

基于 FWA 的红外偏振图像智能融合方法

陈卫^{1,2,3}, 孙晓兵^{1,3*}, 乔延利^{1,3}, 陈斐楠^{1,3}, 殷玉龙¹

(1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽合肥 230031;

2. 中国科学技术大学, 安徽合肥 230026;

3. 中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽合肥 230031)

摘要: 针对红外强度图和红外偏振度图融合问题, 提出了基于烟花算法优化空域加权平均法的智能图像融合方法。在构建优化问题模型的基础上, 确定了烟花算法的边界条件。通过引入相对熵权值建立了基于综合相对熵的适应度函数。最后, 与 6 种典型的传统融合方法在“ground”、“truck”、“car”3 组红外强度和偏振度图像数据上进行了融合实验, 对融合结果进行了客观评价和视觉效果评价。实验结果表明: 所提方法可以有效实现红外强度图和红外偏振度图的融合, 较好保留了红外强度和红外偏振特征。综合视觉效果和客观评价结果, 在相对熵、总结构相似性、总互信息指标上优于比较算法。

关键词: 烟花算法; 群体智能; 红外偏振图像; 智能融合; 加权平均法

中图分类号: TP18; TP391 **文献标识码:** A

Intelligent fusion method of infrared polarization image based on fireworks algorithm

CHEN Wei^{1,2,3}, SUN Xiao-Bing^{1,3*}, QIAO Yan-Li^{1,3}, CHEN Fei-Nan^{1,3}, YIN Yu-Long¹

(1. Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

2. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

3. Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: Aiming at the fusion of infrared intensity-polarization image, an intelligent fusion method based on spatially weighted averaging method optimized by fireworks algorithm is proposed. Based on the optimization model, the boundary conditions of fireworks algorithm are determined. The fitness function based on comprehensive relative-entropy is established by introducing the weight of relative-entropy. Finally, the fusion experiments on three groups of infrared image “ground”, “truck” and “car” are carried out with six typical traditional fusion methods, and the fusion results are evaluated objectively and compared with the visual effects. The experimental results show that the proposed method can effectively achieve the fusion of infrared intensity map and polarization map, and retain the infrared intensity and polarization characteristics. Combining the visual effect and objective evaluation results, the method in this paper is superior to the comparison algorithm in relative-entropy, similarity of summary structure and total mutual information index.

Key words: fireworks algorithm, swarm intelligence, infrared polarization image, intelligent fusion, weighted averaging method

PACS: 42.79.Ci, 07.05.Pj

收稿日期: 2019-07-16, 修回日期: 2020-01-03

Received date: 2019-07-16, Revised date: 2020-01-03

基金项目: 重大专项(30-Y20A010-9007-17/18); 合作开发项目(2016YFE0201400)

Foundation items: Supported by Major Project (30-Y20A010-9007-17/18), Cooperation and Development program (2016YFE0201400)

作者简介(Biography): 陈卫(1979-), 男, 安徽合肥人, 讲师, 博士, 主要研究领域为光学偏振遥感、光电对抗及智能信息处理, E-mail: chw523@mail.ustc.edu.cn

*通讯作者(Corresponding author): E-mail: xbsun@aiofm.ac.cn

引言

偏振是光的基本性质,偏振探测可以提供除了辐射量的更多维度的光学参量信息,例如偏振度、偏振角及偏振椭率等。现代红外成像系统对弱目标敏感,具有发现隐蔽目标的能力,但背景杂波使其难以探测目标。在热成像系统中引入红外偏振成像技术可改善这种低目标背景对比度^[1]。在光谱和强度信息揭示目标材料、形状、亮度以及位置信息的同时,偏振信息能够表征目标纹理形态特征、边缘轮廓和粗糙度等^[2]。因此,偏振探测可提供与强度图像互补的信息^[3],对二者融合可以更全面描述目标信息,具有相对单一图像更加易于理解、更加准确和可靠的描述。如何融合红外偏振和强度图像成为信息融合处理中的一个重要问题。

图像融合可分为像素级、特征级、决策级三个层次^[4],目前研究最多、应用最广泛的是像素级融合。像素级融合直接利用源图像的原始像素灰度信息进行融合,使融合图在视觉感知和计算过程中具有更多信息^[5],尽可能地保持原始图像的数据信息,提供丰富的细节信息和较高的准确性。通常像素级融合又可分为空域法和变换域法^[6-7]:变换域法是将原始图像变换到某一变换域并以变换域中的系数表示,再根据不同的融合规则选取或合成这些系数,最后利用得到的新系数进行相应的逆变换重建融合图像,主要方法有LP(Laplacian Pyramid, LP)^[8]、GP(Gradient Pyramid, GP)^[9]、DWT(Discrete Wavelet Transform, DWT)^[10-11]、SIDWT(The Shift Invariant Discrete Wavelet Transform, SIDWT)^[12]、MP(Morphological Pyramidal, MP)^[13]等。空域法则根据一定的准则,直接选取多个原始图像中不同的像素构成融合图像,不具有变换域法的分解和重建过程,较变换域法简单,主要方法有加权平均法、PCA(Principal Component Analysis, PCA)^[11]、基于能量梯度的融合方法等^[14]。空域法和变换域法各有特点,在实际图像融合应用中都有使用。安富等^[15]将DWT应用于红外偏振与光强图像的融合,相较于加权平均融合和绝对值较大法融合,局部熵、局部标准偏差、对比度、粗糙度分别得到提高。陈伟力等^[16]采用小波包变换对中波红外偏振图像进行融合,融合效果优于LP方法。周强等^[17]提出了基于非下采样Shearlets变换(NSST)的区域显著性融合方法,获得的融合图像突出了红外目标与偏振目标,效果显著。

上述图像融合方法的融合效果对源图像特征具有较强依赖性,使算法的适用范围受到一定限制。基于红外偏振图像和强度图像的特征差异,提出了一些新的融合方法和模型。安富^[18]基于红外偏振和光强图像的差异特征,提出特征差异驱动融合模型,并通过仿真实验结果展示了该融合模型可融合源图像间互补的差异特征。吕胜^[19]和杨风暴^[20]根据拟态仿生学思想,提出了红外偏振与光强图像拟态融合,根据源图像差异特征变化动态调整融合算法,提高了信息熵、平均梯度、标准差、边缘强度和清晰度指标。不同的图像融合任务面对的源图像特征不尽相同,但融合的目的均是为最大化图像质量评价指标,本质上是个优化问题,因此出现了基于智能优化技术的图像融合方法。Kong等人提出了基于GA(Genetic Algorithm, GA)和空间频率(Spatial Frequency, SF)结合的图像融合方法^[21]。Zhang等人提出将基于PSO(Particle Swarm Optimization, PSO)应用于多聚焦图像融合^[22]。李奕等人提出PSO和PCNN(Pulse Coupled Neural Network, PCNN)结合的图像融合方法^[23]。张新曼等人提出一种基于GA的多聚焦图像融合方法,将图像子块大小作为GA的染色体,通过杂交和变异操作,寻找最优组合分块形成融合图像^[24]。MP Kumar将PSO算法和DWT算法相结合应用于胸部X光影像融合,并与GA算法作了比较,显示出PSO算法更好的融合效果^[25]。这些融合方法虽然都是近年陆续提出的,但融合效果很大程度上依赖于所用智能优化算法的性能,而GA、PSO等算法均是上世纪九十年代提出的优化算法,在收敛速度、计算性能等方面落后于人工鱼群优化、烟花算法^[26](Fireworks Algorithm, FWA)等新型群体智能优化算法。

FWA自提出以来,获得了快速发展,产生了多个改进版本和变体。Pei等^[27]研究了适应度函数估计对FWA加速性能的影响,改进了样本选择策略。Ding等^[28]提出了基于GPU的并行FWA版本GPU-FWA,以在复杂问题求解时全面提升FWA的运行速度。Zheng^[29]综合分析了FWA的算子,指出了其局限性并进行了改进,提出了增强型FWA(EFWA)。Zheng^[30]和Li^[31]对FWA中爆炸幅度的自适应策略进行了研究和改进,分别提出了动态搜索FWA和自适应FWA。Yu等^[32]人提出将差分演化算法(Differential Evolution, DE)和FWA进行混合的混合算法FWA-DE。Yu等^[33]、Li等^[34]对变

算子进行了综合研究,提出了两种新的变异算子,大大加快了处理优化问题的收敛速度。Zheng等^[35]提出了一种允许烟花之间充分交互的FWA协作框架。Li等^[36]提出了一种利用爆炸火花提供的目标函数信息构造高效变异算子的引导FWA(GFWA)。由于FWA可求解复杂问题最优解且不要求目标函数梯度信息,具有广泛的适应性,已在非负矩阵分解计算、数字滤波器设计、群体机器人多目标搜索、图像配准等领域获得应用。Bejinarui^[37]又开展了FWA、CSA、PSO三种算法在多光谱图像融合中的应用研究,结果表明FWA可以成功应用于多光谱图像融合。基于此,本文提出将FWA和空域加权平均法相结合,应用于红外强度和红外偏振度图像融合,构造综合相对熵为适应度函数,对加权平均法的图像权值进行优化,通过实验验证了算法的有效性,并与典型的传统图像融合方法作了比较。

1 图像融合方法

作为一种具有爆炸搜索机制的全局优化求解新型群体智能优化算法^[38],FWA将问题域中可能的解以烟花表示,并以烟花位置为中心,在一定半径内爆炸生成一定数量的火花,通过评估火花的适应度选择火花以生成下一代烟花。这个过程即是在烟花周围空间的搜索过程,通过在问题域的连续爆炸(多次迭代),完成解空间最优解的搜索。将FWA应用于红外偏振度图和红外强度图融合,具体包括优化问题模型、适应度函数及算法流程三个主要部分。

1.1 优化问题模型

加权平均法是空域法图像融合中的一种简单且常用的融合方法,可表示为:

$$I_F = \sum_{i=1}^n \omega_i I_i / \sum_{i=1}^n \omega_i \quad (1)$$

式中, I_F 为融合图, I_i 为待融合的源图像, n 为待融合源图像的数量, ω_i 为源图像权值且满足 $0 < \omega_i < 1$ 。

加权平均法直接对源图像像素进行操作,具有实现简单、计算速度快、抑制噪声的特点^[39]。其融合效果即 I_F 的图像质量直接取决于权值 ω_i 的选择,因此本质上是个关于图像权值的优化问题。本文只讨论单目标优化,确定最小化函数的参数值。最小化问题模型可表示为:

$$\operatorname{argmin}_{0 < x_i < 1} f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (2)$$

其中, $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 表示 I_F 图像质量的评价函数,是该优化问题的适应度函数, $0 < x_i < 1$ 是约束条件, (x_1, x_2, \dots, x_n) 为 n 维优化变量。

1.2 适应度函数

相对熵(Relative Entropy)用来测量两幅图像 I_A 、 I_B 间灰度分布的信息差异,定义为:

$$C_{AB} = \sum_{i=0}^L p_i \log_2(p_i/q_i) \quad (3)$$

式中, $p = \{p_0, p_1, p_2, \dots, p_i, \dots, p_L\}$ 和 $q = \{q_0, q_1, q_2, \dots, q_i, \dots, q_L\}$ 分别为 I_A 、 I_B 的灰度分布。 C_{AB} 是评价 I_A 、 I_B 两幅图像差异的关键指标,直接反映了 I_A 、 I_B 对应像素的差异。在图像融合问题中,对源图和融合图求相对熵,可得到融合图与源图的差异。 C_{AB} 值越小,表示 B 图与 A 图的差异越小,说明该融合方法从源图 A 中提取的信息量越多。因此,可以基于相对熵构建适应度函数。

林冬梅^[40]选择两幅源图与融合图相对熵的平均值即综合相对熵来描述融合结果与源图的综合差异,综合相对熵表示为:

$$\bar{C}_{FAB} = (C_{FA} + C_{FB})/2 \quad (4)$$

式中, C_{FA} 表示源图 A 和融合图 F 的相对熵, C_{FB} 表示源图 B 和融合图 F 的相对熵。

由于红外强度图和红外偏振图具有特征互补性,二者与融合图 F 的相对熵 C_{FA} 、 C_{FB} 对 \bar{C}_{FAB} 的贡献度不同,通过引入相对熵权值表示贡献度的影响,故式(4)可改写为:

$$\bar{C}_{FAB} = (\alpha C_{FA} + \beta C_{FB})/2 \quad (5)$$

式中, α 表示源图 A 对综合相对熵 \bar{C}_{FAB} 的贡献度, β 表示源图 B 对综合相对熵 \bar{C}_{FAB} 的贡献度。由式(1)与式(4)可知, \bar{C}_{FAB} 可表示为:

$$\bar{C}_{FAB} = g(\omega_1, \omega_2, \alpha, \beta) \quad (6)$$

因此,选用式(5)作为该最小化优化问题的适应度函数,问题空间维度为4,通过优化后的 ω_1 、 ω_2 即可得到最小化 \bar{C}_{FAB} 条件下的红外强度图和红外偏振度图的融合图。

1.3 优化算法流程

设 $W = \{\omega_i, i = 1, 2, \dots, N\}$ 是 N 个烟花的种群, $\omega_i = (\omega_i^1, \omega_i^2, \omega_i^3, \omega_i^4)$ 表示烟花个体 ω_i 在4维问题域空间的位置。算法流程描述如下:

1)在问题域空间中随机产生初始烟花种群 $W = \{\omega_i, i = 1, 2, \dots, N\}$,每一个烟花代表解空间的一

个解。

2) 根据适应度函数计算每一个烟花 ω_i 的适应度。

3) 对每一个烟花 $\omega_i \in W$, 计算烟花的爆炸火花数和爆炸幅度。

烟花 ω_i 的爆炸火花数 λ_i :

$$\lambda_i = \lambda \cdot \frac{\max_k (f(\omega_k)) - f(\omega_i)}{\sum_j (\max_k (f(\omega_k)) - f(\omega_j))}, \quad (7)$$

其中, $\lambda = \sum_i \lambda_i$, 用于控制每代总爆炸火花数。显然, 适应度值 $f(\omega_i)$ 越小的烟花, 生成的火花数 λ_i 越多。

烟花 ω_i 的爆炸幅度 A_i :

$$A_i = A \cdot \frac{f(\omega_i) - \min_k (f(\omega_k))}{\sum_j (f(\omega_j) - \min_k (f(\omega_k)))}, \quad (8)$$

A 用于控制爆炸幅度之和。适应度值 $f(\omega_i)$ 越小的烟花, 爆炸幅度越小, 反之亦然。

4) 产生 λ_i 个规则火花并计算各火花的适应度, 算法伪代码如表 1 所示。

表 1 规则火花生成伪代码

Table 1 Pseudo-code of regular sparkling

火花生成算法伪代码
1: for $j = 1$ to λ_i do
2: $e \leftarrow A_i \cdot \text{rand}(-1, 1)$
3: 随机选择 z 个维度, $z \leftarrow \text{round}(d \cdot \text{rand}(0, 1))$
4: $s_{ij} \leftarrow \omega_i$
5: for $k = 1$ to z do
6: $s_{ijk} \leftarrow s_{ijk} + e$
7: end for
8: end for

注: s_{ij} 表示烟花 ω_i 爆炸产生的第 j 个火花, s_{ijk} 表示第 j 个火花的第 k 维, e 为位置偏移, d 表示问题域维度, 本文中 $d = 4$ 。

5) 为保证种群的多样性引入变异火花。产生高斯变异火花并计算各火花的适应度, 算法伪代码如表 2 所示。

6) 将适应度最好、最差的及其他 $N - 2$ 个随机火花组成新一代的烟花种群。计算种群的最优解, 判定是否满足问题的精度要求或者达到最大函数评估次数, 如果满足则停止迭代, 否则继续从第 3) 步开始迭代。迭代的初始值为此次循环得到的新烟花种群。

表 2 变异火花生成伪代码

Table 2 Pseudo-code of variant sparkling

火花生成算法伪代码
1: for $j = 1$ to λ do
2: $e \leftarrow \text{randn}(1, 1)$
3: 随机选择 z 个维度, $z \leftarrow \text{round}(d \cdot \text{rand}(0, 1))$
4: $g_j \leftarrow \omega_j$
5: for $k = 1$ to z do
6: $g_{jk} \leftarrow g_{jk} \cdot e$
7: end for
8: end for

注: λ 是变异火花个数, g_j 表示第 j 个变异火花, g_{jk} 表示第 j 个变异火花的第 k 维。

优化算法流程如图 1 所示。

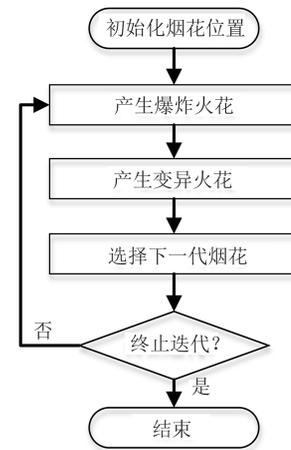


图 1 FWA 流程图

Fig. 1 Flow chart of FWA

FWA 可采用最大迭代次数或最小适应度值作为算法迭代的控制参数, 本文采用最大迭代次数。图 2 为最大迭代次数为 130 次的 FWA 的适应度收敛过程和烟花爆炸幅度收敛过程。可以看出, 适应度 (图 2-(a))、爆炸幅度 (图 2-(b)) 均能快速收敛, 适应度收敛过程还反映了 FWA 具有搜索全局最优解的特点。

2 图像融合实验和质量分析

为了验证本文算法的有效性, 评价算法的性能, 选取了 3 组 (包括 “ground”, “truck”, “car”) 经过配准的红外强度与偏振度图像进行融合实验, 将本文所提方法与其他六种具有代表性的融合方法进行对比, 这六种方法分别是 LP、PCA、GP、MP、DWT、SIDWT。所用融合算法的具体设置如表 3 所示。

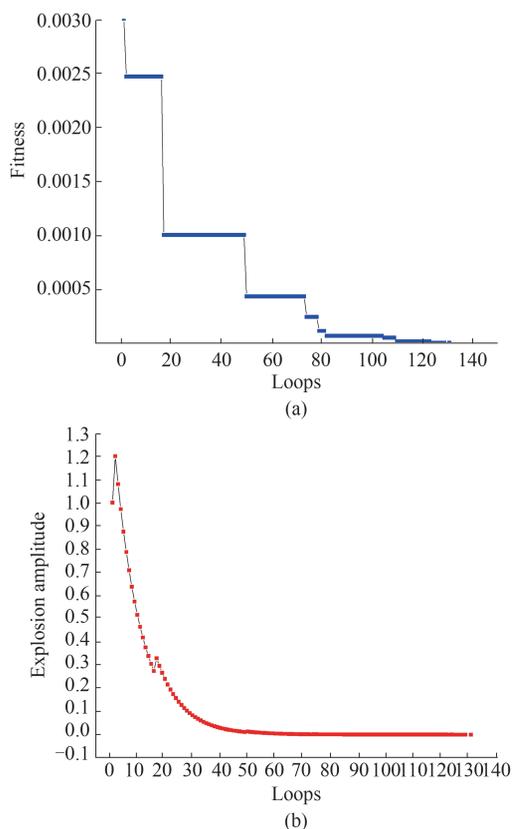


图2 FWA的收敛过程(a)适应度收敛过程,(b)爆炸幅度收敛过程

Fig. 2 Convergence process of FWA (a) fitness, (b) explosion amplitude

表3 实验所用融合算法设置

Table 3 Fusion algorithms settings for experiments

Algorithm	Algorithm setting
FWA	Dim=4, Seed Num=10, Son Num=30, Maximum Iterations=500
LP	Level=4, Highpass combination: choose max, Low-pass combination: average
GP	Level=4, Highpass combination: choose max, Low-pass combination: average
PCA	
MP	Level=4, Highpass combination: choose max, Low-pass combination: average
DWT	Level=4, Highpass combination: choose max, Low-pass combination: average
SIDWT	Level=4, Highpass combination: choose max, Low-pass combination: average

FWA算法的具体实验控制参数为:问题空间维度为4维,初始烟花数10个,每个烟花产生爆炸火花数30,最大迭代次数500次。实验在戴尔移动图

形工作站 Precision 5530 上进行,具体硬件配置为 Intel (R) Core (TM) i7-8850H@2.60 GHz, 内存 32GB,运行操作系统为64位 Win10系统,运行软件为 Matlab R2018a。

2.1 客观评价指标

针对红外强度图像和红外偏振度图像融合质量的客观评价,选取评价指标为相对熵(RE)、总互信息(FMI)和总结构相似性(FSSIM)。

1) 相对熵

相对熵的定义在1.2节的式(3)和(4)给出。RE用来描述融合图与源图的综合信息差异,值越小表示融合图与红外强度图和红外偏振度图的综合信息差异越小,对源图的信息熵保留越大。

2) 总结构相似性

结构相似性 (Structural Similarity Index, SSIM) 用于估计两幅图像之间的结构差异,SSIM越大则结构差异越小,结构相似性越大。设源图 I 和融合图 F 共有 N 个像素,则 I 和 F 的结构相似性指数 $SSIM(I, F)$ 定义如下^[41]:

$$SSIM(I, F) = \frac{2\mu_I\mu_F}{\mu_I^2 + \mu_F^2} + \frac{2\delta_{IF}}{\delta_I^2 + \delta_F^2}, \quad (12)$$

其中 μ_I, μ_F 分布是图像 I 和 F 的灰度均值, δ_I, δ_F 分布是 I 和 F 的均方差, δ_{IF} 是 I 和 F 的协方差。

$$\begin{aligned} \mu_I &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_i \\ \mu_F &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F_i \\ \delta_I &= \left(\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (I_i - \mu_I)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \\ \delta_F &= \left(\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (F_i - \mu_F)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \\ \delta_{IF} &= \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (I_i - \mu_I)(F_i - \mu_F) \end{aligned} \quad (13)$$

式中, I_i, F_i 分别为 I 图和 F 图的第 i 个像素灰度值。

定义 FSSIM 为融合图 F 与两幅源图 I_1, I_2 间的总结构相似性:

$$FSSIM = SSIM(I_1, F) + SSIM(I_2, F) \quad (14)$$

FSSIM 越大,表示融合图在结构相似性上与红外强度图和红外偏振度图的差异越小,即对两幅源图的结构相似性特征保留的越好。

3) 总互信息

互信息 (Mutual Information, MI) 描述的是两幅图像间的灰度分布的相似性,衡量两幅图像间的依

赖程度。用于描述融合图像和源图像间互信息时,可衡量融合图像包含源图像的像素信息量。互信息越大,获得的信息越多。融合图像 F 与源图像 A 、 B 之间的互信息分别定义如下^[42]:

$$\begin{aligned} MI(F,A) &= \sum_{f,a} h_{FA}(f,a) \log \frac{h_{FA}(f,a)}{h_F(f)h_A(a)}, \\ MI(F,B) &= \sum_{f,b} h_{FB}(f,b) \log \frac{h_{FB}(f,b)}{h_F(f)h_B(b)} \end{aligned} \quad (15)$$

式中, $h_A(a)$ 、 $h_B(b)$ 、 $h_F(f)$ 分别表示源图像 A 、 B 和融合图像 F 的灰度概率分布, $h_{FA}(f,a)$ 、 $h_{FB}(f,b)$ 分别表示融合图像 F 和源图像 A 、 B 的归一化联合概率分布。

由式(15)可知, $MI(F,A)$ 反映了融合图像 F 包含源图像 A 的信息量, $MI(F,B)$ 反映了融合图像 F 包含源图像 B 的信息量。定义融合图与源图的总互信息为:

$$FMI = MI(F,A) + MI(F,B) \quad (16)$$

FMI反映了融合图像包含红外强度图、红外偏振度图的总信息量,越大表示融合图与源图的灰度分布越相似。

2.2 实验结果和分析

为验证本文方法的有效性,开展了3组红外强度图像和红外偏振度图像的融合实验,实验结果如(图3-5)所示。

图3所示的是文献[43]中的“ground”红外强度和偏振度图像的融合实验结果。视觉效果上可以看出,红外强度图像具有丰富的树木纹理信息,红外偏振度图像具有明显的汽车和建筑物的偏振信息。图3(f)较多保留了偏振信息,但基本丢失强度信息,视觉效果最差。图3(g)虽保留了强度和偏振信息,但存在明显的失真。图3(c)、(d)、(e)、(h)、(i)均保留了强度和偏振信息,一些细节信息也得以保留,相比较而言,图3(c)所示的FWA方法具有更好的视觉效果,树木、汽车的纹理信息丰富,图像均匀,可以识别不同的区域,方便地识别红外目标,如汽车、树木等。

表4显示了图3中7种融合方法的客观评价结果。从该表可以看出,FWA方法的RE、FSSIM指标

表4 “ground”的红外强度和偏振度图融合结果客观评价
Table 4 Objective assessment of “ground” infrared - polarization fusion results

Metrics	RE	FSSIM	FMI
FWA	0.7774	1.4149	1.5462
LP	1.2245	1.3532	1.0964
GP	1.7645	1.4090	1.2368
PCA	1.6119	1.1061	1.7559
MP	0.9401	1.2618	1.0168
DWT	1.2921	1.3124	1.0137
SIDWT	1.2953	1.3649	1.0908

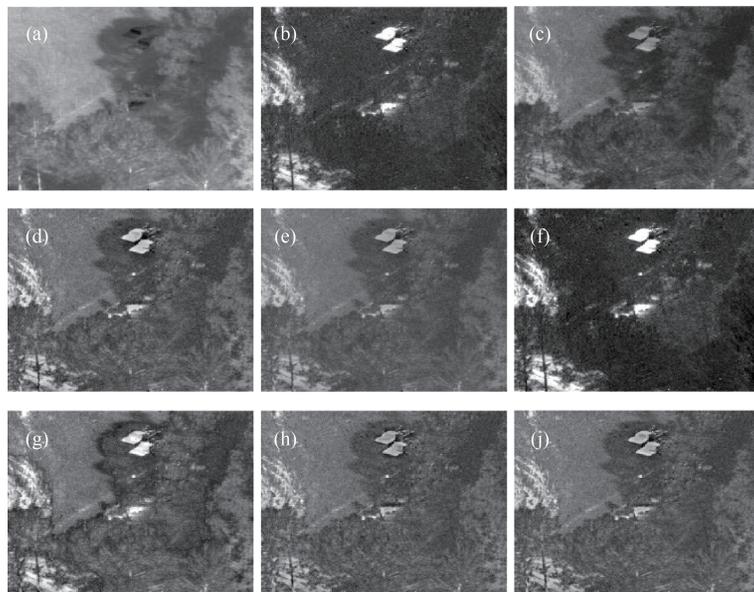


图3 “ground”的红外强度和偏振度图融合结果 (a) 红外强度图, (b) 红外偏振度图, (c) FWA 融合图, (d) LP, (e) GP, (f) PCA, (g) MP, (h) DWT, (i) SIDWT

Fig. 3 Fusion results of “ground” infrared-polarization image (a) infrared-intensity image, (b) infrared-polarization image, (c) FWA, (d) LP, (e) GP, (f) PCA, (g) MP, (h) DWT, (i) SIDWT

均高于其他方法。FMI指标仅低于PCA方法,高于其他方法。因此,该方法的融合结果包含了较多的源图像特征信息,整个融合图像清晰,对比度良好。

图4显示的是来自文献[44]的关于伪装网测量的红外图像(称为“truck”)的融合实验结果。从图4(a-b)可以清楚地看到两幅图像特征互补。在偏振度图像(图4(b))中,卡车前面覆盖有伪装网的目标明显,而在图4(a)中由于道路的亮度高于目标,几乎看不到目标。然而,强度图像(图4(a))确实显示了更清晰的云、树和地面边缘,而房屋(左)、卡车(中)和建筑(右)的屋檐具有更高的亮度。

图4(d)、(g)结合了屋檐、道路、卡车、建筑和被伪装覆盖的物体等所有高亮度物体,并具有局部一致性,但有许多变形,如云、中间屋檐和道路。图4(e-f)、(h-i)对树都有畸变。在图4(c)中,所有来自原始图像的明亮物体都被保留下来,外观没有太大的扭曲,边缘和细节也清晰,图像质量最好。

表5显示了图4中7种融合方法的客观评价结果。从该表可以看出,FWA方法得到的融合图的RE、FMI指标优于其他方法,FSSIM指标好于除PCA外的其他方法。该方法的融合结果包含了较多源图像特征信息,图像清晰,对比度良好。

表5 “truck”的红外强度和偏振度图融合结果客观评价

Table 5 Objective assessment of “truck” infrared - polarization fusion results

Metrics	RE	FSSIM	FMI
FWA	0.3253	1.7744	3.3937
LP	0.3798	1.7211	2.1439
GP	0.4080	1.7701	2.2947
PCA	0.3385	1.7955	2.7763
MP	0.3947	1.6492	1.9312
DWT	0.3915	1.6893	2.1045
SIDWT	0.3871	1.7409	2.1856

图5显示的是来自文献[45]的“car”的红外图像的融合实验结果。可以看出,汽车的红外强度图像目标对比度较好,偏振度图像中目标轮廓和边界明显。图5(f)保留的偏振信息很少,图5(g-i)在引擎盖、前挡玻璃和后视镜处分别出现畸变,图5(d-e)在主驾驶侧玻璃对比度过强,且副驾驶侧的墙体背景出现畸变。与上述方法相比,FWA方法得到的融合结果图5(c)较好保留了强度和偏振信息、图像无畸变,视觉效果较好。

表6显示了图5中7种融合方法的客观评价结果。从该表可以看出,FWA方法获得的融合图像的FSSIM、RE指标均优于其他方法,FMI指标仅比PCA低。该方法的融合结果包含了较多强度和偏振特征信息,融合图像无畸变,对比度良好。

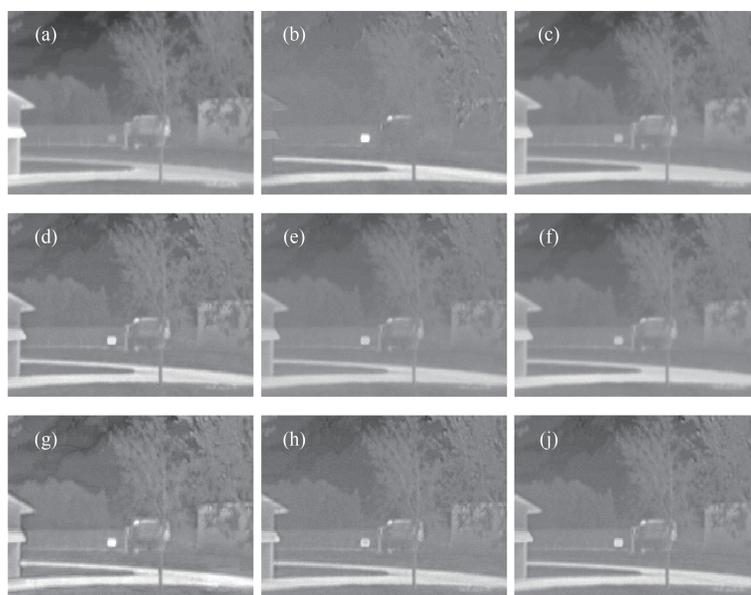


图4 “truck”的红外强度和偏振度图融合结果(a)红外强度图,(b)红外偏振度图,(c)FWA融合图,(d)LP,(e)GP,(f)PCA,(g)MP,(h)DWT,(i)SIDWT

Fig.4 Fusion results of “truck” infrared-polarization image (a) infrared-intensity image, (b) infrared-polarization image, (c) FWA, (d) LP, (e) GP, (f) PCA, (g) MP, (h) DWT, (i) SIDWT

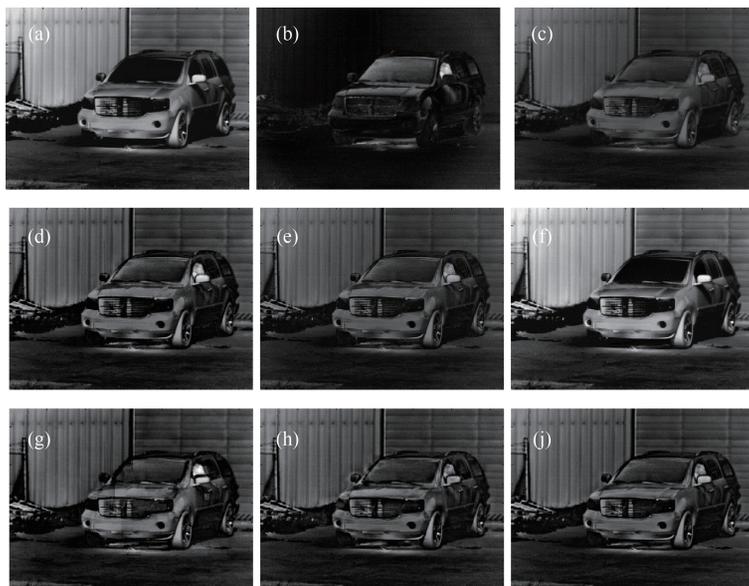


图5 “car”的红外强度和偏振度图融合结果 (a) 红外强度图, (b) 红外偏振度图, (c) FWA 融合图, (d) LP, (e) GP, (f) PCA, (g) MP, (h) DWT, (i) SIDWT

Fig.5 Fusion results of “car” infrared-polarization image (a) infrared-intensity image, (b) infrared-polarization image, (c) FWA, (d) LP, (e) GP, (f) PCA, (g) MP, (h) DWT, (i) SIDWT

表6 “car”的红外强度和偏振度图融合结果客观评价

Table 6 Objective assessment of “car” infrared - polarization fusion results

Metrics	RE	FSSIM	FMI
FWA	2. 2053	1. 2559	2. 3473
LP	2. 9673	1. 1467	1. 3457
GP	3. 0748	1. 2267	1. 5746
PCA	2. 6545	1. 1711	3. 3017
MP	2. 9885	1. 0695	1. 2487
DWT	2. 9697	1. 1477	1. 2587
SIDWT	2. 9647	1. 1764	1. 3705

3 讨论

从图2-4的视觉效果和表4-6的评价结果看, 本文所提方法生成的融合图像总体视觉效果最好, RE指标在3组实验中均优于其他融合方法, FSSIM、FMI指标总体上也优于其他方法, 较好保留了强度和偏振特征。融合实验以加权的综合相对熵构建优化适应度函数, 3组实验结果中, 基于FWA方法的融合图RE值均最小, 说明方法是有效的。3组实验数据中, 在“ground”和“car”实验中, PCA方法获得MI指标最大, “truck”实验中PCA方法获得的FSSIM指标最大, 均高于本文方法所得结果。但观察融合实验结果图发现, 图2(f)与图2(b)、图3(f)与图3(a)、图4(f)与图4(a)高度相似。对相似图像, 计算互信息MI, 表7为计算结果。MI(2a, 2f)表示图2(a)

与图2(f)的互信息, 其他类似。很明显, 图2(f)更多保留了图2(b)的偏振信息, 图3(f)更多保留了图3(a)的强度信息, 图4(f)更多保留了图4(a)的强度信息。这与视觉观察的结果一致。

表7 互信息计算结果

Table 7 Results of mutual information calculation

Metrics	MI	MI	MI	MI	MI	MI
	(2a, 2f)	(2b, 2f)	(3a, 3f)	(3b, 3f)	(4a, 4f)	(4b, 4f)
MI	0. 2669	1. 4890	1. 9571	0. 8192	2. 9449	0. 3568

这种情况的出现, 反映出PCA方法并未较好同时保留红外强度和偏振信息, 尽管FMI、FSSIM指标高于本文方法。PCA方法基于统计特性, 其性能受方差的影响很大, 它以全局方差作为信息显著性度量, 使得到的融合图像亮度方差最大。因此, 实际上在3组实验中, 综合视觉效果和客观评价结果, 本文方法在RE、FSSIM、FMI指标上均是最优的。

由于PCA存在上述问题, 下面只对FWA和另外5种算法作进一步分析。根据表4、表5、表6的指标评价结果, 对不同融合算法在各评价指标上的性能排序, 结果如表8所示。

很明显, 对三组实验数据的3个评价指标, FWA均具有最优性能, 而其他5种算法在不同实验数据中表现出的性能并不具备一致性, 例如, MP算法在“ground”图像融合中的RE指标要由于LP和DWT,

表 8 算法性能排序

Table 8 Sorting of algorithmic performance

	ground	truck	car
RE	FWA>MP>LP>DWT>SIDWT>GP	FWA>LP>SIDWT>DWT>MP>GP	FWA>SIDWT>LP>DWT>MP>GP
FSSIM	FWA>GP>SIDWT>LP>DWT>MP	FWA>GP>SIDWT>LP>DWT>MP	FWA>GP>SIDWT>DWT>LP>MP
FMI	FWA>GP>LP>SIDWT>MP>DWT	FWA>GP>SIDWT>LP>DWT>MP	FWA>GP>SIDWT>LP>DWT>MP

但在“truck”中却劣于LP和DWT。这正反映了MP、LP等算法的性能依赖于源图像特征,算法的适用性受到限制,而本文所提方法基于优化思想,对不同特征的红外偏振图像和强度图像融合,均可搜索全局解从而获得稳定的性能表现。

4 结论

红外强度图和偏振度图具有特征互补的特点,二者融合可以获得更好的图像质量,更丰富的信息,更加准确地描述目标特征。本文提出以综合相对熵为适应度函数,采用新型群体智能算法FWA对空域的加权平均法进行智能优化,并与LP、PCA、GP、MP、DWT、SIDWT方法在“ground”、“truck”、“car”3组红外图像数据上进行了融合实验,对融合结果进行了客观评价和视觉效果比较。实验结果表明:本文所提方法可以有效实现红外强度图和偏振度图的融合,较好保留了强度和偏振特征,综合视觉效果和客观评价结果,本文方法在RE、FSSIM、FMI指标上优于比较算法。

References

- [1] Gonzalez O, Katartzis A, Sahli H, et al. Pre-processing of polarimetric IR images for landmine detection[C]. In: Proceedings of the 22th Symposium on Information and, Communication Theory, 2001, pp. 39-45.
- [2] LV Sheng, YANG Feng-Bao, JI Lin-Na, et al. Infrared intensity and polarization image mimicry fusion based on the combination of variable elements and matrix theory[J]. *Opto-Electronic Engineering* (吕胜,杨风暴,吉琳娜,等.可变元素与矩阵理论结合的双模态红外图像拟态融合. *光电工程*), 2018, **45**(12):25-36.
- [3] Harchanko J S, Pezzaniti L, Chenault D., et al. Comparing a MWIR and LWIR polarimetric imager for surface swimmer detection[J]. *Proc. SPIE Optics and Photonics in Global Homeland Security IV*, 2008, **6945**: 69450X1 - 69450X11.
- [4] HE You, WANG Guo-Hong, LU Da-Jin, et al. Mutisensor information fusion with applications[M]. Publishing House of Electronics Industry(何友,王国宏,路大金,等.多传感器信息融合及应用).电子工业出版社,第二版,北京,2007.
- [5] Li S, Kang X, Fang L, et al. Pixel-level image fusion: A survey of the state of the art[J]. *Information Fusion*, 2017, **33**:100-112.

- [6] Stathaki T. Image fusion: Algorithms and applications[M]. 1st ed. 2008.
- [7] Kaur H, Kaur N. Review of image fusion and its techniques [J]. *International Journal of Advanced Research in Computer Science*, 2017, **8**(5):1870-1876.
- [8] Burt P J, Adelson E H. The laplacian pyramid as a compact image code [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 1983, **31**(4):532-540.
- [9] Burt B P J. A gradient pyramid basis for pattern selective image fusion [C]// Society for Information Display Conference. 1992.
- [10] Lu H, Zhang L, Serikawa S. Maximum local energy: An effective approach for multisensor image fusion in beyond wavelet transform domain [J]. *Computers & Mathematics with Applications*, 2012, **64**(5):996-1003.
- [11] Naidu V P S, Raol J R. Pixel-level image fusion using wavelets and principal component analysis [J]. *Defence Science Journal*, 2008, **58**(3): 338-352.
- [12] Xin W, Wei Y L, Fu L. A new multi-source image sequence fusion algorithm based on SIDWT[C]// Seventh International Conference on Image & Graphics. 2013.
- [13] ZOU Qin, JIA Yong-Hong. Fusion of remote sensing images based on morphological pyramid (and its performance evaluation [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University* (邹勤, 贾永红. 一种基于形态金字塔的遥感影像融合方法及其性能评价. *武汉大学学报(信息科学版)*), 2006, **31**(11):971-974.
- [14] Huang W, Jing Z. Evaluation of focus measures in multi-focus image fusion[J]. *Pattern Recognition Letters*, 2007, **28**: 493-500.
- [15] AN Fu, YANG Feng-Bao, LI Wei-Wei, et al. Fusion of infrared polarization and intensity images based on DWT [J]. *Electro-Optic Technology Application* (安富,杨风暴,李伟伟,等.基于DWT的红外偏振与光强图像的融合. *光电技术应用*), 2013, **28**(2):18-22.
- [16] CHEN Wei-Li, WANG Xia, JIN Wei-Qi, et al. Approach to fusing MWIR polarization image based on wavelet packet transform [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology* (陈伟力,王霞,金伟其,等.基于小波包变换的中波红外偏振图像融合研究. *北京理工大学学报*), 2011, **31**(5):578-582.
- [17] Infrared polarization image fusion with non-sampling Shearlets [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)* (周强,赵巨峰,冯华君,等.非下采样剪切波的红外偏振图像融合. *浙江大学学报(工学版)*), 2014, **48**(8):1508-1516.
- [18] An Fu, YANG Feng-Bao, NIU Tao. A fusion model of infrared polarization images based on fuzzy logic and (feature difference driving [J]. *Infrared Technology* (安富), 杨风暴,牛涛.模糊逻辑与特征差异驱动红外偏振图

- 像融合模型. 红外技术), 2014, **36**(4):304-310.
- [19] LV Sheng, YANG Feng-Bao, JI Lin-Na, *et al.* Combination fusion of multi-types mimic variables of infrared (intensity and polarization image)[J]. *Infrared and Laser Engineering*(吕胜, 杨风暴, 吉琳娜),等. 红外光强与偏振图像多类拟态变元组合融合. 红外与激光工程), 2018, **47**(05):63-72.
- [20] Research on Theory and Model of Mimic Fusion Between Infrared Polarization and Intensity Images [J]. *Journal Of North University Of China(Natural Science Edition)*(杨风暴. 红外偏振与光强图像的拟态融合原理和模型研究. 中北大学学报(自然科学版)), 2017, **38**(1):1-8.
- [21] Kong J, Zheng K, Zhang J, *et al.* Multi-focus image fusion using spatial frequency and genetic algorithm [J]. *International Journal of Computer Science and Network Security*, 2008, **8**(1): 220-224.
- [22] Zhang L, Zhang X M, Xu X B, *et al.* Quantum-inspired particle swarm optimization algorithm with performance evaluation of fused images [J]. *Optica Applicata*, 2013, **43**(4) pp. 679-691.
- [23] LI Yi, WU Xiao-Jun. A novel image fusion method using self-adaptive dual-channel pulse coupled neural networks based on PSO evolutionary learning [J]. *Acta Electronica Sinica*(李奕, 吴小俊. 粒子群进化学习自适应双通道脉冲耦合神经网络图像融合方法研究. 电子学报), 2014, **42**(2):217-222
- [24] ZHANG Xin-Man, HAN Jiu-Qiang, WANG Yong. A Multifocus Image Fusion Algorithm for Adaptive Genetic Search [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*(张新曼, 韩九强, 王勇. 一种遗传搜索块寻优的不同聚焦点图像融合算法. 电子与信息学报), 2006, **28**(11): 2054-2057.
- [25] Kumar M P, Kumar P R. Image fusion of mammography images using meta heuristic method particle swarm optimization (PSO) [J]. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2016, **11**(9): 6254-6258.
- [26] Tan Y, Zhu Y. Fireworks algorithm for optimization [C]. In *Advances in Swarm Intelligence, Lecture Notes in Computer Science*, 2010, **6145**:355-364.
- [27] Pei Y, Zheng S Q, Tan Y, *et al.* An empirical study on influence of approximation approaches on enhancing fireworks algorithm [C]. *Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, 2012 IEEE International Conference on. IEEE, 2012.
- [28] Ding K, Zheng S Q, Tan Y. A GPU-based parallel fireworks algorithm for optimization [J]. *ACM Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO 2013) - a recombination of 22nd International Conference on Genetic Algorithms (ICGA) and the 18th Annual Genetic Programming Conference (GP)*, Amsterdam, The Netherlands, July 06-10, 2013. pp. 1-8.
- [29] Zheng S Q, Janecek A, Tan Y. Enhanced fireworks algorithm [C]. *Evolutionary Computation (CEC)*, 2013 IEEE Congress on. IEEE, 2013. 2069-2077.
- [30] Zheng S Q, Janecek A, Li J Z, *et al.* Dynamic search in fireworks algorithm [C]. *Evolutionary Computation (CEC)*, 2014 IEEE Congress on. IEEE, 2014: 3222-3229.
- [31] Li J Z, Zheng S Q, Tan Y. Adaptive fireworks algorithm [C]//*Evolutionary Computation (CEC)*, 2014 IEEE Congress on. IEEE, 2014: 3214-3221.
- [32] Yu C, Kelley Lingchen, Zheng S Q, *et al.* Fireworks algorithm with differential mutation for solving the cec 2014 competition problems [C]//*Evolutionary Computation (CEC)*, 2014 IEEE Congress on. IEEE, 2014: 3238-3245.
- [33] Yu C, Li J, Tan Y. Improve enhanced fireworks algorithm with differential mutation [C]//*Systems, Man and Cybernetics (SMC)*, 2014 IEEE International Conference on. IEEE, 2014: 264-269.
- [34] Li J Z, Tan Y. Orienting mutation based fireworks algorithm [C]. 2015 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC'2015), May 25-28, 2015, Sendai International Center, Sendai, Japan, pp.1-8
- [35] Zheng S, Li J, Janecek A, *et al.* A cooperative framework for fireworks algorithm [C]. *IEEE/ACM Transactions on Computational Biology & Bioinformatics*, 2015:1-1.
- [36] Li J, Zheng S, Tan Y. The effect of information utilization: introducing a novel guiding spark in the fireworks algorithm [C]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2016:1-1.
- [37] Bejinaru S I, Luca R, Costin H. Nature-inspired algorithms based multispectral image fusion [C]. IEEE, 2016.
- [38] 谭营. 烟花算法引论 [M]. 科学出版社, 北京, 2015.
- [39] Li M, Dong Y. Review on technology of pixel-level image fusion [C]. IEEE, 2014.
- [40] 林冬梅. PCNN与粗集理论在生物细胞图像处理中的应用研究 [D]. 兰州大学, 2009.
- [41] Wang Z, Bovik A C, Sheikh H R, *et al.* Image quality assessment: from error visibility to structural similarity [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, **13**(4): 600-611.
- [42] Qu G, Zhang D, Yan P. Information measure for performance of image fusion [J]. *Electronics Letters*, 2002, **38**(7):313.
- [43] Scott Tyo J, Goldstein D L, Chenault D B, *et al.* Review of passive imaging polarimetry for remote sensing applications [J]. *Applied Optics*, 2006, **45**(22):5453-5469.
- [44] Forssell G, Hedborg-Karlsson E. Measurements of polarization properties of camouflaged objects and of the denial of surfaces covered with cenospheres [J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, **5075**:246-258.
- [45] Lavigne D A, Breton M. A new fusion algorithm for shadow penetration using visible and midwave infrared polarimetric images [C]. IEEE, 2010.