

doi:10.3788/gzxb20174612.1210002

基于 DTCWT 和稀疏表示的红外偏振与 光强图像融合

朱攀,刘泽阳,黄战华

(天津大学 精密仪器与光电子工程学院,光电信息技术教育部重点实验室,天津 300072)

摘 要:针对红外偏振与光强图像彼此包含共同信息和特有信息的特点,提出了一种基于双树复小波变换和稀疏表示的图像融合方法.首先,利用双树复小波变换获取源图像的高频和低频成分,并用绝对值最大值法获得融合的高频成分;然后,用低频成分组成联合矩阵,并使用 K-奇异值分解法训练该矩阵的冗余字典,根据该字典求出各个低频成分的稀疏系数,通过稀疏系数中非零值的位置信息判断共有信息和特有信息,并分别使用相应的规则进行融合;最后,将融合的高低频系数经过双树复小波反变换得到融合图像.实验结果表明,本文提出的融合算法不仅能较好地凸显源图像的共有信息,而且能很好地保留它们的特有信息,同时,融合图像具有较高的对比度和细节信息.

关键词:红外偏振图像;图像融合;稀疏表示;双树复小波变换;K-奇异值分解

中图分类号: TP391.4

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)12-1210002-9

Infrared Polarization and Intensity Image Fusion Based on Dual-Tree Complex Wavelet Transform and Sparse Representation

ZHU Pan, LIU Ze-yang, HUANG Zhan-hua

(Key Laboratory of Opto-electronic Information Technology, Ministry of Education,
Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Considering that infrared polarization and intensity image contain common information and their own unique information, a method of image fusion based on Dual-Tree Complex Wavelet Transform and sparse representation was proposed. Firstly, the high and low frequency components of source images were obtained by using Dual-Tree Complex Wavelet Transform, and the high frequency components were combined by absolute maximum method. Secondly, a joint matrix was constructed by low frequency components, and a redundant dictionary was acquired by using K-singular value decomposition to train the matrix. Based on the dictionary, the sparse coefficient of low frequency component was calculated, and the common information and unique information were judged by the location of non-zero value of the sparse coefficient, and two kinds of information was merged by proper fusion rules. Finally, the fusion image was obtained by performing inverse Dual-Tree Complex Wavelet Transform on the fused high and low frequency components. The experimental results show that the proposed fusion method can highlight the common information of source images and keep their own unique information, and the fusion image own higher contrast and clearer details.

Key words: Infrared polarization image; Image fusion; Sparse representation; Dual-Tree Complex Wavelet Transform; K-singular value decomposition

OCIS Codes: 100.2000; 100.7410; 350.2660

基金项目:国家自然科学基金(Nos.61475113, 61275009)资助

第一作者:朱攀(1985-),男,博士研究生,主要研究方向为红外偏振成像技术及其图像处理算法.Email:zhuyangpp@163.com

导师(通讯作者):黄战华(1965-),男,教授,博导,主要研究方向为光电子信息、图像处理与模式识别、计算机应用与工业控制等.Email: zhanhua@tju.edu.cn

收稿日期:2017-01-03; **录用日期:**2017-03-27

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

通过检测场景向外辐射的能量,传统红外成像技术能有效地探测到隐藏在背景中的红外目标,由于它具有被动、全天候等优点,已被广泛应用于安防、电力检修等领域.然而,红外强度图像一般比较模糊,且对比度不高,当目标温度与背景温度相近时,传统红外探测手段可能会失效^[1].红外偏振成像由于能揭示目标表面的形状、阴影以及粗糙度等特性,且受大气和复杂背景的影响很小,因此,它能抑制复杂背景,提高目标的对比度和识别率^[2-3].红外偏振图像和红外强度图像具有很好的互补性,例如:红外强度图像中的目标轮廓与区域比较模糊,而红外偏振图像的目标轮廓较清晰,且不同区域很容易区分^[3];当目标和场景的温差较小时,红外强度图像中的目标信息比较昏暗,而在红外偏振图像中能轻松地区分目标和背景区域^[4].也就是说,在同一个场景下,红外偏振图像和红外强度图像具有一定的差异性,且都不能独立地描述场景中完整的红外信息,但是它们具有良好的互补性.因此,对红外偏振与强度图像进行恰当的融合将有助于对场景的红外信息进行更可靠、更准确的描述,并有利于提高红外探测的有效性^[2-3].

随着融合技术的发展,人们根据不同需求提出了许多融合算法.由于执行的简单性和有效性,多尺度变换已成为最广泛使用的图像融合工具.基于多尺度变换的典型融合算法包括:拉普拉斯变换^[5],小波变换^[6],剪切波变换^[7],形态学^[8-9],非下采样轮廓波变换^[10-11],经验模态分解^[12-13],支持度变换^[14-15]等.这些算法先将源图像分解为不同的频率成分,然后使用适当的融合规则整合这些频率成分,在一定条件下,它们能获得较好的融合结果.然而,红外偏振图像是由多幅不同偏振方向的红外强度图像通过斯托克斯变换获得,使得红外偏振图像和红外强度图像具有很强的相关性,它们之间不仅包含大量的共有信息,而且拥有各自的特有信息.因此,单独使用多尺度方法很容易引起特有信息的损失和共有信息的平滑.神经网络算法在图像融合领域也具有广泛的应用,例如脉冲耦合神经网络^[16-17]等.但是,它们存在着其固有缺点,如结构设计不完善性、参数设定的不确定性等都会影响其融合性能,并且它们不能区分源图像之间的共有和特有特征信息.以主成分分析和独立成分分析为代表的基于替代思想的融合算法^[18-19]也获得长足发展,然而,通过抽取源图像的主要信息进行融合很容易损失源图像的细节特征,进而使融合结果趋于平滑.

稀疏表示能利用简单的稀疏系数表征源图像的特征信息,通过对稀疏系数的合理整合,可以重构出融合图像^[20-23].传统的稀疏表示方法在信息替代的过程中很容易损失高频信息,并且这些用于表征特征的稀疏系数不能区分源图像之间的共有信息和特有信息.为了能对源图像的共有信息和特有信息分别进行处理,并在融合结果中较好地保留这两种信息,于楠楠^[24-25]率先使用联合稀疏表示法获取源图像的共同稀疏系数和特有稀疏系数,并对这些稀疏系数分别进行融合处理,最后获取融合图像,但是该方法存在高频细节平滑的缺点,这一缺点普遍存在于基于稀疏表示的图像融合算法中^[23].杨斌^[26]使用同时正交匹配追踪法(Simultaneous Orthogonal Matching Pursuit, SOMP)获得包含共有信息和特有信息的稀疏系数,并获得了较好的融合结果,但是此方法仍然存在着高频成分损失的缺点.同时,这两种稀疏算法的复杂度较高.为了抑制稀疏表示平滑图像细节信息,刘羽^[23]首先利用多尺度工具抽取并保留细节信息,然后用稀疏表示处理图像的低频成分,虽然该方法获得了较好的融合结果,但是它仍没有考虑图像之间的独有和共有特征信息,其融合结果难免存在一些信息的损失.

本文基于于楠楠^[24-25]、杨斌^[26]和刘羽^[23]的算法思想及其优缺点,提出了一种基于双树复小波变换(Dual-Tree Complex Wavelet Transform, DTCWT)和稀疏表示(Sparse Representation, SR)的图像融合方法,首先,使用DTCWT分别获取源图像的高频成分和低频成分;然后,使用最大值法对高频成分进行合并,使用提出的SR方法获取能表征低频成分共有信息和特有信息的稀疏系数,再对共有和特有稀疏系数分别进行融合处理,并获得融合的低频成分;最后,使用DTCWT反变换获得融合图像.该方法不仅能突出图像的共有信息,也能很好地保持源图像中的高频细节信息和特有信息.实验结果表明,本文提出的融合算法能较好地综合红外偏振与光强图像的特征信息,并且融合图像具有较高的对比度和细节信息.

1 红外偏振信息的获取

任何目标物在反射和辐射光波时都会具有特定的偏振特性,其偏振特性由目标物本身构成材料的理化特征、粗糙度、含水量等共同决定,因此,偏振成像能揭示目标表面的形状、阴影以及粗糙度等特性,且受大气

和复杂背景的影响很小,同时能抑制复杂背景,提高目标的对比度和识别率^[2,3].由于探测波长越长,目标物所表现的偏振特性越明显^[4],因此,对同一场景,红外光能更好地反映出目标物的偏振特性,其红外偏振图像能很好地弥补红外强度图像中目标轮廓模糊、易受复杂背景干扰等缺点.

目标物辐射光的偏振态可由 Stokes 参量 $(I, Q, U, V)^T$ 表示为

$$\begin{aligned} I &= \langle E_x^2(t) \rangle + \langle E_y^2(t) \rangle \\ Q &= \langle E_x^2(t) \rangle - \langle E_y^2(t) \rangle \\ U &= 2\langle E_x(t)E_y(t) \cos [\delta_y(t) - \delta_x(t)] \rangle \\ V &= 2\langle E_x(t)E_y(t) \sin [\delta_y(t) - \delta_x(t)] \rangle \end{aligned} \quad (1)$$

式中 $\langle E^2 \rangle$ 为时间的平均结果, E_x, E_y 表示光矢量在 x 轴和 y 轴方向的振幅分量, E_x 与 E_y 的相位差 $\delta = \delta_y(t) - \delta_x(t)$, I 为光波的总光强, Q 表示 x 轴和 y 轴上线偏振光的光强差, U 表示 $\delta_y(t)$ 方向线偏光与 $\delta_x(t)$ 方向线偏光的光强差, V 表示圆偏振光.由于自然界中物体的圆偏振分量非常微小,一般忽略不计.所以表示场景偏振信息的偏振度公式可表示为

$$P = (Q^2 + U^2)^{1/2} / I \quad (2)$$

通过周期性地改变红外相机前面起偏器的起偏角或相位延迟期的延迟角,可以有目的地选取红外辐射光波不同偏振方向的偏振信息,当红外相机记录了场景 3~4 个不同角度线偏振光的红外光强信息时,就可根据式(1)和(2)求出场景的红外偏振信息 P .在偏振成像试验中,一般选取或者偏振夹角所获取的场景信息来解算其偏振信息.由于偏振信息是由多个强度信息求解获得的,因此它与强度信息有很大的关联,且能反映出强度信息不具有的一些特征信息^[1-3].

2 双树复小波变换和图像稀疏表示方法

2.1 双树复小波变换

DTCWT 是 N.G.Kingsbury^[27] 提出的一种优秀的图像分析方法,相比于离散小波变换,它具有更多的方向选择性和平移不变形,且能在多方向上对图像进行多分辨率分析,已被广泛的应用于各种图像处理中^[28-29].DTCWT 是采用一定规则的二叉树结构设计的,其中,一路的小波变换作为实部,一路的小波变换作为虚部,两个分解树(树 A 和树 B)是平行的,假如树 A 给出实部,树 B 则给出虚部.图 1 为 DTCWT 的分解示意图.

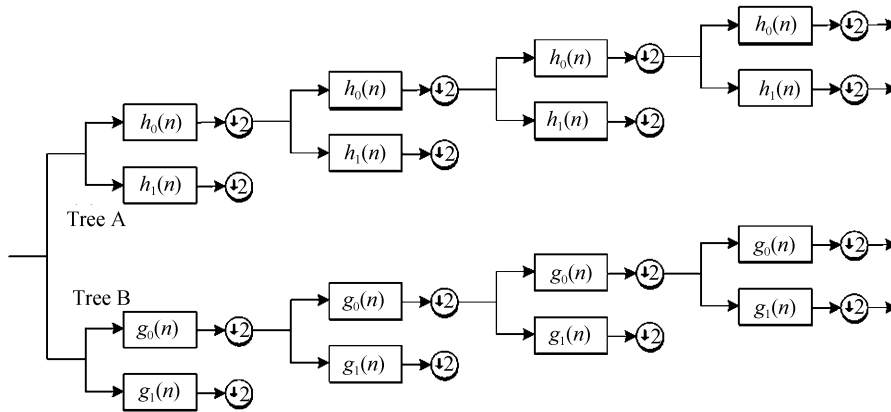


图 1 DTCWT 的分解结构

Fig.1 The decomposition structure of DTCWT

图中, $h_0(n)$ 和 $g_0(n)$ 分别为树 A、B 的低通滤波器, $h_1(n)$ 和 $g_1(n)$ 为对应的高通滤波器,且 $h_0(n)$ 和 $h_1(n)$ 、 $g_0(n)$ 和 $g_1(n)$ 分别是共轭正交的滤波器对.其对应的尺度函数和小波函数分别为 $\varphi_h(t)$ 、 $\Psi_h(t)$ 、 $\varphi_g(t)$ 和 $\Psi_g(t)$, 其中是希尔伯特变换. $H_0(\omega)$ 和 $G_0(\omega)$ 分别是 $h_0(\omega)$ 和 $h_0(\omega)$ 的傅里叶变换,且它们满足

$$G_0(\omega) = H_0(\omega) e^{-j(\omega/2)} \quad (|\omega| < \pi) \quad (3)$$

对应的小波对为希尔伯特变换,可表示为

$$\psi_g(t) = H\{\psi_h(t)\} \quad (4)$$

在第一层变换中,树 A 相对于树 B 的滤波器延迟一个采样间隔,以确保树 B 的下采样正好获取树 A 上采样所丢失的采样值;在第一层之后的各层中,要求树 A 和树 B 滤波器的幅频响应均相等,且它们的相频响应彼此有 0.5 个周期的延迟.为保证线性相位,树 A 和树 B 的树长一个为奇数,一个为偶数.这样,树 A 和树 B 的小波变化组成了一个 Hilbert 变换对,所以 DTCWT 具有频谱单边性、频率无偏性以及多方向性等优点.

为保证 DTCWT 的方向选择性,使用方向滤波器对双树结构子带的每一层进行 $\pm 15^\circ$ 、 $\pm 45^\circ$ 和 $\pm 75^\circ$ 方向的分解,利用 6 个不同方向的分量取代原来的一个分量,这样能很好地表征源图像中目标和背景的高频信息.

因此,输入图像信号 $f(x, y)$ 经 DTCWT 分解后,第 j 层的复系数可表示为

$$f(x, y)^j = f(x, y)_{iA}^j + i f(x, y)_{iB}^j \quad (5)$$

$f(x, y)_{iA}^j$ 和 $f(x, y)_{iB}^j$ 分别为树 A 和树 B 上第 j 层获取的分解系数.

对 DTCWT 的分解信息进行恢复时,在每一棵树上需使用与分解滤波器具有完全重构特性的双正交滤波器,并沿每棵树分解的反方向进行数据重构,最后取两棵树输出结果的平均值,以保证近似的平移不变性.

本文利用具有优异特性的 DTCWT 对源图像进行多尺度分解,以抽取源图像中丰富的细节和纹理信息,并将其保留在最后的融合图像中.

2.2 图像稀疏表示

图像的稀疏表示是使用过完备字典中少量原子的线性组合表征图像的主要信号特征,当原子数目按照设计的要求最少时,该线性组合就为稀疏表示,其数学模型为^[30]

$$\min_{\alpha} \|\alpha\|_0 \quad \text{s.t.} \quad \|Y - D\alpha\|_q \leq \epsilon \quad (6)$$

式中 $Y \in R^n$ 为源列信号, $D \in R^{n \times m}$ 为过完备字典, m 表示字典中原子的个数, α 为对应源信号的稀疏系数, ϵ 为源信号与稀疏表示重构信号的误差上限, $\min \|\cdot\|_0$ 表示使用字典中最少的原子数目.

在对图像进行稀疏表示时,需要考虑获取过完备字典的方法和获取稀疏系数的优化算法.本文使用 K-奇异值分解(K-singular value decomposition, K-SVD)^[34] 算法获取待处理信号的过完备字典,并使用正交匹配追踪法^[32] (Orthogonal Matching Pursuit, OMP) 获取信号的稀疏系数,该系数可表征信号的特征.

3 图像融合方法

图 2 为本文提出的红外偏振图像与强度图像融合框架,其实现步骤为:

步骤 1: 使用 DTCWT 分别获取红外偏振图像 (Infrared Polarization Image) 和红外强度图像 (Infrared Intensity Image) 的高频系数 (High-pass Coefficients) 和低频系数 (Low-pass Coefficients);

步骤 2: 利用最大值规则 (Fusion Rule Based on Maximum) 整合对应的高频系数,使用基于稀疏表示的方法 (Fusion Rule Based on SR) 合并低频系数.这两种融合规则的具体实现方法将在随后的两小节中给出详细的描述.

步骤 3: 对获得的融合低频系数和高频系数进行 DTCWT 反变换 (Inverse DTCWT), 并得到最后的融合图像 (Fusion Image).

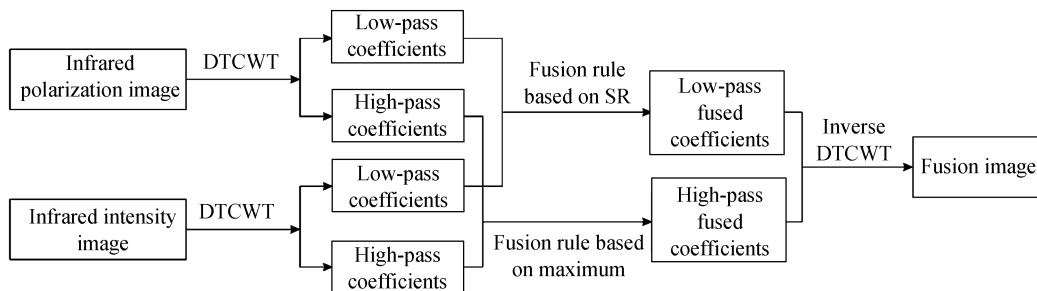


图 2 图像融合框架

Fig.2 Image fusion framework

3.1 基于最大值法的高频系数融合

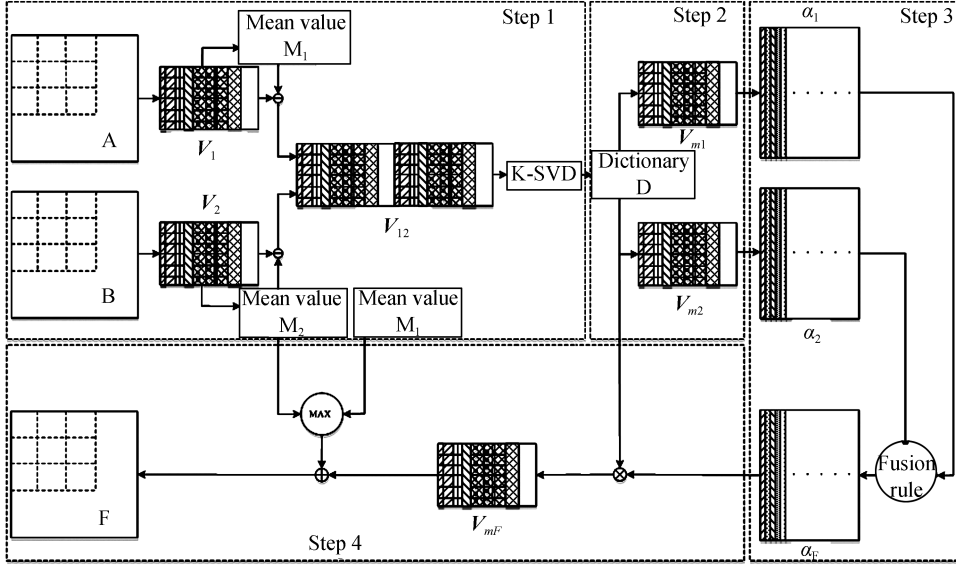
由 DTCWT 抽取的各层高频系数包含源图像中大量的细节,本文使用绝对值最大值法融合高频系数

$$\text{coefs}_{\text{HF}} = \begin{cases} \text{coefs}_{\text{HA}} & |\text{coefs}_{\text{HA}}| > |\text{coefs}_{\text{HB}}| \\ \text{coefs}_{\text{HB}} & \text{else} \end{cases} \quad (7)$$

式中, coef_{HA} 和 coef_{HB} 分别红外偏振和强度图像的高频系数, coef_{HF} 为融合的高频系数, 最后, 使用一致验证法^[13] 消除融合时产生的孤立点和区域, 得到最后的高频融合系数。

3.2 基于稀疏表示的低频系数融合

红外偏振和强度图像的低频成分中包含大量的共有成分和特有成分, 为了将这两成分分别进行处理, 本文提出了一种新的基于稀疏表示的融合框架, 如图 3 所示. 为方便描述, 该部分分为 4 个步骤: 1) 训练字典; 2) 计算稀疏系数; 3) 合并稀疏系数; 4) 获取融合低频图像。



Step 1. Train dictionary; Step 2. Calculate sparse coefficients; Step 3. Combine sparse coefficients; Step 4. Obtain fused low component

图 3 低频成分融合框架

Fig.3 Fusion framework of low component

3.2.1 获取过完备字典和稀疏系数

为了使源图像使用相同的过完备字典, 按照图 3 中步骤 1 的方法训练字典^[24-25]. 首先对两个低频图像 (A, B) 进行滑动窗口 (8×8) 分块 (步长为 1), 并将方块排列成列向量矩阵 V_1 和 V_2 , 再对矩阵中的每一列减去该列的均值 (M_1, M_2), 得到列向量矩阵 V_{m1} 和 V_{m2} , 并将其合并为联合矩阵 V_{12} , 使用 K-SVD 训练该矩阵获得字典 D .

然后, 使用 OMP^[32] 算法分别得到 V_{m1} 和 V_{m2} 的稀疏系数矩阵 α_1 和 α_2 .

3.2.2 稀疏系数融合方法

红外偏振图像是由多幅不同线偏方向的红外强度图像计算获得的, 因此, 它们具有大量的共有特征信息, 并且有各自的特有特征信息, 这两种信息仍然存在于它们的低频成分中。

$$V_{m1i} = D\alpha_{1i} = D \begin{bmatrix} 0 \\ \alpha_{1i}^c \\ 0 \\ \vdots \\ \alpha_{1i}^p \\ 0 \end{bmatrix}; V_{m2i} = D\alpha_{2i} = D \begin{bmatrix} 0 \\ \alpha_{2i}^c \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \alpha_{2i}^p \end{bmatrix} \quad (8)$$

式(8)中, α_{1i} 、 α_{2i} 、 V_{m1i} 和 V_{m2i} 分别是 α_1 、 α_2 、 V_{m1} 和 V_{m2} 的第 i ($i=1, 2, \dots, N$) 列向量, 其中下标中的 1、2 对应不同的两组信息, 由字典 D 和稀疏系数就可以重构源信号. 两组稀疏系数中非零值的位置各有不同, 将具有相同非零位置的 α_{1i}^c 和 α_{2i}^c 视为 V_{m1i} 和 V_{m2i} 的共有特征信息, 将非零位置不相同的 α_{1i}^p 、 α_{2i}^p 视为 V_{m1i} 和 V_{m2i} 的各自特有特征信息. α_{1i}^c 、 α_{2i}^c 、 α_{1i}^p 和 α_{2i}^p 的绝对值大小可表征该特征信息的强弱。

共有稀疏系数 α_{1i}^c 和 α_{2i}^c 说明两源信号都包含相同的特征信息, 但是它们之间存在特征强弱的差异, 特征

较强的系数更能凸显共有的特征信息,因此,本文使用保留绝对值最大值的方法选取特征较强的共有信息

$$\alpha_{Fi} = \begin{cases} \alpha_{q_i}; & |\alpha_{q_i}| > |\alpha_{e_i}| \quad \text{or} \quad (|\alpha_{q_i}| = |\alpha_{e_i}| \quad \text{and} \quad \alpha_{q_i} > \alpha_{e_i}) \\ \alpha_{e_i}; & \text{else} \end{cases} \quad (9)$$

$\alpha_{q_i}^p$ 和 $\alpha_{e_i}^p$ 是特有稀疏系数这些信息应保留在最后的融合结果中.文中根据源图像之间共有信息的特点,对特有稀疏系数进行融合,不仅能很好地保留特有信息,而且使融合结果更协调自然.

$$\alpha_{Fi} = (\alpha_{q_i} \sum_{i=1}^N |\alpha_{q_i}| + \alpha_{e_i} \sum_{i=1}^N |\alpha_{e_i}|) / \max(\sum_{i=1}^N |\alpha_{q_i}|, \sum_{i=1}^N |\alpha_{e_i}|) \quad (10)$$

最后的融合稀疏系数是融合的特有稀疏系数与融合的共有稀疏系数的和值

$$\alpha_{Fi} = \alpha_{q_i} + \alpha_{e_i} \quad (11)$$

在获取了融合稀疏系数之后,利用共用字典 D ,就可获得第 i 列的融合信息

$$V_{mFi} = D\alpha_{Fi} \quad (12)$$

3.2.3 获取融合低频图像

如框架中的步骤 4,首先计算 V_1 和 V_2 中各相同列的均值(M_1, M_2)的最大值,并将该最大值加到 V_{mF} 的对列.然后,将获得的每一个融合列向量变为方阵,并根据方阵抽取的方法置于图像相应的位置,再求取每个位置上出现的所有方阵的均值,该均值即为融合的低频系数.

4 融合实验

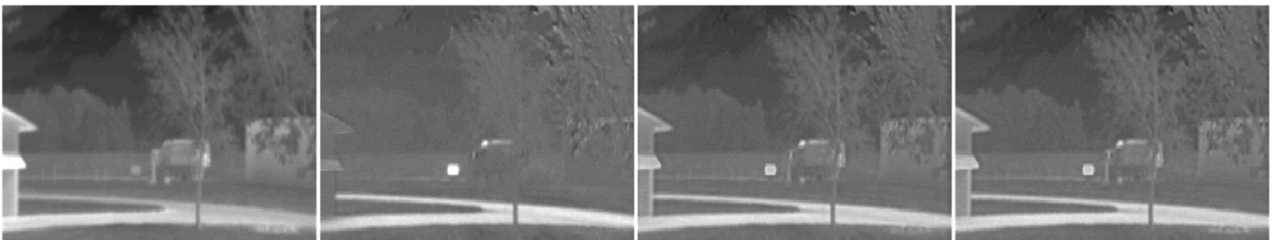
4.1 实验设置

为验证本文算法的可行性和有效性,针对两组红外偏振与强度图像^[33],选取 4 种不同类型的稀疏融合算法^[20,23-24,26]和 5 种的多尺度融合算法^[11,12,14,16,28]与本文算法进行比较.为方便讨论,将 9 种参考算法简记为:常规的稀疏融合方法^[20]—SR,基于多尺度与稀疏表示的融合方法^[23]—DTCWT-SR,基于联合稀疏表示的融合方法^[24]—JSR,基于同时正交匹配跟踪的融合方法^[26]—SOMP,基于 NSCT 的融合方法^[11]—NSCT,基于经验模态分解的融合方法^[12]—BEMD,基于支持度变换的方法^[14]—SVT,基于 NSCT 与 PCNN 的方法^[16]—NSCT-PCNN,基于 DTCWT 的融合方法^[28]—DTCWT. SR, JSR, DTCWT-SR, SOMP, NSCT-PCNN, BEMD 和 SVT 算法严格按照文献中所述的融合方法,NSCT 和 DTCWT 的分解层数设定为 4 层,且高频成分使用最大值法融合,低频成分使用加权均值法融合.本文算法的参数设置为:DTCWT 分解层数为 4,训练字典的大小为 64256,信号重构误差.

为了更好的评判实验结果的优劣,使用信息熵(Information Entropy, IE)、标准差(Standard Deviation, SD)、空间频率(Space Frequency, SF)和平均梯度(Average Gradient, AG)^[13]4 种客观图像质量指标对各算法的融合结果进行评价,这些指标的特点是:熵值越大,图像信息更丰富;标准差越大,图像纹理细节更丰富;空间频率越大,图像更清晰且细节更丰富;平均梯度越大,图像梯度信息更大,特征区域更清晰.

4.2 实验结果及分析

第一组,红外偏振和强度图像的融合结果如图 4 所示,图(a)和(b)分别是红外偏振与强度图像.从主观视觉效果来看,JSR 算法此时失效,因为其融合图像中的各种特征过于明亮且出现许多黑方块,影响人眼视觉.虽然其他 8 种参考算法和本文算法均能成功地融合源图像,但通过仔细的观察,可以发现本文算法的融合结果要优于上述的 7 种参考算法,例如,基于多尺度的参考算法均损失了一些红外偏振和强度信息,如偏振图像左边屋檐,强度图像中间的亮方块和弯曲的道路;SR 和 SOMP 的融合结果也损失了大量的红外偏振信息,尤其是偏振图像左边远处的树木和云,以及右上角的树.DTCWT-SR 和本文算法很好地保留了源图像中的偏振信息和强度信息,整幅图像更加清晰自然.



(a) Infrared polarization image

(b) Infrared intensity image

(c) DTCWT

(d) NSCT

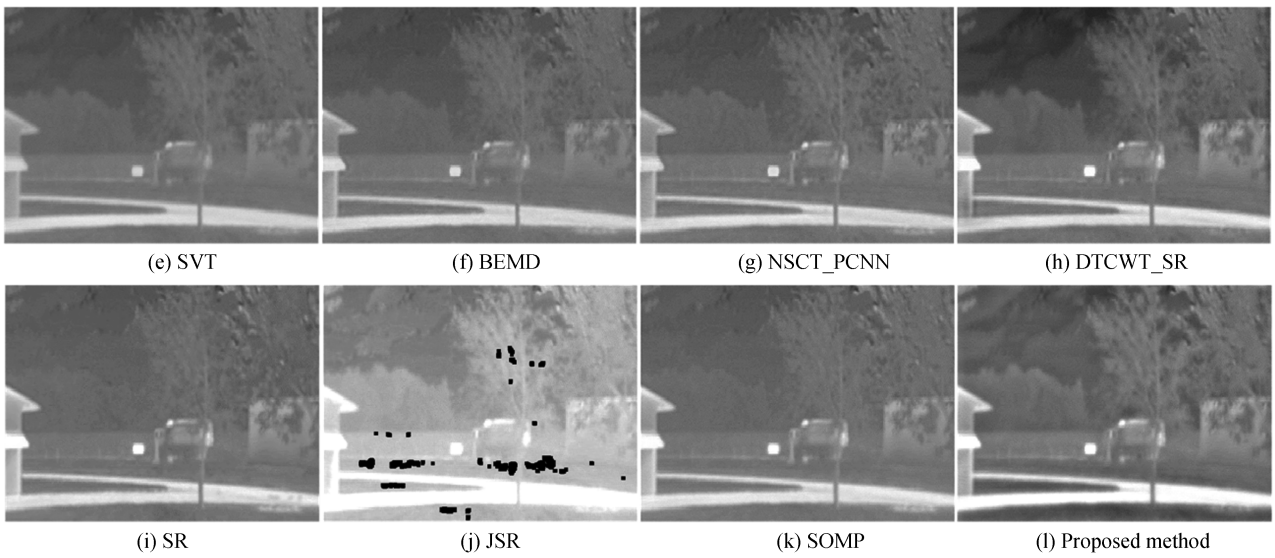


图 4 第一组红外偏振与强度图像融合实验

Fig.4 The first fusion experiment of infrared polarization and intensity image

第二组,红外偏振和强度图像的融合结果如图 5 所示.从主观视觉效果来看,10 种算法均能合并源图像中的特征信息,但是 JSR 的融合结果中仍然有一些缺陷,例如车辆背后右边的墙出现一些不协调的暗区域,图像下方也有一些融合失效的黑方块.DTCWT 和 NSCT 的融合结果具有较差的对比度,同时也损失了许多红外信息,例如图像左上的墙和车头的红外信息大量流失;SVT 不仅有较差的对比度,而且整幅图像过于平滑;NSCT-PCNN 虽然整体视觉效果较好,但是它仍然损失了一些车窗的偏振信息;BEMD 在一些区域引入了抖动,使图像显得不自然;DTCWT-SR 不仅产生了不理想的暗区域,且没有很好地显示车窗和后视镜等

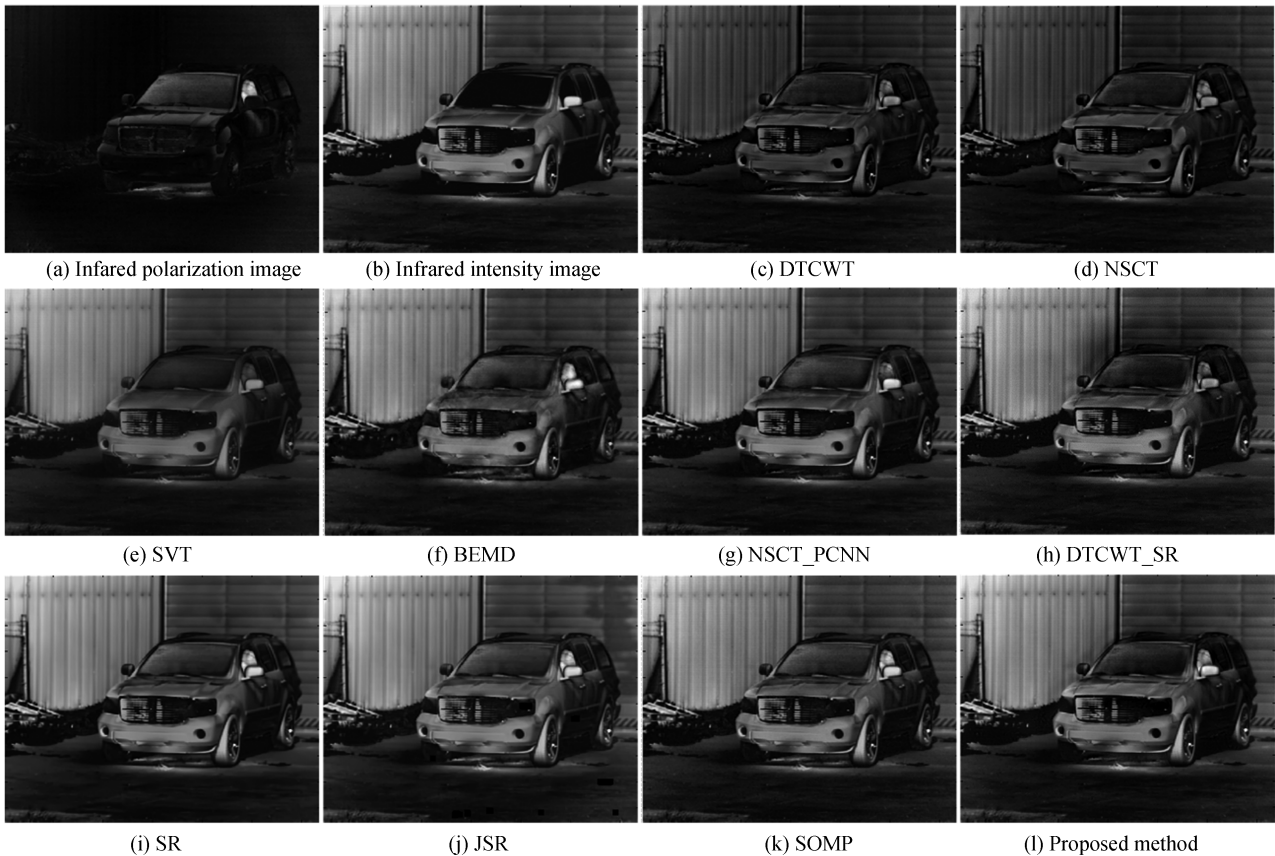


图 5 第二组红外偏振与强度图像融合实验

Fig.5 The second fusion experiment of infrared polarization and intensity image

区域的重要偏振信息和强度信息;SR、SOMP 和本文算法在视觉效果上基本一致,它们都恰当地融合了源图像中的特征信息,它们之间的差异可用客观评价标准判断。

为了进一步说明本文提出算法的有效性,使用 IE、SD、SF 和 AG 四种图像质量指标对各算法的融合结果进行客观评价,这些指标的评价值越大,表明图像融合效果越好。表 1 和表 2 分别给出了两组红外偏振与强度图像各种融合结果的客观评价价值。由表 1 可知,除第一组实验中 NSCT 的平均梯度略大于本文提出的算法外,本文算法的其他客观评价价值都是最优的,也就是说,相比于其他的 9 种融合算法,本文提出的算法能使融合图像具有更丰富的信息以及更高的对比度和清晰度,融合图像的视觉效果也是最佳的。

表 1 第一组融合实验的客观评价价值比较

Table 1 Objective value comparison of the first fusion experiment

Methods	IE	SD	SF	AG
DTCWT	6.451 8	27.773 9	10.719 3	3.953 6
NSCT	6.454 8	27.894 7	10.951 7	4.146 1
SVT	6.360 1	26.636 1	6.8543	2.6153
DTCWT-SR	6.620 8	33.0744	10.761 8	4.018 2
NSCT-PCNN	6.434 2	27.6627	10.078 5	3.870 3
BEMD	6.391	27.300 1	8.6464	3.258 4
SR	6.176 5	27.549	8.039 7	2.859
JSR	6.311 2	30.816	10.539 3	3.715
SOMP	6.247 6	27.744 3	9.194	3.514 4
Proposed method	6.655 7	33.207 3	10.983 9	4.115

表 2 第二组融合实验的客观评价价值比较

Table 2 Objective value comparison of the second fusion experiment

Methods	IE	SD	SF	AG
DTCWT	7.425 4	53.936 5	16.339 8	5.284 4
NSCT	7.453 9	54.233 4	16.414 6	5.414 7
SVT	7.274 2	50.528 6	11.0687	3.561 1
DTCWT-SR	7.375 2	54.357 2	16.374 2	5.281 1
NSCT-PCNN	7.438 4	54.008	16.047 6	5.243 9
BEMD	7.423 2	53.146 2	14.547 9	4.877 3
SR	7.445 8	53.789 5	15.451 4	4.843 2
JSR	7.478	53.575 6	15.621 4	4.933 4
SOMP	7.479 8	53.820 4	16.004 1	5.342 3
Proposed method	7.554 2	54.987 6	16.466 2	5.520 6

5 结论

本文针对红外偏振与光强图像彼此包含共同信息和特有信息的特点,提出了一种基于 DTCWT 和 SR 的图像融合方法。不同于现有的基于稀疏表示的融合算法,首先使用 DTCWT 保留了源图像的高频细节;使用低频成分稀疏系数的位置信息判断它们之间的共有特征信息和和特有特征信息,并使用恰当的方法分别对其进行融合。该方法不仅较好地凸显源图像的共有信息,保留它们各自的特有信息,并且很好地保持了源图像的高频细节。实验结果表明本文算法不仅是可行、有效的,而且优于其他的融合算法。

参考文献

- [1] YIN Shi-chang, YU Song-lin. Infrared image enhancement algorithm based on wavelet transform and histogram equalization [J]. *Laser & Infrared*, 2013, **43**(2): 225-228.
尹士畅,喻松林. 基于小波变换和直方图均衡的红外图像增强[J]. *激光与红外*, 2013, **43**(2): 225-228.
- [2] YANG Feng-bao, LI Wei-wei, LIN Su-zhen, et al. Study on fusion of infrared polarization and intensity images [J]. *Infrared Technology*, 2011, **33**(5): 262-266.
杨风暴,李伟伟,蔺素珍,等. 红外偏振与红外光强图像的融合研究[J]. *红外技术*, 2011, **33**(5): 262-266.
- [3] DUAN Jin, FU Qiang, MO Chun-he, et al. Review of polarization imaging technology for international military application I [J]. *Infrared Technology*, 2014, **36**(3): 190-195.
段锦,付强,莫春和,等. 国外偏振成像军事应用的研究进展(上)[J]. *红外技术*, 2014, **36**(3): 190-195.
- [4] FELTON M, GURTON KP, PEZZANITI J L, et al. Measured comparison of the crossover periods for mid-and long-wave IR (MWIR and LWIR) polarimetric and conventional thermal imagery [J]. *Optics Express*, 2010, **18**(15): 15705-15713.
- [5] PARIS S, HASINOFF S W, KAUTZ J. Local Laplacian filters: Edge-aware image processing with a Laplacian pyramid [J]. *Communications of the ACM*, 2015, **58**(3): 81-91.
- [6] LU H, ZHANG L, SERIKAWA S. Maximum local energy: an effective approach for multisensory image fusion in beyond wavelet transform domain [J]. *Computers & Mathematics with Applications*, 2012, **64**: 996-1003.
- [7] KONG W W, LEI Y, ZGAO H X. Adaptive fusion method of visible light and infrared images based on non-subsampled shearlet transform and fast non-negative matrix factorization [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2014, **67**: 161-172.
- [8] ZHU P, MA X, HUANG Z. Fusion of infrared-visible images using improved multi-scale top-hat transform and suitable fusion rules[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2017, **81**: 282-295.
- [9] BAI XZ, ZHANG Y. Detail preserved fusion of infrared and visual images by using opening and closing based toggle operator[J]. *Optics & Laser Technology*, 2014, **63**: 105-113.

- [10] LI T J, WANG Y Y. Biological image fusion using a NSCT based variable-weight method[J]. *Information Fusion*, 2011, **12**: 85-92.
- [11] ADU J H, GAN J H, WANG Y, *et al.* Image fusion based on nonsubsamped contourlet transform for infrared and visible light image[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2013, **61**(1): 94-100.
- [12] ZHANG D X, LI J X, CHEN Z H, *et al.* Fusion of polarization image using bidimensional empirical mode decomposition [C]. Computer Science and Mechanical Automation (CSMA), 2015 International Conference on. IEEE, 2015: 206-209.
- [13] ZHU P, HUANG Z, LEI H. Fusion of infrared and visible images based on BEMD and NSDFB [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2016, **77**: 82-93.
- [14] ZHANG Lei, LOU Chang-geng, ZHANG Ying-ying, *et al.* Fusion algorithm of infrared and visible images based on support value transform [J]. *Laser Technology*, 2015, **39**(3): 428-431.
张雷, 罗长更, 张颖颖, 等. 基于支持度变换的红外与可见光图像融合算法 [J]. *激光技术*, 2015, **39**(3): 428-431.
- [15] CUI G M, FENG H J, XU Z H, *et al.* Detail preserved fusion of visible and infrared images using regionalsaliency extraction and multi-scale image decomposition [J]. *Optics Communications*, 2015, **341**: 199-209.
- [16] XIANG T Z, YAN L, GAO R G. A fusion algorithm for infrared and visible images based on adaptivedual-channel unit-linking PCNN in NSCT domain [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2015, **69**: 53-61.
- [17] WANG Z, MA Y, GU J. Multi-focus image fusion using PCNN [J]. *Pattern Recognition*, 2010, **43**: 2003-2016.
- [18] HE C, LIU Q, LI H, *et al.* Multimodal medical image fusion based on HIS and PCA [J]. *Procedia Engineering*, 2010, **7**: 280-285.
- [19] CVEJIC N, BULL D, CANAGARAJAH N. Region-based multimodal image fusion using ICA bases [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2007, **7**(5): 743-751.
- [20] YANG B, LI S T. Multifocus image fusion and restoration with sparse representation [J]. *IEEE TransactionsonInstrumentation and Measurement*, 2010, **59**(4): 884-892.
- [21] LI S T, YIN H T, FANG L Y. Remote sensing image fusion via sparse representations over learned dictionaries[J]. *IEEE Transactionson Geoscience and Remote Sensing*, 2013, **51**(9): 4779-4789.
- [22] KIM M, HAN D K, KO H. Joint patch clustering-based dictionary learning for multimodal imageFusion [J]. *Information Fusion*, 2016, **27**: 198-214.
- [23] LIU Y, LIU S P, WANG Z F. A general framework for image fusion based on multi-scale transformand sparse representation [J]. *Information Fusion*, 2015, **24**: 147-164.
- [24] YU N N, QIU T S, BI F, *et al.* Image Features extraction and fusion based on joint sparse representation [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2011, **5**(5): 1074-1082.
- [25] WANG Xin, JI Tong-bo, LIU Fu. Fusion of infrared and visible images based on target segmentation and compressed sensing[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, **24**(7): 1743-1753.
王昕, 吉桐伯, 刘富. 结合目标提取和压缩感知的红外与可见光图像融合[J]. *光学精密工程*, 2016, **24**(7): 1743-1753.
- [26] YANG B, LI S T. Pixel-level image fusion with simultaneous orthogonal matching pursuit [J]. *Information Fusion*, 2012, **13**: 10-19.
- [27] KINGSBURY N. Image processing with complex wavelets[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1999, **357**(1760): 2543-2560.
- [28] ZHANG Xiang, ZHANG Jian-qi, QIN Han-lin, *et al.* Dual-tree complex wavelet transform for infrared dim target background suppression [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(9): 1672-1677.
张翔, 张建奇, 秦翰林, 等. 基于对偶树复小波变换的红外弱小目标背景抑制[J]. *光子学报*, 2010, **39**(9): 1672-1677.
- [29] YIN Ming, PANG Ji-yong, WEI Yuan-yuan, *et al.* Remote sensing image fusion based on non-subsamped dual-tree complex wavelet transform and sparse representation[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(1): 0110002.
殷明, 庞纪勇, 魏远远, 等. 结合 NSDTCT 和稀疏表示的遥感图像融合[J]. *光子学报*, 2016, **45**(1): 0110002.
- [30] ZHENG Z, YONG X, JIAN Y, *et al.* A survey of sparse representation: algorithms and applications [J]. *IEEE. Translations and Content Mining*, 2015, **3**: 490-530.
- [31] AHARON M, ELAD M, BRUCKSTEIN A. K-SVD: An algorithm for designing overcomplete dictionaries for sparse representation [J]. *IEEE Transactionson Signal Processing*, 2006, **54**(11): 4311-4322.
- [32] TROPP J, GILBERT A C. Signal recovery from partial information via orthogonal matching pursuit [J]. *IEEE Transactions Information Theory*, 2007, **53**(12): 4655-4666.
- [33] YAND F B, WEI H. Fusion of infrared polarization and intensity images using support valuetransform and fuzzy combination rules [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2013, **60**: 235-243.