

基于Directionlets变换的偏振图像融合

张德祥^{*①} 张晶晶^{①②} 吴小培^① 高清维^①

^①(安徽大学计算智能与信号处理教育部重点实验室 合肥 230039)

^②(中国科学院通用光学辐射定标与表征重点实验室 合肥 230001)

摘要: 论文提出一种有效的基于Directionlets变换的偏振图像融合算法。首先采用多方向多尺度的Directionlets变换对多个偏振图像进行分解,对于分解后的低频系数采用加权平均融合算法;根据高频子图边缘分布差异,对于方向高频系数采用2维Teager能量的边缘检测算法以及区域方向对比度算法实现偏振图像的融合处理。实验结果表明,与传统算法相比,提出的算法在保留原始图像边缘和纹理信息的同时,可以有效地取得较好的融合视觉效果。

关键词: 图像处理; Directionlets变换; 偏振图像融合; 方向对比度

中图分类号: TP751.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)12-2795-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.00601

Fusion of Polarization Image Based on Directionlets Transform

Zhang De-xiang^① Zhang Jing-jing^{①②} Wu Xiao-pei^① Gao Qing-wei^①

^①(Key Lab. of Intelligent Computing and Signal Processing of Ministry of Education,

Anhui University, Hefei 230039, China)

^②(Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230001, China)

Abstract: An efficient image fusion algorithm for polarization images based on Directionlets transform is proposed. Firstly, the several of polarization images are decomposed using Directionlets transform, which have multi-scale, multi-direction characteristics. Then, for the low-pass coefficients, the weighted averaging fusion rule is used. To select the better coefficients for the directional high-frequency ones, edge detection using two dimensional Teager energy and region directional contrast algorithm are used for fusion according to edge distribution differences in high frequency sub-band images. Experimental results show that compared with traditional algorithm, the proposed algorithm can get better visual effect and the significant information of original image like textures and contour details is well maintained.

Key words: Image processing; Directionlets transform; Polarization image fusion; Directional contrast

1 引言

偏振遥感是一种新型的侦察手段,它以目标辐射能量的偏振特性作为探测信息,具有反映地物偏振特征的独特优势,能很好地分辨目标上的低反射区域和目标轮廓,含有强度图像和光谱图像无法获取的偏振信息,可获得比光辐射测量更多的3维细节信息,提高目标在复杂背景环境中被有效识别的能力^[1]。

中国科学院安徽光学精密机械研究所研制了机载多波段偏振CCD相机,能获得3个不同方向上的偏振光强度图像。由于原始3幅图像灰度值小,图像较暗,在目标表征上是独立的,因而常采用Stokes

参量 I , Q , U 表征偏振遥感信息,获得反映地物目标特征信息的偏振图像,特别是能分辨出相同辐射强度的地物所具有的不同的偏振状态,反演出介质的表面状态和物理、化学性质,有效地消除背景噪声,提高目标识别能力^[2]。

然而Stokes参量表征的目标信息都是独立的, I 表示光波的总强度,图像对比度较好,视觉效果好,但目标边缘或纹理信息反映得不够; Q 表示 x 方向与 y 方向上的线偏振光的强度差,反映的是地物目标的边缘和纹理细节信息,但对对比度差,图像较暗,视觉效果不好。

因此,根据偏振图像这一特征,需要采用图像融合处理技术,使融合后的图像既保留强度图像所表现的低频特性,又突出偏振特性所表现的目标的高频特征,从而改善图像目标的识别能力^[3]。

图像的融合处理方法常用多尺度小波分解融合

2011-06-20收到, 2011-09-19改回

国家自然科学基金(60872163)和安徽省教育厅自然科学基金(KJ2011A013)资助课题

*通信作者: 张德祥 dzxyzd@126.com

方法以及多尺度几何分解融合等方法^[4]。但多尺度多方向分解的小波变换系数反映的是图像的奇异点的边缘信息,具有各向同性的特点,无法最优反映图像沿边缘变化的曲线特性^[5]。而具有各向异性的多尺度几何变换方法,如Curverlet,Contourlet,Directionlets等变换具有很好的多尺度分辨性、多方向性和各向异性,能较好地捕获2维图像中线和面的奇异性,能用比小波变换更少的系数来稀疏表达光滑的曲线,因而融合效果比小波变换更好^[6,7]。

由于Directionlets变换是一种基于边缘信息的图像表达方式,对于偏振图像所突出反映的地物边缘或纹理信息有更好的跟踪表达能力。同时栅格生成矩阵可以不同方向分割图像得到栅格陪集,不仅对直线,而且对交叉直线都可最佳稀疏表达,因而特别适合偏振图像的分解表达。本文采用Directionlets变换实现偏振图像的融合处理。通过对偏振度和偏振角图像进行多尺度多方向的分解,获得多分辨率的低频轮廓图像以及不同方向的高频细节图像,对低频和高频图像分别采用不同的融合策略,从而实现偏振图像的融合处理,使融合后的图像获得良好的视觉效果和保留更多的边缘和纹理信息。

2 偏振图像的定量描述

对于地物目标的偏振图像,常使用Stokes矢量 (I, Q, U, V) 来表示准单色平面波的偏振态,其中偏振特征的光波强度用参数 I 来描述;参数 Q 和 U 分别表示2个方向上的线偏振量;而参数 V 是一个与圆偏振有关的量。

$$\left. \begin{aligned} I &= \langle E_x^2 \rangle + \langle E_y^2 \rangle \\ Q &= \langle E_x^2 \rangle - \langle E_y^2 \rangle \\ U &= 2 \langle E_x E_y \cos \varphi \rangle \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中 $\langle E \rangle$ 代表时间平均的效果,对于任一 XOY 平面,表达与 x 轴的夹角为 α 方向上的光波强度可以用式(2)来表达。

$$\begin{aligned} I(\alpha) &= \langle E_x^2 \rangle \cos^2 \alpha + \langle E_y^2 \rangle \sin^2 \alpha \\ &+ \langle E_x E_y \rangle \sin 2\alpha \end{aligned} \quad (2)$$

根据式(1),式(2)可以化简得到式(3):

$$I(\alpha) = (I + Q \cos 2\alpha + U \sin 2\alpha) / 2 \quad (3)$$

再根据Stokes矢量参数的相互关系,可以求出偏振图像的偏振度图像 P 以及偏振角图像 θ ,即

$$P = \left(\sqrt{Q^2 + U^2} \right) / I, \quad 0 \leq P \leq 1 \quad (4)$$

$$\theta = \frac{1}{2} \arctan \frac{U}{Q}, \quad 0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ \quad (5)$$

在实际应用中,对地物进行偏振测量常采用3

个不同的角度 $(0^\circ, 60^\circ, 120^\circ)$ 进行采集得到线偏振光的强度 $I(\alpha)$,进而得到Stokes参数的参量 I, Q, U ,如式(6)所示,然后可根据式(4)和式(5)求出偏振光的偏振度 P 图像和偏振角 θ 图像。

$$\left. \begin{aligned} I &= \frac{2}{3} [I(0) + I(60) + I(120)] \\ Q &= \frac{2}{3} [2I(0) - I(60) - I(120)] \\ U &= \frac{2}{\sqrt{3}} [I(60) - I(120)] \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

根据偏振成像原理,通常可以获得光强度 I 图像,进而得到偏振度 P 图像以及偏振角 θ 图像。利用这3种图像信息可以完整地描述偏振遥感信息,表示目标的本征状态特征。

3 Directionlets变换

3.1 Directionlets变换的特点

Directionlets变换是针对传统的2维小波变换在图像处理中缺乏多方向性的缺点而提出的多方向各向异性小波变换。首先根据数字化线段理论及整数栅格理论构造多方向框架分割,再根据小波变换实现多方向小波变换。Directionlets变换采用基于整数格的最佳重构和临界抽样来构造各向异性的多方向小波。不仅继承了小波变换中滤波器可分性的优点,从而相对于其他多尺度变换可具有滤波器设计简单和计算简便的优势,而且又保留了各向异性基函数实现图像多尺度方向性的稀疏表达的特点,可实现图像边缘和纹理的精确表示^[8]。

3.2 整数栅格多方向框架

对于多方向框架选择可以通过数字化线段方向实现图像的多方向分割,但在图像分解和重构时容易出现方向交叉的现象。为解决构造多方向基函数时出现的交叉问题,Directionlets变换采用整数栅格实现有理斜率方向的线段组合模式^[7]。

满秩整数栅格 Λ 可以表达为由两个线性无关的整数 \mathbf{d}_1 和 \mathbf{d}_2 线性组合而得到的点组成,图像分割线就是沿这两个向量的方向角进行的。一个整数栅格可用栅格生成矩阵 \mathbf{M}_L 表示。

$$\mathbf{M}_L = \begin{bmatrix} \mathbf{c}_1 & \mathbf{a}_1 & \mathbf{b}_1 \\ \mathbf{c}_2 & \mathbf{a}_2 & \mathbf{b}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{c}_1 \\ \mathbf{c}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{d}_1 \\ \mathbf{d}_2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中 $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \mathbf{b}_1, \mathbf{b}_2, \mathbf{c}_1, \mathbf{c}_2 \in Z$ 。变换方向是沿向量 \mathbf{d}_1 方向进行,斜率为 $r_1 = \mathbf{b}_1 / \mathbf{a}_1$,而向量 \mathbf{d}_2 方向为变换采样后点集的排列方向,斜率为 $r_2 = \mathbf{b}_2 / \mathbf{a}_2$ 。

一幅图像可以通过栅格的平移来实现图像的分割,生成若干个陪集,每个陪集就是一个栅格的一次平移,那么整个栅格空间 Z^2 可由栅格分解成 $|\det(\mathbf{M}_L)|$ 个陪集。而每个陪集的平移矢量为 $\mathbf{s}_k =$

(s_{k1}, s_{k2}) ，其中 $k = 0, 1, \dots, |\det(\mathbf{M}_L)| - 1$ 。

图1所示的是由栅格生成矩阵 \mathbf{M}_A 以 45° 方向分割的栅格陪集以及变换后按 -45° 方向排列的陪集，其中栅格矩阵 \mathbf{M}_L 和变换采样排列后栅格矩阵 \mathbf{M}'_L 分别为

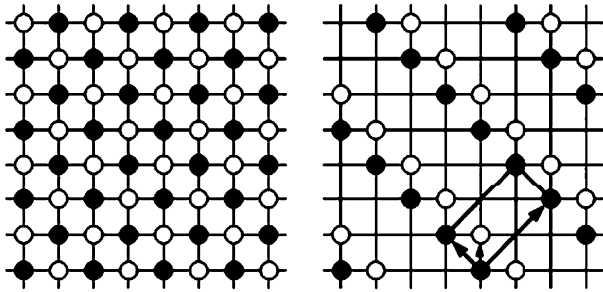


图1 栅格分割图像的陪集及变换后排列的陪集

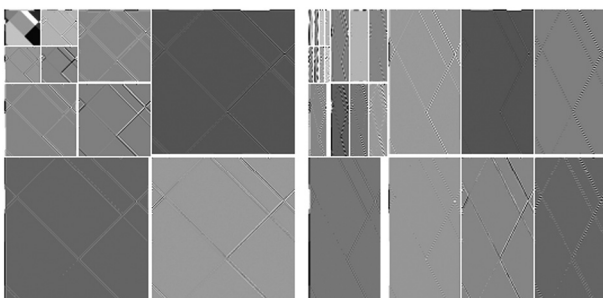
$$\mathbf{M}_L = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{M}'_L = \begin{bmatrix} 2 & 2 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}$$

其平移向量为： $s_0 = (0, 0)$ 和 $s_1 = (1, 1)$ 。

3.3 各向异性小波变换

传统的2维离散小波变换具有各向同性，即在同一分解尺度下其水平方向和垂直方向的滤波，并且采样次数相同，因而，不能完全捕获图像中具有各向异性的轮廓与边缘特征，也就是说在分解中会产生大量的小波系数。而各向异性小波变换 (Anisotropic Wavelet Transform, AWT)是指采用各向异性基函数，在同一变换尺度下，水平和垂直方向的滤波和采样次数可以不相同，因而各向异性基函数可以实现奇异性曲线的稀疏表达，不仅可以实现最佳的非线性逼近，而且可用最少系数准确地表达图像的各向异性曲线^[7]。

图2(a)所示的是采用传统小波变换经3层分解后的小波系数分布图；图2(b)所示的是采用各向异性小波变换经3层分解后的小波系数分布图，其中水平方向2次分解，垂直方向1次分解。



(a) 传统小波分解系数 (b) 各向异性小波分解系数

图2 不同小波变换后小波系数分布图

3.4 Directionlets变换分解

Directionlets变换就是将多方向框架和各向异性小波分解结合起来实现图像的多尺度多方向分解。首先对于一个给定的整数栅格，利用栅格的生成矩阵以及数字化方向将图像分割成若干陪集序列，然后对各个陪集分别进行各向异性小波变换即可实现方向小波变换。

通过Directionlets变换可以实现多方向性，在不同方向上的分解尺度可以各不相同，体现出各向异性的优势。

4 Directionlets变换图像融合算法

对于偏振图像主要是通过偏振度图像反映图像的边缘和纹理的高频信息，具有多方向性和高频分布特性。而根据Directionlets变换的分解原理可知，待融合图像经过陪集分割和各向异性小波分解可以获得不同分辨率的高频方向子图以及低频轮廓子图。高频子图体现图像的某区域的不同方向上的边缘和轮廓信息，其中与相对平移矢量方向垂直的方向是边缘信息的主要方向，表现的是图像的细节特征。图像融合就是从多幅待融合图像的高频子图中获取最能代表图像纹理细节的边缘信息，使融合后图像具备最佳的图像清晰度和丰富的边缘信息^[9]。

对于低频图像子图主要包含了图像的轮廓特性，体现了图像的主要能量分布，分解后的低频系数可通过求解其平均值方法获得融合后低频子图，或者通过能量加权方式实现低频融合。

高频子图由于包含了图像的细节部分，所以图像的融合效果关键是看高频子图的融合效果以体现原始图像更多的关键信息，提高清晰度和对比度。

Teager能量算子(TEO)是一种非线性算子，它能有效提取信号的能量。对于离散时间信号，Teager能量算子 ψ 可近似表达为

$$\begin{aligned} \psi[x(n)] &= x^2(n) - x(n+1)x(n-1) \\ &= \sum_{k_2=-\infty}^{\infty} \sum_{k_1=-\infty}^{\infty} h(k_1, k_2)x(n-k_1)x(n-k_2) \quad (8) \end{aligned}$$

Teager能量算子是均衡二次Volterra滤波器的一种特殊情况，可以近似看成是一个局部平均滤波器和一个高通滤波器的乘积^[10]。

2维Teager滤波器是1维Teager滤波器的推广，即系统的输入由1维序列变为2维序列，相应的系统输出也变为2维。2维Teager滤波器的表达式比较复杂。在实际应用时，利用最小二乘方法设计2维Teager滤波器，可以得到输入输出的关系为

$$y(m, n) = \psi[x(m, n)] = 3x^2(m, n) - x(m+1, n+1)x(m-1, n-1)/2 - x(m+1, n-1)x(m-1, n+1)/2 - x(m+1, n) \cdot x(m-1, n) - x(m, n+1)x(m, n-1) \quad (9)$$

2维Teager滤波器是非线性滤波器,可以由Mcan-Weighted高通滤波器来近似,即兼有局域平均和高通特性,因而在均衡去除噪声和增强图像边缘的同时保持了算法的简单性,比传统滤波器在保持边缘的完整性和方向性上要优越。通过2维Teager滤波器可以有效地取得图像的边缘和纹理信息。

为实现高频子图的融合处理,对于高频子图首先进行2维Teager滤波器计算,获取子图的边缘信息而非边缘信息。对于边缘区域采取区域边缘最大选取策略获得融合后图像的高频子图信息,而对于平滑区域则采取方向对比度最大的原则选取最佳的融合系数。最后经过反变换可获得融合后图像。

设Directionlets变换后高频系数为 $D(m, n)$,则根据式(9)计算可得到高频子图的Teager能量 $\psi[D(m, n)]$ 。对于边缘信息,经过2维Teager滤波器计算其数值较大;而对于平滑区域信息,由于系数大小相差不多,经过2维Teager滤波器计算后系数能量较小。所以根据高频子图Teager能量的分布可以针对不同区域采取不同的融合策略。

先求高频子图Teager能量 $\psi[D(m, n)]$ 的均值:

$$\text{Mean}D_{i,k}^j = \frac{1}{MN} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \psi[D_{i,k}^j(m, n)] \quad (10)$$

其中 i, k 分别表示图像所在的尺度和方向序号, M, N 表示该图像的大小; j 表示待融合图像; $\psi[D_{i,k}^j(m, n)]$ 表示 j 图非线性滤波能量; (m, n) 表示像素位置, $\text{Mean}D_{i,k}^j$ 表示子带 j 图非线性滤波能量均值。

为区分边缘区和平滑区,将各点的Teager能量与均值比较。如果 j 图非线性滤波能量 $\psi[D_{i,k}^j(m, n)] > \text{Mean}D_{i,k}^j$,则认为该点为边缘点,此时采用最大值融合策略选取融合后高频子图系数大小:

$$D_{i,k}(m, n) = \begin{cases} D_{i,k}^I(m, n), & \psi[D_{i,k}^I(m, n)] \geq \psi[D_{i,k}^P(m, n)] \\ D_{i,k}^P(m, n), & \psi[D_{i,k}^P(m, n)] \geq \psi[D_{i,k}^I(m, n)] \end{cases} \quad (11)$$

其中 I 和 P 分别代表两个待融合图像。

否则如果 $\psi[D_{i,k}^j(m, n)] < \text{Mean}D_{i,k}^j$,则表示为平滑区,可选择区域方向对比度方式实现融合系数的选取。

图像对比度定义为^[11]

$$R = \frac{I - I_L}{I_L} = \frac{I_H}{I_L} \quad (12)$$

其中 I 表示图像的局部灰度值, I_L 表示局部图像背景,相当于低频部分, I_H 表示局部高频分量。

图像经Directionlets变换后,对于每个尺度的分解都可获得不同方向的高频分量和对应的低频分量,因而可根据高频与低频之间的方向对比度:

$$R_{i,k}^j(m, n) = \frac{D_{H,i,k}^j(m, n)}{D_{L,i}^j(m, n)} \quad (13)$$

式中 $D(m, n)$ 为Directionlets变换后高低频分量, i, k 分别表示图像所在的尺度和方向序号, j 表示待融合图像; $D_{H,i,k}^j(m, n)$ 表示 j 图在尺度和方向序号为 i, k 时的局部高频分量, $D_{L,i}^j(m, n)$ 表示 j 图在尺度为 i 时的局部低频分量, $R_{i,k}^j(m, n)$ 为 j 图在尺度和方向序号为 i, k 时的局部方向对比度。

$$D_{i,k}(m, n) = \begin{cases} D_{i,k}^I(m, n), & R_{i,k}^I(m, n) \geq R_{i,k}^P(m, n) \\ D_{i,k}^P(m, n), & R_{i,k}^P(m, n) \geq R_{i,k}^I(m, n) \end{cases} \quad (14)$$

其中 I 和 P 分别代表两个待融合图像, $D_{i,k}(m, n)$ 为融合后图像在尺度和方向序号为 i, k 时的高频系数。

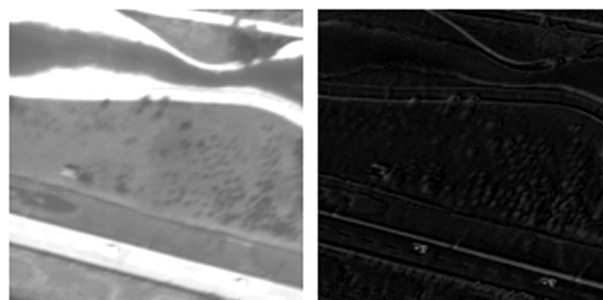
5 偏振图像融合实验及结果分析

本文利用Directionlets变换对多个偏振图像进行分解,采用不同的融合规则方法对偏振图像融合处理。

图3所示的就是3个不同角度($0^\circ, 60^\circ, 120^\circ$)的偏振图像利用式(6)得到合成偏振强度 I 图像和偏振度 P 图像。其中合成的偏振强度图像反映的地物的对比度差异更明显,但图像的边缘信息体现地较少,而偏振度图像包含了地物更多的图像边缘细节或纹理部分,但亮度对比度差。因此,将两者进行融合处理可得到视觉效果更好的融合效果。

在Directionlets变换中采用双正交9/7小波滤波器组;栅格生成矩阵以 45° 方向分割的栅格陪集以及变换后按 -45° 方向排列的陪集;分解层次为3层。为了对比融合效果,实验仿真中小波变换采用双正交9/7滤波器组,分解层次也为3层。

对于待融合的偏振强度 I 图像和偏振度 P 图像



(a) 偏振强度 I 图像

(b) 偏振度 P 图像

图3 合成偏振图像

采用Directionlets变换来进行融合处理。由于两图的对比度相差较远，对于低频图像如果采用求平均值方法实现低频图像的融合处理对融合后图像的对比度较差。因此，在这里采用低频区域(取 3×3)能量加权算法实现低频图像的融合处理以取得良好的视觉效果。

$$E_L^I = \sum_{m'=-1}^1 \sum_{n'=-1}^1 (D_L^I(m+m', n+n'))^2 \quad (15)$$

$$E_L^P = \sum_{m'=-1}^1 \sum_{n'=-1}^1 (D_L^P(m+m', n+n'))^2 \quad (16)$$

$$D_L(m, n) = \frac{E_L^I}{E_L^I + E_L^P} * D_L^I(m, n) + \frac{E_L^P}{E_L^I + E_L^P} * D_L^P(m, n) \quad (17)$$

其中 $D_L^j(m, n)$ 表示第 j 图位置为 (m, n) 点低频系数； E_L^j 表示第 j 图以 (m, n) 点为中心的 3×3 区域低频系数的能量； $D_L(m, n)$ 为融合后低频图像在 (m, n) 点系数。

采用小波分解融合算法及本文融合算法实验结果如图4和图5所示。为了突出图像纹理细节，图4和图5对原始图像进行 256×256 剪切处理，并且将本文融合算法的结果与小波变换方法融合结果进行比较。图4(a)采用小波变换分解并采用区域能量融合算法得到的融合图像，图4(b)是采用小波变换分解并采用区域方差融合策略得到的融合图像。其中图5(a)采用Directionlets变换分解并采用区域能量融合算法得到的融合图像，图5(b)是采用Directionlets变换分解并采用本文提出的融合策略和算法得到的融合图像。从实验结果可以看出采用Directionlets变换并采用本文提出的算法可以在保留原始图像细节。

除了采用主观评价融合后图像效果，还需采用客观评价，表1给出了几种融合算法的定量分析对比。一般采取的评价指标有信息熵、交叉熵、均值、标准差等^[12]。

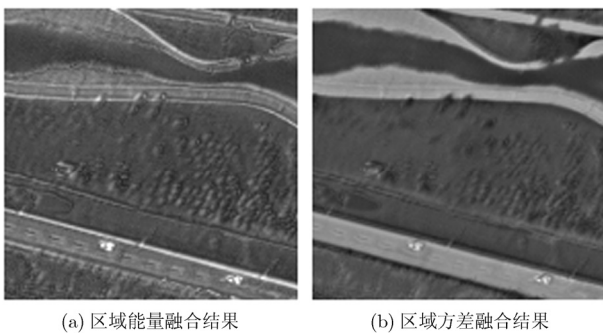


图4 采用小波变换分解的融合后图像

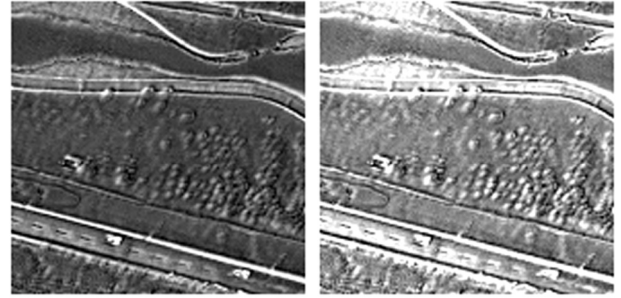


图5 采用Directionlets变换分解的融合后图像

表1 文中几种融合算法的融合图像定量指标

融合算法	均值	标准差	熵值	与图I的交叉熵	与图P的交叉熵
小波能量	92.59	24.817	6.37	3.325	3.377
小波方差	91.78	32.215	6.29	1.986	2.558
方向波能量	99.64	45.628	6.58	4.458	5.073
本文融合法	153.65	53.627	7.17	0.627	7.824

从定性和定量的分析中看出，基于多分辨思想的算法都能取得较好的效果，但不同融合规则的选用对融合结果有不同的影响。本文提出的融合策略考虑了不同分辨率、不同尺度、不同方向的细节特征，对不同类区域采取不同的融合规则，既考虑了不同方向细节特点，又对噪声引起的伪边缘也较好地分辨出来，使细节更加丰富和真实，同时又考虑了整体性视觉效果，所以融合效果较好。

6 结论

偏振图像独特的偏振特性可以得到对比度明显但边缘或纹理信息弱的偏振强度图像以及边缘和纹理信息丰富但对比度差的偏振度图像，因而将两者相互融合处理可以获得符合人类视觉效果的融合图像。

由于Directionlets变换独特的边缘信息表达方式，能自适应地跟踪图像的几何正则方向，能实现高效的非线性边缘逼近，对偏振度图像所具有的多边缘多纹理的特性非常适合。

从实验的结果可知，基于Directionlets变换的图像分解方法由于采用整数格的图像分割方式，使图像分解获得多方向性，同时分解采用各向异性小波变换，可以获得更多的多尺度、多分辨率及多方向性小波变换。Directionlets变换既采用了目前多尺度几何分析的多方向分解特性，能更好地跟踪图像的边缘细节，又采用了可分离的小波变换分解方式，在滤波器设计和图像分解方面更加简单快捷，同时

将小波变换发展成为各项异性小波变换,使得图像分解获得的方向更多,对图像融合有非常重要的作用。Directionlets变换为偏振图像分解变换以及图像的融合处理提供了一种新的方法。

参考文献

- [1] Medkour T and Walden A T. Statistical properties of the estimated degree of polarization [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2008, 56(1): 408-414.
- [2] 张晶晶, 方勇华. 基于边缘信息的偏振图像融合算法及评价[J]. *光电工程*, 2007, 34(11): 78-82.
Zhang Jing-jing and Fang Yong-hua. Algorithm and evaluation for polarization image fusion based on edge information [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, 34(11): 78-82.
- [3] Wolter P T and Townsend P A. Multi-sensor data fusion for estimating forest species composition and abundance in northern Minnesota [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(2): 671-691.
- [4] 汤志伟, 王建国, 黄顺吉. 使用小波分析的图像融合算法[J]. *电子科技大学学报*, 2000, 29(2): 122-125.
Tang Zhi-wei, Wang Jian-guo, and Huang Shun-ji. An image fusion algorithm based on wavelet transformation [J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2000, 29(2): 122-125.
- [5] Dacunha A L, Zhou J, and Donoho M N. The nonsubsamped contourlet transform: theory, design, and application [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, 15(10): 3089-3101.
- [6] 杨晓慧, 贾建, 焦李成. 基于活性测度和闭环反馈的非下采样 Contourlet域图像融合[J]. *电子与信息学报*, 2010, 32(2): 422-426.
Yang Xiao-hui, Jia Jian, and Jiao Li-cheng. Image fusion algorithm in nonsubsamped contourlet domain based on activity measure and closed loop feedback [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(2): 422-426.
- [7] Velisavljevic V, Beferull L B, Vetterli M, et al. Directionlets: anisotropic multi-directional representation with separable filtering [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, 15(7): 1916-1933.
- [8] Velisavljevic V, Vetterli M, and Beferull L B. Sparse image representation by directionlets [J]. *Advances in Imaging and Electron Physics*, 2010, 161(c): 148-209.
- [9] 林玉池, 刘启海, 陶力, 等. 一种基于Directionlet变换的图像融合算法[J]. *纳米技术与精密工程*, 2010, 8(6): 565-568.
Lin Yu-chi, Liu Qi-hai, Tao Li, et al. An image fusion algorithm based on directionlet transforms [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2010, 8(6): 565-568.
- [10] Ahmed B and Redissi A. An automatic sleep spindle detector based on wavelets and the teager energy operator[C]. International Conference of Engineering in Medicine and Biology Society, Minneapolis, Minnesota, USA, Sept. 3-6, 2009: 2596-2599.
- [11] 刘贵喜, 陈文锦, 刘纯虎. 基于方向对比度和区域标准差的图像融合方法[J]. *仪器仪表学报*, 2005, 26(6): 628-631.
Liu Gui-xi, Chen Wen-jin, and Liu Chun-hu. An image fusion method based on directional contrast and area-based standard deviation [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2005, 26(6): 628-631.
- [12] 闫莉萍, 刘宝生, 周东华. 一种新的图像融合及性能评价方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2007, 29(4): 509-513.
Yan Li-ping, Liu Bao-sheng, and Zhou Dong-hua. Novel image fusion algorithm with novel performance evaluation method [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2007, 29(4): 509-513.

张德祥: 男, 1968年生, 副教授, 研究方向为遥感图像处理.

张晶晶: 女, 1976年生, 副教授, 研究方向为偏振图像处理.

吴小培: 男, 1966年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为盲源信号处理.

高清维: 男, 1966年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为遥感图像处理.