

# 基于小波变换的中波红外偏振图像融合

张雨晨, 李江勇

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

**摘要:**针对中波红外偏振图像的特征,给出了一种基于小波变换的融合新方法。根据中波红外偏振图像高低频图像特点选择不同的融合规则,针对低频图像采用偏振融合的方法来抑制背景信息,针对高频图像采用超分辨率重建算法来提升细节信息。实验结果显示,证融合后的红外图像比原始图像更加清晰,相较于仅偏振处理图像获得了更高的分辨率,相较于传统小波融合算法增加了偏振方面细节。

**关键词:**小波融合;超分辨率重建;偏振

**中图分类号:**TP391.41 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2020.05.012

## Polarization image fusion based on wavelet transform

ZHANG Yu-chen, LI Jiang-yong

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

**Abstract:** Aiming at the characteristics of medium-wave infrared polarization image, a new fusion method based on wavelet transform is presented. According to the high-low frequency image characteristics of the mid-wave infrared polarization image, different fusion rules are selected. The experimental results show that both the subjective evaluation and the objective evaluation criteria of the image are better than Stokes algorithm and the method based on wavelet fusion.

**Keywords:** wavelet fusion; super-resolution reconstruction; polarization

### 1 引言

利用红外探测系统对目标进行高分辨率红外成像、实现精确探测与跟踪,是世界各国都在关注和发展的技术。然而,远距离探测时,大气中雾霾、水雾、沙尘等对光波所产生的散射作用,严重影响了红外探测系统的成像效果。为克服这一难题,需要研究新体制成像技术,实现复杂环境下目标信息的有效捕获和提取。对于复杂背景下目标识别,红外偏振成像探测技术较普通红外成像探测具有优势<sup>[1]</sup>。

红外偏振成像技术相比于红外热成像最为显著的特征为可以将目标和背景区分开。因为红外热成像依据的是物体辐射的强度,当物体处于复杂背景环境下,由于物体与背景温度差别不大,无法很好识

别出物体,而此时红外偏振就起到了作用,红外偏振是通过测量物体在不同偏振方向的各种参数来识别物体,即便在温差不大的情况下,也能通过不同的偏振特性识别出物体。红外偏振成像可以很好地区别人造物与自然物。偏振是区别与红外热辐射的另一维度的信息,在红外辐射方面相同的物体可能有不同的偏振信息,使用偏振成像手段可以在复杂的辐射背景下识别出目标。偏振是区别与红外热辐射的另一维度的信息,在红外辐射方面相同的物体可能有不同的偏振信息,使用偏振成像手段可以在复杂的辐射背景下识别出目标。

传统偏振图像处理方面,多是根据偏振态的分解得到偏振强度图像和偏振度图像来获得目标及背

**作者简介:**张雨晨(1997-),女,硕士,助理工程师,主要从事偏振图像处理工作。

**收稿日期:**2019-07-05;**修订日期:**2019-08-01

景相关信息,方法简单但图像成像质量较差,本研究尝试将中波红外偏振图像通过小波分析分为高低频图像,接着分别进行低频偏振融合和高频超分辨率重建处理,最后通过小波系数进行融合,实现复杂环境下目标信息的获取,不仅保留了图像偏振方面的细节,而且通过超分辨率重建提升了图像的分辨率。

## 2 小波融合算法

从20世纪50年代起,傅里叶就一直是基于变换的图像处理最为基础的算法,但近年来一种新的称为小波变换的变换使得压缩、传输和分析图像变得更为容易。与基函数为正弦函数的傅里叶变换不同,小波变换的基函数是小型波,称为小波,它具有变化的频率和有限的持续时间。小波融合算法是常用的图像融合算法之一<sup>[2]</sup>。其基本步骤是:

1) 对图像进行预处理,包括图像滤波,图像配准等方面。

2) 对待融合的图像进行小波变换,得到每个图像的小波金字塔。

3) 对每个图像的各个分阶层进行融合处理,根据图像各信息的不同采用不同的融合规则;

4) 将第三步融合后的图像根据小波逆变换重构得到融合后图像。

## 3 本文所用算法

对图像多尺度分析,针对目标与场景目标的频谱特性差异,对低频部分,利用所获取的偏振信息,进行清晰成像。偏振融合算法是以反向求解为过程的图像复原,对图像退化的过程进行分析和描述,建立退化的数学或者物理模型,然后沿反方向弥补信号的损失,从而恢复出一幅原始未经损坏的图像的近似值。高频部分,由于红外成像机理、焦平面阵列本身及探测环境影响,导致红外图像具有高背景、低对比度、灰度范围窄、信噪比较低的特点。这些问题严重影响红外图像的成像质量,使得目标不易辨认,成像效果不理想。对高频图像进行超分辨率重建,提高图像质量,提升成像探测距离。接着对高低频处理后得图像进行小波重构得到清晰图像。

### 3.1 总体算法流程

系统总体算法流程如图1所示。

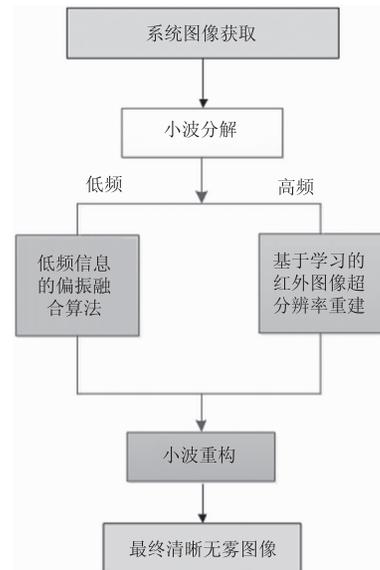


图1 系统总流程图

Fig. 1 General system flow chart

(1) 对系统所获取的信息进行小波分解,得到低频和高频两部分信息;

(2) 系统所采集到的场景信息进行多尺度分析,针对介质与场景目标的频谱特性差异,重点对雾、霾、雨等混沌介质影响的低频部分信息,利用双偏振态探测计算获取的大气的偏振信息对其进行估算,然后实现去雾、去霾等处理;

(3) 对体现场景细节信息的高频区域进行图像超分辨率重建;

(4) 结合高-低频的处理,完成图像的全偏振信息重建进行小波融合,完成图像的全偏振信息重建;

(5) 通过仿真软件的像差以及成像质量分析,完成系统优化。

### 3.2 本文所用小波算法

在计算机应用中,需要将小波离散化,而要应用离散化算法,就需要相应的快速算法进行支持。在傅里叶变换中有FFT,那么在小波变换中就有Mallet。Mallet二维分解算法如下:

$$\begin{cases} C_{j+1}(m,n) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{l=-\infty}^{\infty} h^*(k-2m)h^*(l-2n)C_j(k,l) \\ D_{j+1}^1(m,n) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{l=-\infty}^{\infty} h^*(k-2m)g^*(l-2n)C_j(k,l) \\ D_{j+1}^2(m,n) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{l=-\infty}^{\infty} g^*(k-2m)h^*(l-2n)C_j(k,l) \\ D_{j+1}^3(m,n) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{l=-\infty}^{\infty} g^*(k-2m)g^*(l-2n)C_j(k,l) \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $C_{j+1}$  为  $C_j$  的低频近似分量;  $D_{j+1}^1$  为水平方向高频分量;  $D_{j+1}^2$  为垂直方向上的高频分量;  $D_{j+1}^3$  为对角线方向高频分量。

二维 Mallet 重构算如下:

$$C_j(k, l) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} h(k-2m)h(l-2n)C_{j+1}(m, n) + \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} h(k-2m)g(l-2n)D_{j+1}^1(m, n) + \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} g(k-2m)h(l-2n)D_{j+1}^2(m, n) + \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} g(k-2m)g(l-2n)D_{j+1}^3(m, n) \quad (2)$$

由上述 Mallet 分解及重构公式, 可知二维图像的分解和重构如图 2 所示。

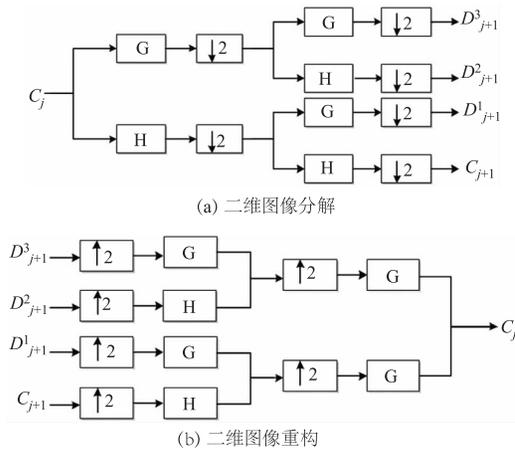


图 2 二维小波分解与重构

Fig. 2 Two-dimensional wavelet decomposition and reconstruction

通过小波变换的多分辨率分析过程可以将一幅图像分解为图像的低频部分和高频部分。二维 Mallet 塔式分解算法可以使用数字滤波器和下采样器实现。首先通过列下采样得到两个子图像, 它们的水平分辨率以 2 为基下降<sup>[3]</sup>。图像一级和二级分解示意图如图 3 所示。

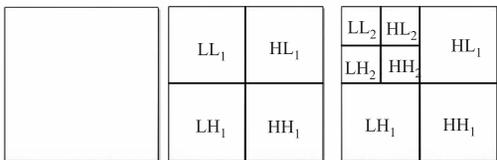


图 3 图像的二层小波分解示意图

Fig. 3 Schematic image of two-layer wavelet decomposition

### 3.3 低频偏振融合

低频流程图如图 4 所示。

(1) 建立大气散射模型, 根据建立模型给出求解表达式

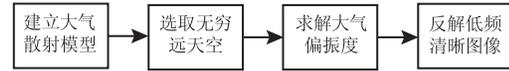


图 4 低频偏振融合流程图

Fig. 4 Low-frequency polarization fusion flowchart

清晰场景的辐射强度公式表示为:

$$J = S_0 \left(1 - \frac{P}{P_A}\right) / \left(1 - \frac{S_0 P}{A_\infty P_A}\right) \quad (3)$$

根据上述模型, 求解清晰场景需要对全局变量  $P$ 、 $P_A$ 、 $A_\infty$  进行估计。但对于大气光偏振度  $P_A$  的计算无法直接获得, 需要采用近似假设。在此之前, 首先需要估算无穷远处天空强度  $A_\infty$ <sup>[4]</sup>。

(2) 选取无穷远天空, 估计大气光

当探测距离足够远时, 景物辐射所包含的偏振信息由于衰减剧烈已无法观察, 认为观测到的光波只有大气光有偏振特性, 而场景光则为零。

当距离  $d \rightarrow \infty$ , 传输函数  $T \rightarrow 0$ , 此时:

$$I^{\text{total}} = L_{\text{object}} T(d) + A_\infty (1 - T(d)) = A_\infty \quad (4)$$

因此只需在强度图像  $S_0$  中找到无穷远处场景即可。

(3) 求解大气偏振度

根据偏振光散射成像模型, 清晰场景的大气光的偏振度  $P_A$  可以表述为以下方程式。

$$P_A = \frac{A_{\max} - A_{\min}}{A_{\max} + A_{\min}} = \frac{A_{\perp} - A_{\parallel}}{A_{\perp} + A_{\parallel}} \quad (5)$$

如果景物距离探测设备足够远, 那么  $d$  足够大, 得到  $P_A$  的近似值:

$$P_A = \frac{A_{\infty}^{\perp} - A_{\infty}^{\parallel}}{A_{\infty}^{\perp} + A_{\infty}^{\parallel}} \quad (6)$$

(4) 反解低频清晰图像

根据步骤(1)中公式及上述计算, 即可解出低频清晰图像。

### 3.4 高频超分辨率重建

对体现目标细节信息的高频区域进行超分辨率重建处理, 并结合高低频的处理, 完成图像的全偏振信息重建。最后, 通过仿真软件的像差以及成像质量分析, 完成系统优化。

采用基于字典学习与稀疏表示的单帧图像超分辨率重建方法对单帧高频偏振目标图像进行重建, 将 K-SVD 算法与主元分析法降维方法相结合完成双稀疏字典学习, 同时得到高分辨率字典和分辨率字典<sup>[5]</sup>。通过正交匹配追踪算法 (OMP 算法) 对得到的

字典进行稀疏编码,通过计算低分辨率字典所对应的稀疏系数得出其所对应的高分辨率图像块,从而实现图像的超分辨率重建,方法框图如图5所示。

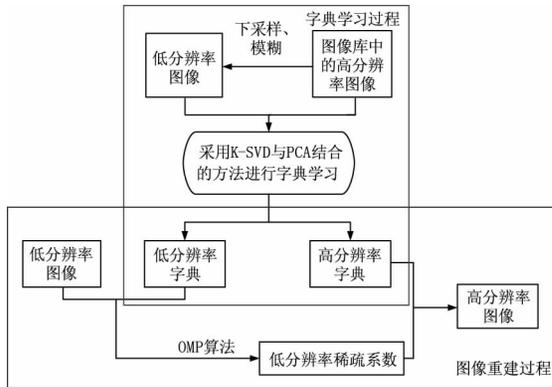


图5 高频超分辨率重建方法框图

Fig. 5 High-frequency super-resolution reconstruction method block diagram

### 4 仿真结果

采用 MATLAB 软件对得到的图像进行仿真,具体仿真流程如算法总流程所示。对得到的图像进行图像进行小波分解得到低分辨率图像和高分辨率图像,对两幅低分辨率图像做小波融合算法,对一路高频图像做超分辨率重建,接着用小波融合对两幅得到图像进行融合得到最终清晰无雾图像。为验证算法有效性,选择传统偏振斯托克斯算法和基于小波融合的空余加权算法来进行对比。各算法实验结果如图6所示。

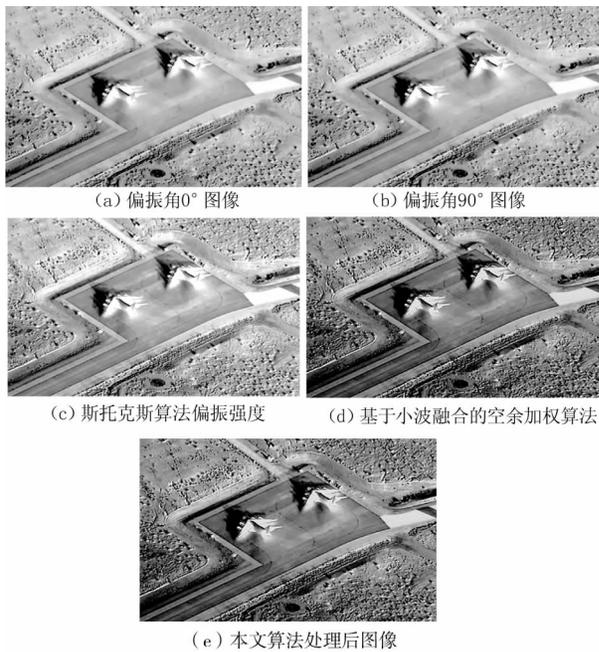


图6 红外图像仿真处理

Fig. 6 Infrared image simulation processing

首先对图像进行主观分析,图6(a)、(b)是成像系统采集所得图片,图像较为模糊,细节不明显。图6(c)是偏振强度图像,偏振图像一般采用斯托克斯公式进行计算得出偏振强度图像,可看出细节不够明显,图6(d)是基于小波融合的空余加权算法,图6(e)是本文算法处理的图像,较之前四张图片细节更为清晰,图像对比度增强。

常用的评价方法有峰值信噪比(Peak Signal to Noise Ratio, PSNR)和均方误差(Mean Square Error, MSE)等<sup>[60]</sup>,令代表原始图像,代表失真图像,如果图像尺寸均为  $M \times N$ ,这样,与之间的均方误差MSE为:

$$MSE = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} [g(x,y) - f(x,y)]^2 \tag{7}$$

峰值信噪比(PSNR)为:

$$PNSR = 10 \cdot \log_{10}((2^n - 1)^2 / MSE) \tag{8}$$

由上式所得 MSE 值越小,PSNR 值越大,代表失真越少,失真图像质量越好。MSE 和 PSNR 这两种方法计算简单且便于优化,物理意义清晰明了<sup>[6]</sup>。

本文所用算法与现有处理方法相比结果如表1所示。

表1 处理后偏振红外图像评价

Tab. 1 Evaluation of polarized infrared images after processing

算法名称	PSNR	MSE
偏振度0度图像	29.912	11.34
偏振度90度图像	29.917	11.32
偏振强度图像	30.173	10.69
超分辨率重建算法	32.776	10.03
本文算法	34.518	9.89

从数值结果中可以看出,本文算法的图像PSNR数值均高于其余四种方法,MSE数值均低于其余四种方法,凸显了本文算法的优越性。

### 5 结论

针对中波红外偏振图像的特征,本文给出了一种新的基于小波变换的融合方法。从目前仿真的结果看,该算法可以相对容易地实现,并保证融合后的红外图像比原始图像更加清晰。该算法能够提升偏振成像系统的成像效果,改进传统偏振成像系统中能量利用率低、偏振信息不全、无法实时成像的问

题,提高透过混沌介质成像的能力。

#### 参考文献:

- [1] Feng Mingbo, Liu Xue, Zhao Dong. A projection and wavelet fusion algorithm for multi/hyperspectral remote sensing images[J]. Journal of Surveying and Mapping, 2014,43(2):158-163. (in Chinese)  
丰明博,刘学,赵冬.多/高光谱遥感图像的投影和小波融合算法[J].测绘学报,2014,43(2):158-163.
- [2] Peng Zhenming, Jing Liang, He Yanmin, et al. Super-resolution fusion of multi-focus images based on multi-scale sparse dictionary[J]. Optics and Precision Engineering, 2014,22(1):169-176. (in Chinese)  
彭真明,景亮,何艳敏,等.基于多尺度稀疏字典的多聚焦图像超分辨融合[J].光学精密工程,2014,22(1):169-176.
- [3] Su Heng, Zhou Jie, Zhang Zhihao. A survey of super-resolution image reconstruction methods[J]. Journal of Automation, 2013,39(8):1202-1213. (in Chinese)  
苏衡,周杰,张志浩.超分辨率图像重建方法综述[J].自动化学报,2013,39(8):1202-1213.
- [4] Xin Yanan, Deng Lei. Research on remote sensing image fusion method based on wavelet transform[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013,50(2):133-138. (in Chinese)  
辛亚楠,邓磊.基于小波变换的遥感图像融合方法研究[J].激光与光电子学进展,2013,50(2):133-138.
- [5] Jiang Jing, Zhang Xuesong. Summary of image super-resolution reconstruction algorithm[J]. Infrared Technology, 2012,34(1):24-30. (in Chinese)  
江静,张雪松.图像超分辨率重建算法综述[J].红外技术,2012,34(1):24-30.
- [6] Johnson J L. Infrared polarization signature feasibility tests[R]. Repts. TR-EO-74-1 and ADC 00113, U. S. Army Mobility Equipment Research and Development Center, 1974.