

# 基于多小波融合的偏振探测去雾技术

张肃<sup>1\*</sup>, 战俊彤<sup>1</sup>, 付强<sup>1</sup>, 段锦<sup>2</sup>, 姜会林<sup>1</sup>

<sup>1</sup>长春理工大学空地激光通信国防重点学科实验室, 吉林 长春 130022;

<sup>2</sup>长春理工大学电子信息工程学院, 吉林 长春 130022

**摘要** 随着雾霾等恶劣天气的日益加强及战场烟尘环境对军事作战的影响,在烟雾环境下对目标的辨认、探测与识别受到了广泛的关注。基于此,提出多小波融合的偏振探测去雾技术,该技术以目标偏振探测为基础,应用多小波的对称性、正交性和紧支集性等优点,根据分解后高、低频系数所具有的特点分别采用不同的规则对目标偏振信息进行融合。相比于传统小波融合,该算法更易突显目标轮廓及反映目标的细节信息。利用该技术对实际烟雾环境下的目标进行大量外场探测实验,分别对图像的主观评价和客观评价标准进行验证,结果表明该技术在主观视觉效果及对比度、清晰度、空间频率等客观评价方面都具有显著优势,提高了雾天环境下目标的识别效率。

**关键词** 物理光学; 目标偏振探测; 去雾技术; 多小波算法; 图像融合

中图分类号 O436.3

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.122602

## Polarization Detection Defogging Technology Based on Multi-Wavelet Fusion

Zhang Su<sup>1\*</sup>, Zhan Juntong<sup>1</sup>, Fu Qiang<sup>1</sup>, Duan Jin<sup>2</sup>, Jiang Huilin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Fundamental Science on Space-Ground Laser Communication Technology Laboratory,  
Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

<sup>2</sup>School of Electronics and Information Engineering, Changchun University of Science and Technology,  
Changchun, Jilin 130022, China

**Abstract** With the recently increasing influence of haze/fog and other inclement weathers and the expanding impact of smoke and dust in the battlefield on military operations, the identification, detection and recognition of targets in smoke and fog environment draw much more attentions. Thus based on this point, the polarization detection defogging technology based on multi-wavelet fusion is proposed. This technology is built on the target polarization detection and simultaneously combined with the merits of multi-wavelet, such as symmetry, orthogonality and compact support. According to the features of the high and low frequency coefficients, the different fusion rules are adopted for the fusion of target polarization information. This algorithm is much easier to get the prominent target contour and detail information than the traditional wavelet fusion. A large number of outfield target detection experiments are applied in the actual fog and haze environment. Both the subjective and objective evaluation criteria show that this technology has obvious advantages in the subjective visual effect and the objective evaluation aspects of contrast, definition, spatial frequency and so on, which can increase the identification efficiency of targets in fog environment.

**Key words** physical optics; target polarization detection; defogging technology; multi-wavelet algorithm; image fusion

**OCIS codes** 260.5430; 110.5405; 100.7410; 100.3005

收稿日期: 2018-08-02; 修回日期: 2018-08-23; 录用日期: 2018-09-06

基金项目: 国家 973 计划、吉林省科技厅重点科技攻关项目(20160204066GX)

\* E-mail: susiezhang21@126.com

## 1 引言

随着环境污染问题的日趋严峻及受到战场作战特定环境下产生的大量烟尘的影响,空气中的污染液滴及颗粒浓度大幅提升,产生的烟雾环境<sup>[1]</sup>极大地降低了来自探测目标的能量。人眼及传统探测设备通过探测目标的强度来达到识别目标的方法<sup>[2]</sup>,在这一特定环境下,受到了极大的限制。偏振成像在传统成像的基础上引入目标的偏振信息,反映目标的内在本质状态(如形状、结构、材质等)<sup>[3-4]</sup>,在雾霾等恶劣天气环境下不再依赖于单纯的光强成像,而是通过目标的偏振差异进行探测识别,为目标识别提供了一种新的方法。

但在这种低对比度、低能见度、低信噪比的天气环境影响下,单一使用偏振成像会导致成像亮度不足,而传统相机成像又很难满足目标探测的细节需求。为了解决这一问题,许多研究者将目标强度图像与携带有偏振信息的图像进行融合,提高了目标的识别能力<sup>[5-6]</sup>。现有的图像融合算法主要分为像素级<sup>[7]</sup>、特征级<sup>[8]</sup>和决策级<sup>[9]</sup>融合三个层次,其中像素级融合方法在偏振图像的清晰度处理中有着广泛的应用前景。基于像素级融合的单分辨率方法可以简单地完成对两幅图像的融合,但容易产生边缘噪声和信息丢失的现象<sup>[10]</sup>。应用小波变换的多分辨率融合方法可根据小波多尺度的特性,对图像的高频及低频信息分别应用不同的规则进行融合,能很好地改善单分辨率融合的不足<sup>[11]</sup>。在小波融合的基础上,陈振跃等<sup>[12]</sup>将 HSI (Hue, Saturation, Intensity)颜色空间与小波变换相结合应用到多光

谱图像和偏振图像的融合中,得到具有多个波段光谱特征及偏振特征的目标图像。为了提高特定场景下拍摄的速度,近年来提升小波融合方法也应用到偏振探测中,在保证探测目标质量的同时,也极大地减少了融合过程所用的时间<sup>[13]</sup>。

为了提供新的处理方法,并且达到更好的融合效果,在小波融合的基础上,本文采用基于多小波融合的偏振探测技术,其不仅与单小波有相同的时频分析能力,且具有多个尺度和小波函数,在对图像分解与重构时能同时保持对称性、紧支集性和正交性<sup>[14]</sup>。利用分解后的低频系数,根据局部区域能量匹配度确定图像间的匹配性,利用高频系数,通过空间频率及相关系数的判断确定融合后的系数,应用多小波算法及对高、低频系数不同的融合方法使得融合的目标细节信息丰富,边缘轮廓信息清晰,易于在烟雾环境下提高目标的识别效率。与小波融合算法的实验结果进行对比,验证了该算法去除烟雾干扰、识别目标的有效性。

## 2 偏振探测原理

图 1 为偏振探测的实验原理图,其中以自然光作为光源,由于光在自然界中的传输具有偏振特性,所以照射在目标上的自然光为部分偏振光。设此时入射的斯托克斯矢量为  $\mathbf{S} = [I \quad Q \quad U \quad V]^T$ 。在接收部分,首先用偏振片进行检偏,并用 CCD 对目标强度图像进行探测,结果由计算机进行接收。在此过程中,调节偏振片的不同角度( $0^\circ, 60^\circ, 120^\circ$ )可以得到相应的强度图像,此时出射光束的斯托克斯矢量为  $\mathbf{S}' = [I' \quad Q' \quad U' \quad V']^T$ 。

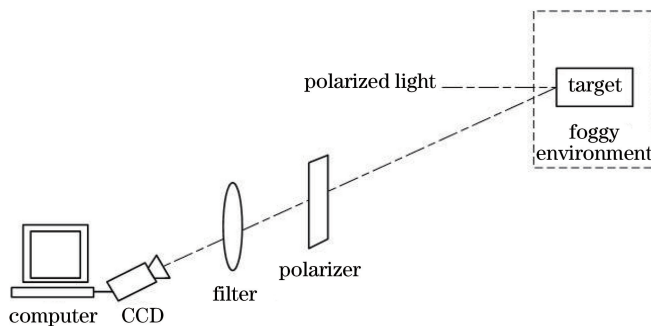


图 1 偏振探测实验原理图

Fig. 1 Schematic of polarization detection experiment

在整个接收过程中,出射光束  $\mathbf{S}'$  与入射光束  $\mathbf{S}$  满足

$$\mathbf{S}' = \mathbf{M}_n \mathbf{M}_{n-1} \cdots \mathbf{M}_1 \mathbf{S}, \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{M}$  为 Mueller 矩阵,用来描述光学元件的特

性;  $n$  为所经过的元件个数。

在图 1 所示的光路中,只有偏振片可改变出射光的偏振特性,则当此偏振片的线偏振  $p$  方向与  $X$  轴夹角为  $\theta$  时, Muller 矩阵  $\mathbf{M}_{-p}$  可表示为

$$\mathbf{M}_{-p} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\theta & \sin 2\theta & 0 \\ \cos 2\theta & \cos^2 2\theta & \cos 2\theta \sin 2\theta & 0 \\ \sin 2\theta & \cos 2\theta \sin 2\theta & \sin^2 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \circ \quad (2)$$

矩阵中最后一行和最后一列表示非线偏振的分量都为0,这是由于在自然界中非线偏振分量极少,易被噪声覆盖,测量仪器通常无法检测,几乎不对探测结果产生影响。将(2)式代入(1)式,则有

$$\begin{bmatrix} I'(\theta) \\ Q'(\theta) \\ U'(\theta) \\ V'(\theta) \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\theta & \sin 2\theta & 0 \\ \cos 2\theta & \cos^2 2\theta & \cos 2\theta \sin 2\theta & 0 \\ \sin 2\theta & \cos 2\theta \sin 2\theta & \sin^2 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中: $I'(\theta)$ 为实验中探测到的光强图像。当偏振片的角度 $\theta$ 分别为 $0^\circ$ 、 $60^\circ$ 和 $120^\circ$ 时,解得 $I'(\theta)$ 分别为

$$\begin{cases} I'(0^\circ) = \frac{1}{2}(I + Q \cos 0^\circ + U \sin 0^\circ) = \frac{1}{2}(I + Q) \\ I'(60^\circ) = \frac{1}{2}(I + Q \cos 120^\circ + U \sin 120^\circ) = \\ \quad \frac{1}{2}\left(I - \frac{1}{2}Q + \frac{\sqrt{3}}{2}U\right) \\ I'(120^\circ) = \frac{1}{2}(I + Q \cos 240^\circ + U \sin 240^\circ) = \\ \quad \frac{1}{2}\left(I - \frac{1}{2}Q - \frac{\sqrt{3}}{2}U\right) \end{cases}, \quad (4)$$

即

$$\begin{cases} I = \frac{2}{3} \times [I'(0^\circ) + I'(60^\circ) + I'(120^\circ)] \\ Q = \frac{2}{3} \times [2I'(0^\circ) - I'(60^\circ) - I'(120^\circ)], \\ U = \frac{2}{\sqrt{3}} \times [I'(60^\circ) - I'(120^\circ)] \end{cases} \quad (5)$$

则偏振度和偏振角分别为<sup>[13]</sup>

$$\begin{cases} D_{\text{dolph}} = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I} \\ A_{\text{PA}} = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{U}{Q}\right) \end{cases} \quad (6)$$

### 3 多小波算法

#### 3.1 多小波变换原理

相比于单小波,多小波的多分辨率分析的尺度函数和小波函数都由一个扩展为多个,即 $\phi = (\phi^{(1)}, \phi^{(2)}, \dots, \phi^{(n)})^T$ 和 $\psi = (\psi^{(1)}, \psi^{(2)}, \dots, \psi^{(n)})^T$ ,则此时 $\{V_j\}_{j \in \mathbb{Z}}$ 是由 $n$ 个尺度函数 $\varphi^{(1)}, \varphi^{(2)}, \dots, \varphi^{(n)}$ 生成 $L^2(\mathbb{R})$ 的一个 $n$ 重多分辨率分析空间,其中 $L^2(\mathbb{R})$ 是所有满足 $\int_{-\infty}^{+\infty} |f(t)|^2 dt < +\infty$ 的函数组成的集合,且存在 $V_j$ 在 $V_{j+1}$ 中的正交补空间 $W_j$ ,有 $\phi^{(1)}(t), \dots, \phi^{(n)}(t) \in W_j$ 。由于 $V_j \subset V_{j+1}$ ,则多小波的两尺度方程可写为

$$\begin{cases} \phi_{jm}(t) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} \mathbf{H}_{k-2m} \phi_{j+1,k}(t) \\ \psi_{jm}(t) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} \mathbf{G}_{k-2m} \phi_{j+1,k}(t) \end{cases}, \quad (7)$$

式中: $\mathbf{H}_{k-2m}$ 和 $\mathbf{G}_{k-2m}$ 都为 $n \times n$ 的矩阵。

若给定任意函数 $f(t)$ ,则对应于 $f(t) \in \{V_j\}$ 的函数可展开为

$$f(t) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} \mathbf{c}_{jk}^T \phi_{jk}(t). \quad (8)$$

对于 $j+1$ 级,有 $V_{j+1} = V_j \oplus W_j$ ,可得

$$\sum_{k \in \mathbb{Z}} \mathbf{c}_{j+1,k}^T \phi_{j+1,k}(t) = \sum_{m \in \mathbb{Z}} \mathbf{c}_{jm}^T \phi_{jm} + \sum_{m \in \mathbb{Z}} \mathbf{d}_{jm}^T \psi_{jm}, \quad (9)$$

式中: $\mathbf{c}_{j+1,k} = (c_{j+1,k}^{(1)}, \dots, c_{j+1,k}^{(n)})^T$ ;  $\mathbf{d}_{j+1,k} = (d_{j+1,k}^{(1)}, \dots, d_{j+1,k}^{(n)})^T$ 。

对(9)式两边同时用 $\phi_{jm}$ 和 $\psi_{jm}$ 作内积,并结合(7)式,可推导出多小波的分解公式:

$$\begin{cases} \mathbf{c}_{jm} = \sum_{k \in \mathbb{Z}} \mathbf{H}_{k-2m} \mathbf{c}_{j+1,k} \\ \mathbf{d}_{jm} = \sum_{k \in \mathbb{Z}} \mathbf{G}_{k-2m} \mathbf{c}_{j+1,k} \end{cases} \quad (10)$$

对应的重构公式为

$$\mathbf{c}_{j+1,k} = \sum_{m \in \mathbb{Z}} (\bar{\mathbf{H}}_{k-2m} \mathbf{c}_{jm} + \bar{\mathbf{G}}_{k-2m} \mathbf{d}_{jm}), \quad (11)$$

式中: $\bar{\mathbf{H}}, \bar{\mathbf{G}}$ 与 $\mathbf{H}, \mathbf{G}$ 互为复共轭转置。

#### 3.2 多小波的变换过程

##### 3.2.1 多小波基函数的选择

经过大量实验验证,对于图像融合过程,选择GHM多小波函数(Geronimo, Hardin, Massopust使用分形插值方法构造的 $r=2$ 的多小波)便可达到图像融合效果。它同时具有连续性、对称性和紧支集性,其由2个尺度函数 $\phi^{(1)}(t), \phi^{(2)}(t)$ 和2个小波函数 $\psi^{(1)}(t), \psi^{(2)}(t)$ 共同构成。对应的尺度系数和小波系数分别为<sup>[15]</sup>

$$\begin{aligned}
 \mathbf{H}_0 &= \begin{bmatrix} \frac{3\sqrt{2}}{10} & \frac{4}{5} \\ -\frac{1}{20} & -\frac{3\sqrt{2}}{20} \end{bmatrix}, \mathbf{H}_1 = \begin{bmatrix} \frac{3\sqrt{2}}{10} & 0 \\ \frac{9}{20} & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix}, \\
 \mathbf{H}_2 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{9}{20} & -\frac{3\sqrt{2}}{20} \end{bmatrix}, \mathbf{H}_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -\frac{1}{20} & 0 \end{bmatrix}, \\
 \mathbf{G}_0 &= \begin{bmatrix} -\frac{1}{20} & -\frac{3\sqrt{2}}{20} \\ -\frac{\sqrt{2}}{20} & -\frac{3}{10} \end{bmatrix}, \mathbf{G}_1 = \begin{bmatrix} \frac{9}{20} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{9\sqrt{2}}{20} & 0 \end{bmatrix}, \\
 \mathbf{G}_2 &= \begin{bmatrix} \frac{9}{20} & -\frac{3\sqrt{2}}{20} \\ -\frac{9\sqrt{2}}{20} & \frac{3}{10} \end{bmatrix}, \mathbf{G}_3 = \begin{bmatrix} -\frac{1}{20} & 0 \\ \frac{\sqrt{2}}{20} & 0 \end{bmatrix},
 \end{aligned} \quad (12)$$

式中:当  $0 \leq k \leq 3$  时,  $\mathbf{H}_k$  和  $\mathbf{G}_k$  为非零矩阵,其余情况都为零矩阵。

### 3.2.2 多小波变换的实现步骤

相比于单小波分解的实现过程,多小波分解前

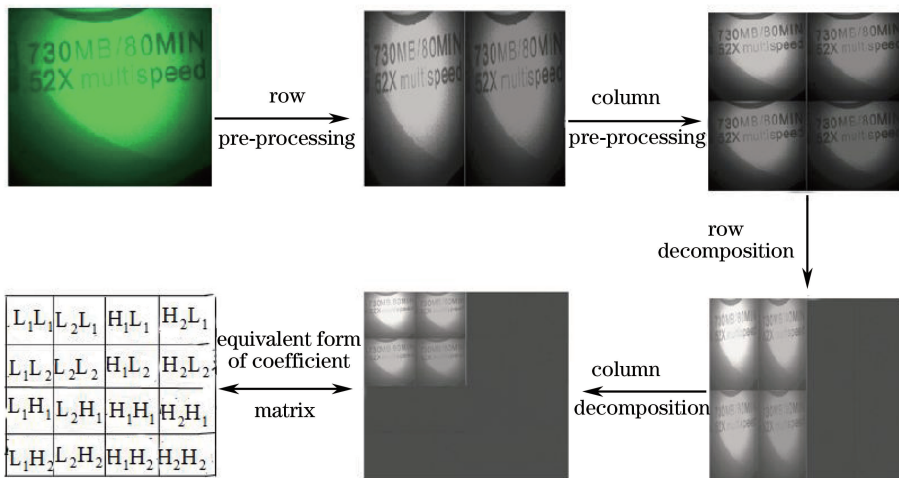


图 2 GHM 多小波的分解步骤

Fig. 2 Decomposition steps of GHM multi-wavelet

## 4 基于多小波的图像融合

经多小波一阶分解后图像可被分解为分别包含低频信息的 4 个子块和包含高频信息的 12 个子块。偏振信息图像经过多小波的分解后得到的低频部分聚集了图像的绝大部分的光强信息、能量信息,这对于能够直接感受到的偏振图像的整体轮廓起到了决定性的作用。因此,采用判断图像间局部区域能量匹配性的方式确定图像间的相关性,与传统采用加

要先将抽样值转换为尺度函数的系数,再来解决展开系数与函数抽样值之间差异的问题。在多小波重构时,也要将这一系数转换回函数值,这就是多小波的预处理与后处理过程。

基于此,多小波变换的具体实现步骤如下:

1) 选择多小波基函数。根据实际的需要与应用场合选择相应的多小波函数。

2) 多小波预处理。分别对图像进行行预处理和列预处理,则行预处理结果中每一行的前半部分和后半部分分别对应第一个尺度函数和第二个尺度函数系数。列预处理则是将尺度函数分别对应每一列的前半部分和后半部分。

3) 多小波分解。与预处理的顺序一致,依次进行行多小波分解和列多小波分析。

根据以上步骤,即可完成一次多小波分解过程,图 2 所示为多小波分解步骤的示意图,其中多小波函数为 GHM 多小波,重数  $n=2$ ,则分解结果中包含 16 个子块,分别包含了低频信息 L 和 高频信息 H。

权平均法的处理方式相比,能够很好地考虑到偏振图像低频系数之间的相关匹配程度,有效地综合图像间的相关、重叠的信息,避免融合后图像中部分有效信息的缺失;而偏振信息图像经过多小波的分解后得到的高频部分代表了图像细节、偏振矢量等边缘、突变纹理信息。因此,采用相关系数判断相关程度,再应用空间频率得到融合后系数的方法,能够更好地表征高频部分的细节信息,使得融合图像的边缘线条更加流畅、清晰、自然,更好地符合人眼对融

合图像细节信息的感知。

#### 4.1 低频融合规则

对于多小波变换得到的系数矩阵图像  $F$ , 其中矩阵元为  $F(x, y)$ , 低频系数中的每一个子块  $F_{-L_p L_q}$  均以如下的规则进行融合:

1. 确定两图像的局部区域能量, 能量表达式为

$$E_{j_i}(x, y) = \sum_{m=-(M-1)/2}^{(M-1)/2} \sum_{n=-(N-1)/2}^{(N-1)/2} W(m, n) \times$$

$$M_{12}(x, y) = \frac{2 \sum_{m=-(M-1)/2}^{(M-1)/2} \sum_{n=-(N-1)/2}^{(N-1)/2} F_{-L_p L_q, j_1}(x+m, y+n) F_{-L_p L_q, j_2}(x+m, y+n)}{E_{j_1}(x, y) + E_{j_2}(x, y)}, \quad (14)$$

式中:  $M_{12}$  的取值表征了两图像间的匹配程度, 即值越大, 匹配性越好。

3. 判断图像间的匹配性

选择适当的阈值  $T$ , 确定图像间的相关性。

1) 当  $M_{12} < T$  时, 由于此时图像间的匹配性较差, 则在局部区域取大能量, 融合后的低频系数为

$$F_{-L_p L_q, j}^{\text{fuse}}(x, y) = \begin{cases} F_{-L_p L_q, j_1}(x, y), & E_{j_1}(x, y) \geq E_{j_2}(x, y) \\ F_{-L_p L_q, j_2}(x, y), & E_{j_1}(x, y) < E_{j_2}(x, y) \end{cases} \quad (15)$$

2) 当  $M_{12} \geq T$  时, 相关性较好, 则此时应充分利用两者之间的信息, 融合后的低频系数为

$$[F_{-L_p L_q, j_i}(x+m, y+n)]^2, \quad (13)$$

式中:  $i=1, 2$ , 分别表示两幅图像;  $p$  和  $q$  的取值为 1 或 2, 4 种不同组合分别用来表示低频系数中的

4 个部分;  $j$  为分解级数; 窗口  $W = \frac{1}{16} \begin{vmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{vmatrix}$ 。

2. 确定图像间的局部区域能量匹配度, 匹配度表达式为

$$F_{-L_p L_q, j}^{\text{fuse}}(x, y) = \frac{E_{j_1}(x, y)}{E_{j_1}(x, y) + E_{j_2}(x, y)} \cdot$$

$$F_{-L_p L_q, j_1}(x, y) + \left[ 1 - \frac{E_{j_1}(x, y)}{E_{j_1}(x, y) + E_{j_2}(x, y)} \right] \cdot$$

$$F_{-L_p L_q, j_2}(x, y). \quad (16)$$

阈值  $T$  是一个自主选择数值, 范围在 0.5~1 之间, 本研究中选择中间值  $T=0.75$  进行计算。

4. 一致性检测

为了避免在低频融合结果中产生突变现象, 对融合后的低频系数进行一致性检测。分别统计两图像中相对应的  $3 \times 3$  邻域中像素值较大的点的个数, 并将融合后的图像在此区域的中心点以个数多的图像区域中心点像素值来定义, 即

$$\begin{cases} M_{\text{Dec}}(x, y) = 1, & F_{-L_p L_q, j_1}(x, y) \geq F_{-L_p L_q, j_2}(x, y) \\ M_{\text{Dec}}(x, y) = 0, & F_{-L_p L_q, j_1}(x, y) < F_{-L_p L_q, j_2}(x, y) \end{cases}, \quad (17)$$

$$C_j^{\text{fuse}}(x, y) = \begin{cases} F_{-L_p L_q, j_1}(x, y), & \sum_{x=m-1}^{m+1} \sum_{y=n-1}^{n+1} M_{\text{Dec}}(x, y) \geq 6 \\ F_{-L_p L_q, j_2}(x, y), & \sum_{x=m-1}^{m+1} \sum_{y=n-1}^{n+1} M_{\text{Dec}}(x, y) < 6 \end{cases}, \quad (18)$$

式中:  $M_{\text{Dec}}(x, y)$  用于统计区域中符合条件的点的个数;  $C_j^{\text{fuse}}$  为融合后的系数。

#### 4.2 高频融合规则

在多小波一阶分解后所得到的 12 个高频子块中, 选择其中一个子块  $F_{-H_1 L_1}$  进行处理, 以此类推, 其他高频系数都用此方法进行融合。具体融合方法

如下:

1. 计算图像空间频率, 频率表达式为

$$f_{-S, j_i} = \sqrt{(f_{-H, j_i})^2 + (f_{-V, j_i})^2 + (f_{-D, j_i})^2}, \quad (19)$$

式中:  $f_{-H}$ 、 $f_{-V}$  和  $f_{-D}$  分别表示高频系数水平、垂直和对角线方向上的频率, 表示为

$$\left\{ \begin{aligned} f_{-H,j_i}(x,y) &= \sqrt{\frac{\sum_{x=1}^M \sum_{y=2}^N [F_{-H_1L_1,j_i}(x,y) - F_{-H_1L_1,j_i}(x,y-1)]^2}{M(N-1)}} \\ f_{-V,j_i}(x,y) &= \sqrt{\frac{\sum_{x=2}^M \sum_{y=1}^N [F_{-H_1L_1,j_i}(x,y) - F_{-H_1L_1,j_i}(x-1,y)]^2}{(M-1)N}} \\ f_{-D,j_i}(x,y) &= \sqrt{\frac{\sum_{x=2}^M \sum_{y=2}^N [F_{-H_1L_1,j_i}(x,y) - F_{-H_1L_1,j_i}(x-1,y-1)]^2}{(M-1)(N-1)}} + \\ &\quad \sqrt{\frac{\sum_{x=2}^M \sum_{y=2}^N [F_{-H_1L_1,j_i}(x-1,y) - F_{-H_1L_1,j_i}(x,y-1)]^2}{(M-1)(N-1)}} \end{aligned} \right. \quad (20)$$

2. 计算图像间的相关系数, 相关系数表达式为

$$R = \frac{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N [F_{-H_1L_1,j_1}(x,y) - u_1] [F_{-H_1L_1,j_2}(x,y) - u_2]}{\sqrt{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N [F_{-H_1L_1,j_1}(x,y) - u_1]^2} \sqrt{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N [F_{-H_1L_1,j_2}(x,y) - u_2]^2}}, \quad (21)$$

式中:  $M \times N$  为  $3 \times 3$ ;  $u_1$  和  $u_2$  分别为图像 1 和 2 在此窗口下的像素均值。  $R$  的取值越大, 两图像间的匹配性越好。

3. 根据选取的阈值判断相关程度, 求得融合后高频系数  $F_{-H_1L_1,j}^{\text{fuse}}(x,y)$ 。

1) 当  $R \geq 0.8$  时, 此时为高度相关, 融合后的高频系数表示为

$$F_{-H_1L_1,j}^{\text{fuse}}(x,y) = \begin{cases} R \times F_{-H_1L_1,j_1}(x,y) + (1-R) \times F_{-H_1L_1,j_2}(x,y), & f_{-s,j_1}(x,y) \geq f_{-s,j_2}(x,y) \\ (1-R) \times F_{-H_1L_1,j_1}(x,y) + R \times F_{-H_1L_1,j_2}(x,y), & f_{-s,j_1}(x,y) < f_{-s,j_2}(x,y) \end{cases} \quad (22)$$

2) 当  $0.3 < R < 0.8$  时, 表示中度相关, 有

$$F_{-H_1L_1,j}^{\text{fuse}}(x,y) = \begin{cases} T_{j_1}(x,y)F_{-H_1L_1,j_1}(x,y) + T_{j_2}(x,y)F_{-H_1L_1,j_2}(x,y), & f_{-s,j_1}(x,y) \geq f_{-s,j_2}(x,y) \\ T_{j_2}(x,y)F_{-H_1L_1,j_1}(x,y) + T_{j_1}(x,y)F_{-H_1L_1,j_2}(x,y), & f_{-s,j_1}(x,y) < f_{-s,j_2}(x,y) \end{cases}, \quad (23)$$

式中:  $T$  为权重系数,  $T_{j_1}(x,y) = \frac{f_{-s,j_1}(x,y)}{f_{-s,j_1}(x,y) + f_{-s,j_2}(x,y)}$ , 且  $T_{j_2}(x,y) + T_{j_1}(x,y) = 1$ 。

3) 当  $R \leq 0.3$  时, 此时为低度相关, 则有

$$F_{-H_1L_1,j}^{\text{fuse}}(x,y) = \begin{cases} F_{-H_1L_1,j_1}(x,y), & f_{-s,j_1}(x,y) \geq f_{-s,j_2}(x,y) \\ F_{-H_1L_1,j_2}(x,y), & f_{-s,j_1}(x,y) < f_{-s,j_2}(x,y) \end{cases} \quad (24)$$

4) 一致性检测

为了保持融合后高频信息的清晰性和流畅性, 用与低频系数融合同样的方法进行一致性检测。

## 5 实验结果

为了验证该技术的去雾能力, 在不同能见度的雾天天气环境下分别对楼房、汽车、铁塔、目标板、草地等不同材质目标进行实验, 在不同能见度条件下

对不同目标分别进行偏振探测及普通可见光探测, 所得的结果作为一组实验结果, 对其中 60 组实验结果进行统计, 其识别效率可达 90% 以上。其中分别给出两组不同雾天能见度条件下的探测结果, 说明该技术的可行性。图 3 所示为在雾天能见度为 6 km 的薄雾环境下进行探测的一组实验结果, 使用普通 CCD 探测器, 调节相机光圈为 1.4, 焦距为 50 m, 其中 4 幅图像分别为未加偏振图像及偏振片

调节角度分别为  $0^\circ$ 、 $60^\circ$  和  $120^\circ$  时所拍摄的偏振图像, 由于雾霾天气的影响, 直接应用可见光相机在距离拍摄地约 1 km 处对楼房进行拍摄, 所成的像并不清晰, 如图 3 所示。

为了进一步获得偏振结果, 将图 3(b)、(c) 和

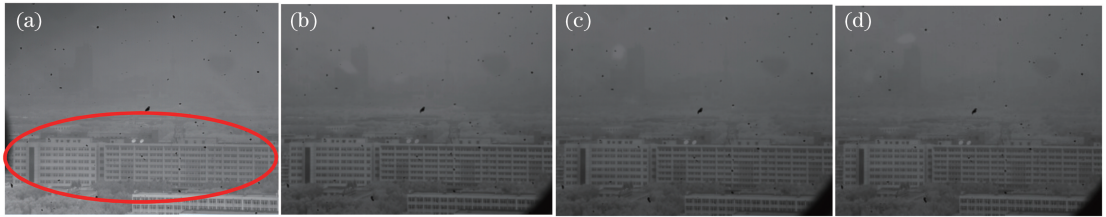


图 3 雾天实验拍摄图像。(a) 未加偏振图像; (b)  $0^\circ$  偏振图像; (c)  $60^\circ$  偏振图像; (d)  $120^\circ$  偏振图像

Fig. 3 Experimental images in fog weather. (a) Unpolarized image; (b)  $0^\circ$  polarized image; (c)  $60^\circ$  polarized image; (d)  $120^\circ$  polarized image

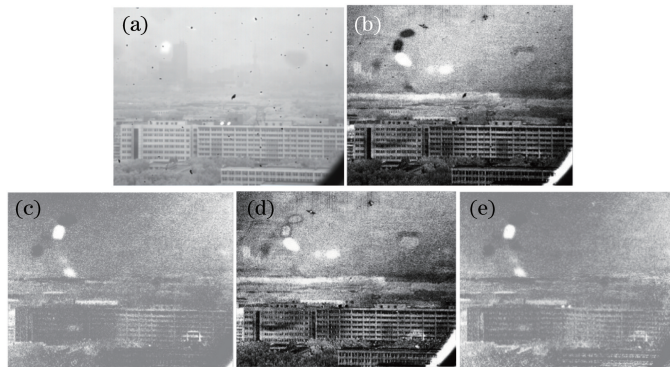


图 4 偏振图像。(a)  $I$  图像; (b)  $Q$  图像; (c)  $U$  图像; (d) 偏振度图像; (e) 偏振角图像

Fig. 4 Polarization images.

(a)  $I$  image; (b)  $Q$  image; (c)  $U$  image; (d) polarization degree image; (e) polarization angle image

由于不同偏振图像中包含了目标的亮度及图像等不同信息, 为了将这些信息综合起来, 更全面地反映目标, 分别应用基于小波和多小波的图像融合方法将得到的强度图像及偏振度图像进行融合, 得到的结果如图 5 所示, 相比于图 3(a) 中未加偏振探测到的图像, 两种融合结果中楼房目标的细节更加突

出, 如图中红色框出部分所示。但通过比较如图 5(b) 所示的多小波融合结果与如图 5(a) 所示的小波融合结果中的楼房目标可以看出, 多小波融合得到的目标轮廓更加清晰, 更易于实现在雾霾天气环境下对目标细节的分辨与识别。

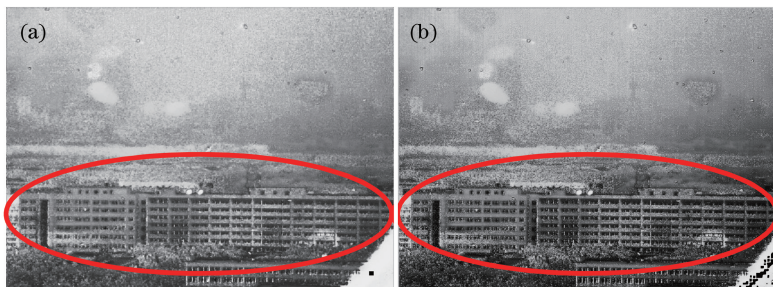


图 5 偏振融合图像。(a) 小波融合结果; (b) 多小波融合结果

Fig. 5 Polarized fusion images. (a) Wavelet fusion result; (b) Multi-wavelet fusion result

为了更客观地给出实验结果, 对融合结果的质量进行客观评价, 本研究对未加偏振图像、小波融合

图像及多小波融合图像的灰度均值、标准差、平均梯度及空间频率等参数进行计算, 其中图像的灰度均

值反映图像的亮度,标准差(对比度)反映图像相对于灰度平均值的离散情况,平均梯度(图像清晰度)反映图像的微小细节及纹理变化特征,空间频率则表征了融合图像的活跃程度。该评价标准可反映目标的对比度、细节等信息,适用于低对比度环境下对目标偏振融合处理结果的质量评价。

分别从像素均值、对比度、清晰度及空间频率等方面对图像的质量进行客观评价<sup>[16]</sup>,结果如表1所示。

表1 未加偏振图像与偏振融合图像质量评价

Table 1 Quality evaluation of unpolarized image and polarized fusion image

Evaluation standard	Mean gray value	Standard deviation (degree of contrast)	Average gradient (degree of clarity)	Spatial frequency
Unpolarized image	118.44	15.79	1.38	2.95
Wavelet fusion image	151.45	50.8	9.76	18.99
Multi-wavelet fusion image	129.06	73.92	18.53	34.88

图6所示为一组在能见度为7.11 km的雾天条件下对目标探测的结果,仍对1 km外的楼房进行探测,为了看清目标细节,选择分辨率(1040 pixel×1040 pixel)更高的探测器。图7为未加偏振图像与偏振信息多小波融合结果对比。将图6中I图像、

偏振度及偏振角信息采用多小波融合方法进行融合,所得的结果如图7(b)所示,与图7(a)中未加偏振探测的普通可见光成像进行对比,可以看出目标边缘信息更加凸显,更易于对目标进行探测。

偏振度及偏振角信息采用多小波融合方法进行融合,所得的结果如图7(b)所示,与图7(a)中未加偏振探测的普通可见光成像进行对比,可以看出目标边缘信息更加凸显,更易于对目标进行探测。

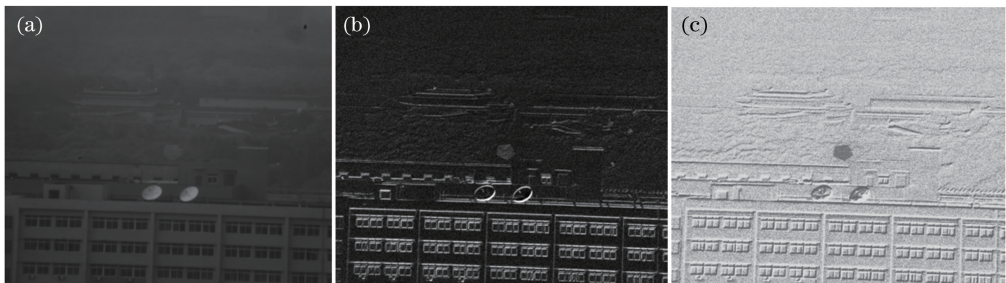


图6 偏振图像。(a) I 图像;(b)偏振度图像;(c)偏振角图像

Fig. 6 Polarized images. (a) I image; (b) polarization degree image; (c) polarization angle image

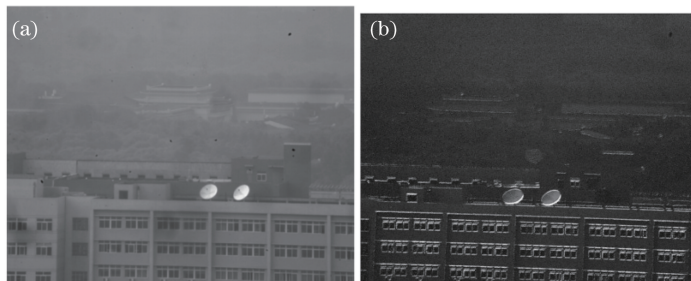


图7 未加偏振图像与偏振信息多小波融合结果对比。(a)未加偏振图像;(b)多小波融合结果

Fig. 7 Comparison between unpolarized image and polarization multi-wavelet fusion result.

(a) Unpolarized image; (b) multi-wavelet fusion result



相比于传统的去雾算法,如对比度拉伸、暗原色先验去雾等方法,该技术旨在凸显目标的边缘等细节信息,且由于偏振探测的应用,该探测技术对金属等目标更为敏感,具有可穿透烟雾、识别真伪的优点,解决了其他去雾算法在对图像的整体灰度进行处理时不易在背景中发现目标的问题。

## 6 结 论

在烟雾天气下对目标进行识别,针对探测过程中的低识别率问题,采用偏振探测的方法代替传统相机成像,并应用基于多小波的融合算法对偏振信息与光强信息进行融合,该算法在对图像分解与重构时能同时满足小波的多特性,可以根据高、低频系数特点,选择不同的方法进行融合。相比于普通相机成像及小波融合算法,多小波融合结果中目标轮廓清晰,细节丰富,在主观视觉效果及对比度、清晰度及空间频率等客观评价方面都具有显著优势,降低了烟雾环境下对目标识别的限制,扩展了偏振探测技术的适用范围。

## 参 考 文 献

- [1] Li L, Jin W Q, Huang Y W, *et al.* Real-time image enhancement processing methods of low contrast visible light over-the-horizon imaging [J]. *Acta Armamentarii*, 2010, 31(2): 242-247.  
李力, 金伟其, 黄有为, 等. 一种低对比度可见光超视距成像的实时图像增强方法[J]. *兵工学报*, 2010, 31(2): 242-247.
- [2] Treibitz T, Schechner Y Y. Active polarization descattering [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2009, 31(3): 385-399.
- [3] El-Saba A, Alam M S, Sakla W A. Pattern recognition via multispectral, hyperspectral, and polarization-based imaging[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7696: 76961M.
- [4] Hu D M, Liu Q, Niu G C. Low contrast target detection based on visible light polarization imaging system[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(6): 061101.  
胡冬梅, 刘泉, 牛国成. 可见光偏振成像系统对低对比度目标的探测[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(6): 061101.
- [5] Shi J S, Jin W Q, Jiang S Q. Study of fusion of visible and IR images based on their correlation[J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5640: 602-609.
- [6] El-Saba A, Bezuayehu T. Fusion of Stocks vector imagery using simple logical operators: application to the problem of surface land mine detection [J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 6972: 69720Q.
- [7] Wu D P, Bi D Y, He L Y, *et al.* A fusion algorithm of infrared and visible image based on NSSCT [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(7): 0710003.  
吴冬鹏, 毕笃彦, 何林远, 等. 基于 NSSCT 的红外与可见光图像融合 [J]. *光学学报*, 2017, 37(7): 0710003.
- [8] Liu F, Shen T S, Ma X X. Convolutional neural network based multi-band ship target recognition with feature fusion[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(10): 1015002.  
刘峰, 沈同圣, 马新星. 特征融合的卷积神经网络多波段舰船目标识别 [J]. *光学学报*, 2017, 37(10): 1015002.
- [9] Wang F C, Liu X T, Huang S C. Target fusion detection with multi-feature based on fuzzy evidence theory[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(3): 713-719.  
王凤朝, 刘兴堂, 黄树采. 基于模糊证据理论的多特征目标融合检测算法 [J]. *光学学报*, 2010, 30(3): 713-719.
- [10] Lü Y X, Gu X H. Filtering algorithm for multi-microphones based on wavelet multi-scale information fusion[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2012, 33(4): 788-794.  
吕艳新, 顾晓辉. 多传声器小波多尺度信息融合滤波算法 [J]. *仪器仪表学报*, 2012, 33(4): 788-794.
- [11] Pan Q. New polarization imaging method based on spatially adaptive wavelet image fusion[J]. *Optical Engineering*, 2006, 45(12): 123202.
- [12] Chen Z Y, Wang X, Zou X F. Polarimetric and multi-spectral image fusion based on HSI color system and wavelet transform [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, 39(S1): 43-47.  
陈振跃, 王霞, 邹晓风. 基于 HSI 颜色空间和小波变换的多光谱图像和偏振图像融合实验研究 [J]. *光子学报*, 2010, 39(S1): 43-47.
- [13] Zhang S, Fu Q, Duan J, *et al.* Low contrast target polarization recognition technology based on lifting wavelet [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(2): 0211002.  
张肃, 付强, 段锦, 等. 基于提升小波的低对比度目标偏振识别技术 [J]. *光学学报*, 2015, 35(2): 0211002.
- [14] Zhang C, Su R G, Zhang S S, *et al.* Fluorescence

discrimination and determination method for phytoplankton composition by SA4 multiwavelet[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(7): 0715003.  
张翠, 苏荣国, 张珊珊, 等. SA4 多小波在浮游藻荧光识别测定技术中的应用[J]. 中国激光, 2011, 38(7): 0715003.

[15] Locke J B, Peter A M. Multiwavelet density

estimation [J]. Applied Mathematics and Computation, 2013, 219(11): 6002-6015.

[16] Zhang Y, Jin W Q. Objective assessment method of night vision fusion image quality [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(5): 1360-1365.

张勇, 金伟其. 夜视融合图像质量客观评价方法[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(5): 1360-1365.