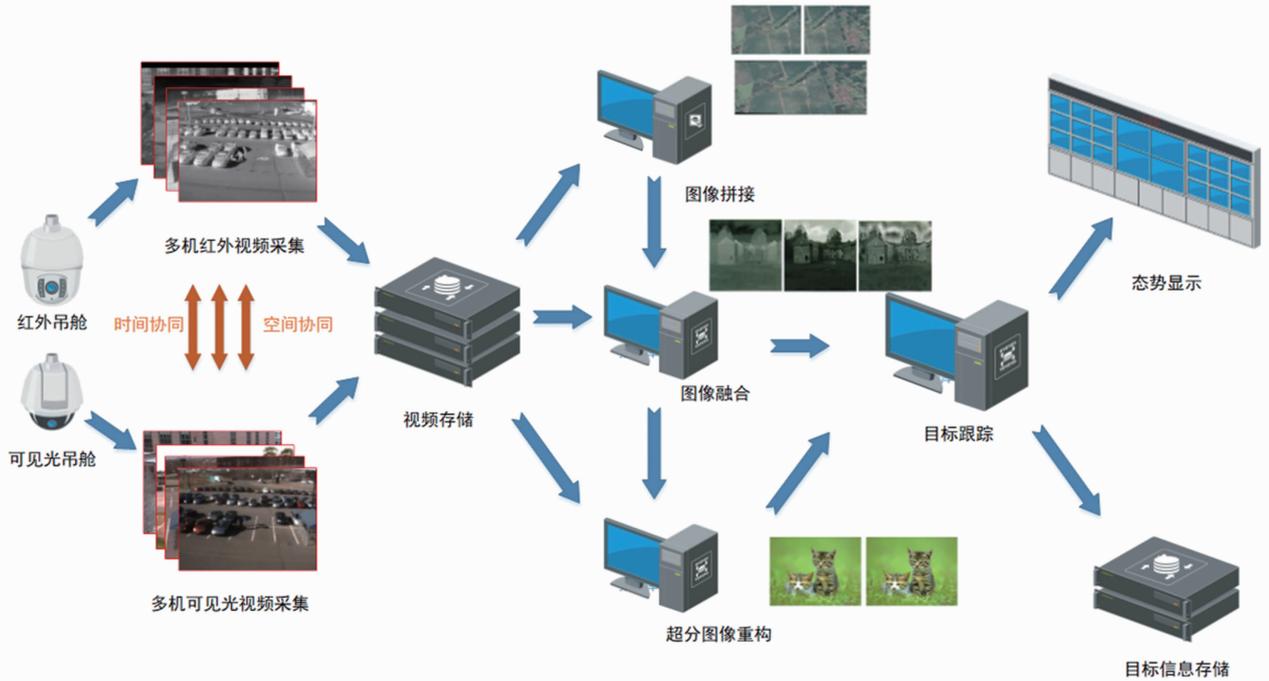


图 1 分布式光电协同图像综合处理方案

小尺寸图像可稀疏表示，分布式光电系统采集的图像尺寸为  $1920 \times 1080$ 。因此可将原图像分割成图像块，再用过完备字典对图像块进行稀疏表示。设过完备字典为  $D \in R^{m \times k}$ ，则原始高分辨率图像  $X$  中的图像块  $x \in R^m$  可用  $z \in R^k$  表示：

$$x = Dz \quad (2)$$

高分辨率图像的过完备字典  $D_h$  退化到低分辨率图像的过完备字典  $D_l$ ，可用局部退化算子  $Q$  得到：

$$D_l = QD_h \quad (3)$$

同理，其对应图像块  $x$  的近似退化表示为

$$y = Qx + v \quad (4)$$

式中， $v$  为图像块上的加性高斯白噪声。

### 2.1.2 基于过完备稀疏表示的联合字典训练

使用双字典联合训练方式同时构建两个过完备字典，利用高、低分辨率图像块中先验知识的联系，建立合适的高、低字典对。设  $X = [x_1, x_2, \dots, x_n] \in R^{m \times n}$  是高分辨率图像训练样本， $Y = [y_1, y_2, \dots, y_n] \in R^{l \times n}$  是对应的低分辨率图像训练样本，于是高分辨率和低分辨率图像块的稀疏编码可表示为

$$\min_{D_l, Z} \frac{1}{2} \|X - D_l Z\|_2^2 + \lambda \|Z\|_1 \quad (5)$$

$$\min_{D_l, Z} \frac{1}{2} \|X - D_l Z\|_2^2 + \lambda \|Z\|_1 \quad (6)$$

## 2.2 多源图像信息融合

单一图像往往会受环境及成像范围限制，无法完全反映场景信息，而多源图像的融合图像则更具信息性和完整性。分布式光电系统采集的不同类别图像主要是可见光和红外图像。受视角因素影响，图像重叠信息较同一视角拍摄的少，配准难度大，对融合算法要求较高。本文采用基于非下采样剪切变换 (Non-Subsampled Shearlet Transform, NSST)<sup>[5]</sup> 的红外和可见光图像融合，具体步骤如下：

(1) 融合前对红外和可见光图像进行严格的空配准。对源图像  $A$ 、 $B$  分别进行  $N$  层 NSST 分解，得到低频子带图像  $A_N^0$ 、 $B_N^0$  以及各尺度各方向的高频子带图像  $A_j^k$ 、 $B_j^k$ 。  $k=1, 2, \dots, K$ ;  $j=1, 2, \dots, N$ 。其中， $K$  为分解的最大层数， $N$  为各层分解的方向数。

(2) 对低频子带图像和高频子带图像采用不同的融合规则进行融合，得到融合后的低频子带图像和高频子带图像。

(3)对融合后的低频子带图像和高频子带图像进行 NSST 逆变换, 得到最终的融合图像。

### 2.3 多视点图像拼接

多个光电载荷从多个视角拍摄的图像具有角度变化大、图像数量多等特点。对其进行大范围、快速、准确的自动拼接仍是应用中面临的实际问题。本项目研究基于快速特征点提取和描述的 ORB 图像拼接算法<sup>[6]</sup>。该算法采用了 FAST 角点检测, 处理分布式光电图像时可保证尺度和旋转不变性, 并能满足实时性要求。

#### 2.3.1 特征检测

ORB 算法通过构建高斯金字塔得到 FAST 特征点的尺度特征。将任意一个 FAST 特征点的邻域像素距定义为

$$m_{pq} = \sum_{x,y} x^p y^q I(x,y), p, q = 0, 1, 2 \dots \quad (7)$$

特征点与质心的夹角即为 FAST 特征点主方向  $\theta$ :

$$\theta = \arctan(m_{10}, m_{01}) \quad (8)$$

#### 2.3.2 特征描述

利用 BRIEF 特征描述子对特征点进行描述。它采用二进制码串作为描述子向量, 生成的特征描述子即为  $n$  维二进制码串:

$$f_n(p) = \sum_{1 \leq i < j \leq n} 2^{i-1} \tau(p; x, y) \quad (9)$$

#### 2.3.3 图像匹配

求取两幅图像的平面单应性矩阵  $H$ , 得到对应关系:

$$\begin{bmatrix} x'_i \\ y'_i \\ 1 \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_0 & h_1 & h_2 \\ h_3 & h_4 & h_5 \\ h_6 & h_7 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

#### 2.3.4 图像融合

采用位置加权平滑算法对拼缝进行融合。

融合后的图像像素  $f(x, y)$  可表示为

$$f(x, y) = \begin{cases} I_1(x, y), & (x, y) \in T_1 \\ d_1 I_1(x, y) + d_2 I_2(x, y), & (x, y) \in T_2 \\ I_2(x, y), & (x, y) \in T_3 \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} d_1 + d_2 = 1 \\ d_2 = \frac{\omega_i}{W} \end{cases} \quad (12)$$

式中,  $I_1$  和  $I_2$  表示拼接的两幅图像;  $T_1 \sim T_3$  分别表示在图 1 中取值、重叠区域取值和图 2 中取值;  $d_1$  和  $d_2$  是权重值;  $\omega_i$  是当前像素点与重叠区域左边缘的横向距离;  $W$  是两幅图像重叠区域的总宽度。

## 3 试验结果与分析

### 3.1 半实物仿真试验场景

在试验区内开展分布式光电协同侦察的地面半实物仿真试验。系统架构如图 2 所示。通过试验验证 4 路光电吊舱图像协同的处理能力。两两吊舱之间按照相距至少 5 m 的位置摆放, 配试设备和保障设备就近摆放。通过线缆完成各设备之间的互联。

### 3.2 软件测试环境

编制分布式光电协同图像综合处理软件, 测试实拍图像经过图像超分辨率重建、图像融合和图像拼接后的协同能力提升效果。测试环境如表 1 所示。

### 3.3 图像算法测试

超分辨率重建后的红外图像如图 3 所示。分

表 1 测试环境

测试环境	功能	参数
硬件环境	中央处理器	Intel Core i3-4160 (3.6GHz)
	图形处理器	NVIDIA GTX1050 (2G)
	内存	DDR4 (4G)×2
	硬盘	SSD SATA 3 (120G)
软件环境	操作系统	Ubuntu 18.04
	开发工具	QT 5.9.2
	加速器	CUDA 10.2

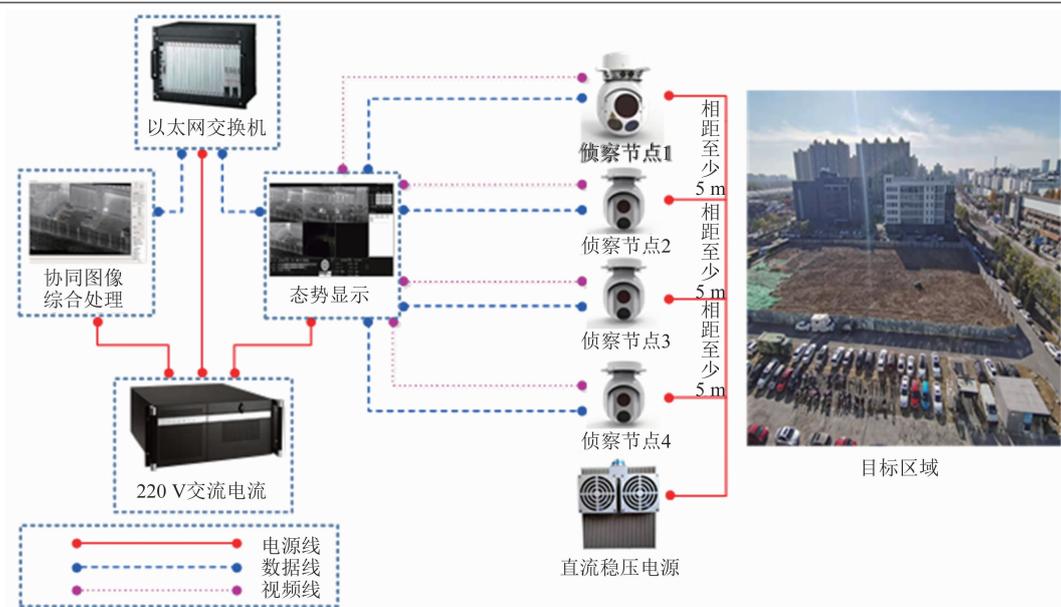


图2 分布式光电半实物仿真试验系统架构

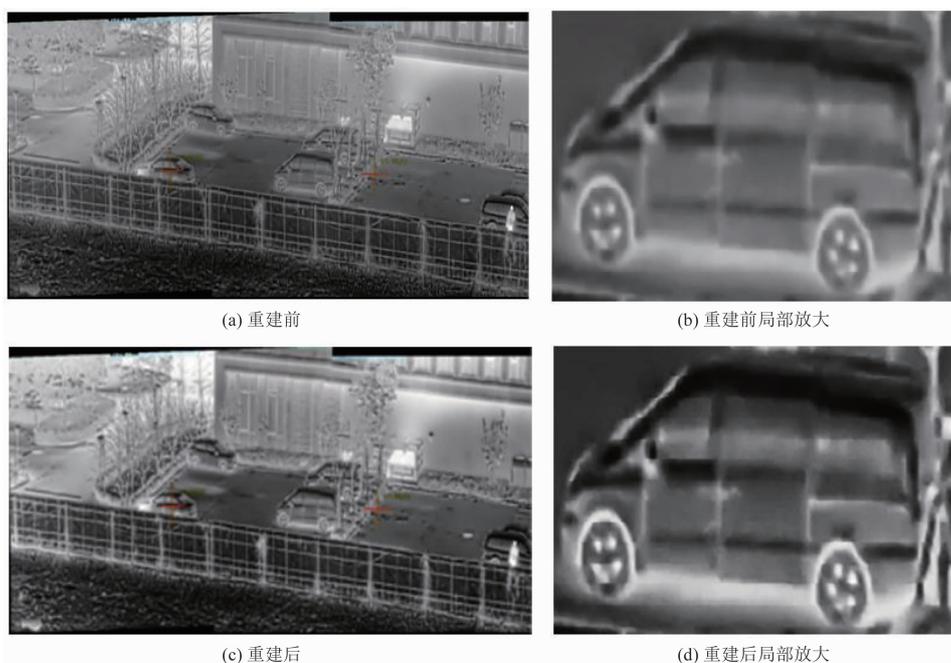


图3 重建结果图

表2 图像融合评价结果

评价标准	Laplace 金字塔	对比度金字塔	本文算法
各向同性局部对比度	0.8367	0.8355	0.8573
感知对比度	0.8664	0.8761	0.8934

表3 图像拼接性能测试结果

图像大小	视频路数	重叠度(像素)	拼接效率(FPS)	图像拼接质量
960×540	4	50	6	非常好
1920×1080	4	100	2	非常好
3840×2160	4	100	0.1	好

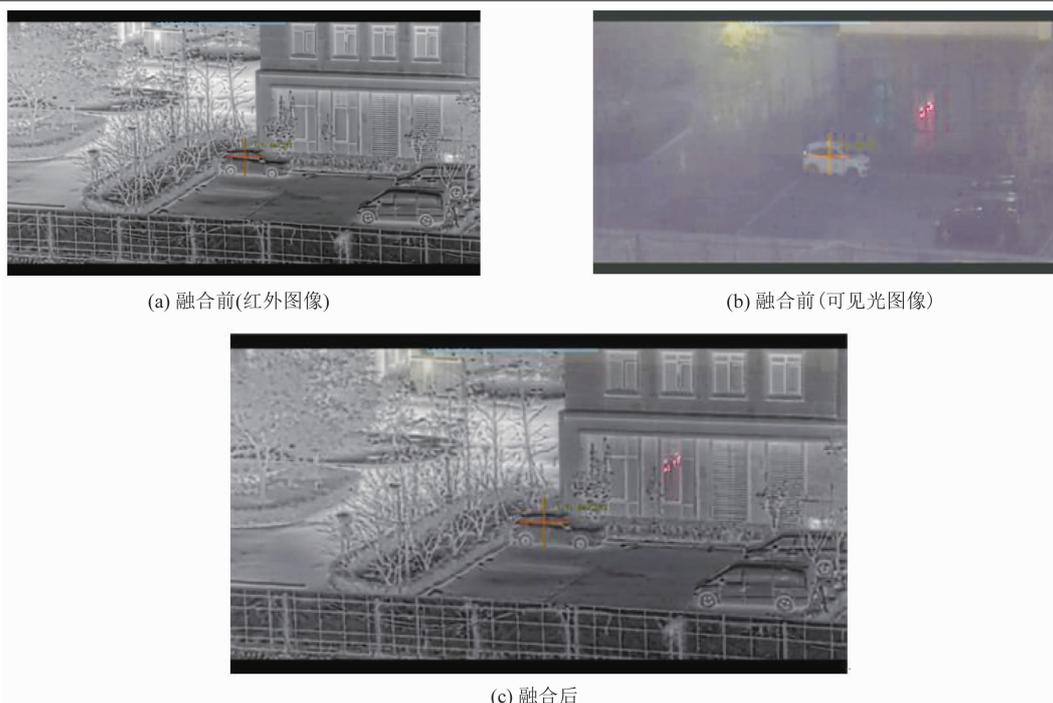


图 4 融合结果图

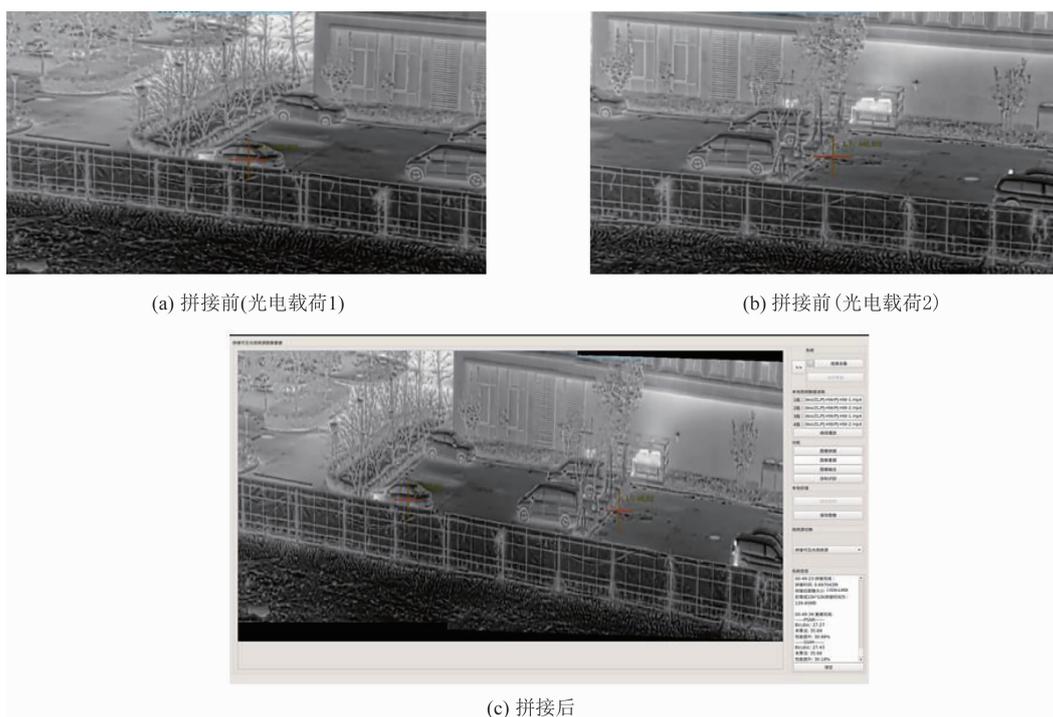


图 5 拼接结果图

分辨率由原来的  $1920 \times 1080$  变为  $3838 \times 2158$ , 提升了 4 倍。结构相似性 (Structural Similarity, SSIM) 是一种衡量两幅图像相似度的指标。在图像超分辨率重构中, SSIM 是评价图像质量的一种有效方法。本次试验

中, 图像超分辨重建后 SSIM 值提升了 30.18%。峰值信噪比 (Peak Signal-to-Noise Ratio, PSNR) 是一种评价图像的客观标准。本次试验中, 图像超分辨率重建后, 图像的 PSNR 值提升了 30.88%。

图像融合效果如图 4 所示。图像融合评价是指衡量融合后图像与可见光图像、红外图像的失真对比情况。表 2 给出了本文算法在各向同性局部对比度和感知对比度两个指标上与 Laplace 金字塔和对比度金字塔算法之间的对比结果。

图像拼接的效果图如图 5 所示。表 3 给出了在上述软硬件环境下 4 路红外视频拼接的测试结果。可以看出,随着图像分辨率的倍数增大,图像的拼接效率大幅下降。

#### 4 结束语

本文对多光电载荷到达目标位置或区域之后的协同图像综合处理技术问题进行了探索,研究了多源图像超分辨率重建、多源图像信息融合、多视点图像拼接算法,并开展了软件编制和地面半实物仿真试验。结果表明,分布式光电系统在多传感器多维度信息获取和处理方面具备单机无法比拟的优势,在一定程度上可提升侦察效果。但同时,由于涉及到大量多角度信息处理技术,如何在动平台的实际工况下仍能保证匹配精度,还需日后在大量飞行试验中加以检验,并进一步实现硬件移植和技术转化,使其真正应用于未来分布式体系化作战依

靠被动成像的光电载荷协同侦察任务中,从而实现更好的图像侦察效果。

#### 参考文献

- [1] 白瑞光,孙鑫,陈秋双,等. 基于 Gauss 伪谱法的多 UAV 协同航迹规划 [J]. *宇航学报*, 2014, **35**(9): 1022-1029.
- [2] Yoon Y, Gruber S, Krakow L, et al. Autonomous Target Detection and Localization Using Co-operative Unmanned Aerial Vehicles [J]. *Lecture Notes in Control & Information Sciences*, 2009, **381**: 195-205.
- [3] Grocholsky B, Dille M, Nuske S. Efficient Target Geolocation by Highly Uncertain Small Air Vehicles [C]. Osaka: IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2011.
- [4] 魏焯. 单幅图像超分辨率重建方法及其视觉位移测量应用研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019.
- [5] 邓立暖,尧新峰. 基于 NSST 的红外与可见光图像融合算法 [J]. *电子学报*, 2017, **45**(12): 2965-2970.
- [6] 黄剑锋. 改进的基于 ORB 特征的视频实时拼接技术 [J]. *机械制造与自动化*, 2017, **46**(3): 212-215.