

小波变换方法在高分辨率多光谱图像融合中存在的问题

杨 烜¹⁾ 裴继红²⁾ 杨万海²⁾

¹⁾深圳大学信息工程学院电子工程系, 广东, 深圳, 518060;

²⁾西安电子科技大学电子工程学院, 陕西, 西安, 710071)

摘要 从理论上证明了小波变换法中存在的方块效应和光谱信息损失, 同时证明了方块效应和光谱损失与小波变换的尺度密切相关, 实验结果证明了理论分析的正确性.

关键词 图像融合, 小波变换, 遥感图像分析.

DISADVANTAGE OF THE METHODS BASED ON WAVELET TRANSFORM IN HIGH-RESOLUTION AND MULTISPECTRAL FUSION IMAGE

YANG Xuan¹⁾ PEI Ji-Hong²⁾ YANG Wan-Hai²⁾

¹⁾School of Information Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China;

²⁾School of Electronics and Engineering, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract Disadvantages of wavelet approaches were found by the authors as follows. When the scale of wavelet decomposition is small, mosaic occurs on the fusion image; when the scale of wavelet decomposition is large, color content of fusion image loses greatly, and when the scale of wavelet decomposition is equal to image size, mosaic disappears and color content degrades mostly. It was also found that the mosaic size is equal to the scale. The larger the scale is, the more degradation of color content will be. The reason of the above disadvantages was analyzed carefully based on one-dimensional signal model. Finally, experiments were given to illustrate the disadvantages of wavelet approaches.

Key words image fusion, wavelet transform, remote sensing image analysis.

引言

在遥感图像分析中, 将高空间分辨率的图像和多光谱图像(低分辨率)进行融合, 是遥感图像增强的一个重要研究内容. 高分辨率图像与多光谱图像融合的方法有 IHS 变换法^[1]和小波变换方法^[2~4]. IHS 变换法具有高频信息丰富的特点, 但同时光谱信息损失严重. 小波变换方法可以较好地保留多光谱图像中的光谱信息, 在高分辨、多光谱图像融合方法中一直被认为是最优的一种方法. 研究发现, 该方法得到的融合图像随着小波分解尺度的增大, 会出现明显的、有规律的方块效应, 同时随着尺度的增大, 融合图像的光谱信息出现损失; 当小波分解尺度达到最大时, 方块效应消失, 而融合图像光谱信息的

损失也达到最大. 针对小波变换方法中存在的这些问题, 本文将从理论上证明小波变换存在方块效应的原因, 并分析光谱信息损失的原因.

1 小波变换方法

小波变换方法进行图像融合时, 首先对图像进行小波分解, 选取需要的高频、低频信息重新组合, 然后进行小波反变换, 从而得到需要的融合图像. 假设原始图像表示为 A_1f , 则 A_1f 可以分解到分辨率 2^{-j} 以下^[5], 也就是说, A_1f 可以用分辨率 2^{-j} 下的近似 $A_2^{-j}f$ 和 $3j$ 个差值表示为

$$A_1f = (A_2^{-j}f, (D_{2^j}^1f)_{-j \leq j_1 \leq -1}, (D_{2^j}^2f)_{-j \leq j_1 \leq -1}, (D_{2^j}^3f)_{-j \leq j_1 \leq -1}),$$

这里 $A_2^{-j}f$ 是图像的低频部分, $D_{2^j}^k f$ 是图像垂直方

向上的高频部分, $D_2^2 f$ 是图像在水平方向上的高频部分, $D_2^3 f$ 是图像在对角线方向上的高频部分.

小波变换法对高分辨、多光谱图像进行融合时, 首先将多光谱图像变换到 IHS 色彩空间, 保持色调 H 和饱和度 S 不变, 将高分辨图像的信息与光谱强度 I 进行融合, 得到融合后的光谱强度 I' , 然后将 I' 、 H 、 S 进行反变换到 RGB 空间, 从而得到一幅具有高空间分辨率的多光谱融合图像. 光谱强度的融合方法是: 假设高分辨图像的光谱强度 f_1 , 多光谱图像的光谱强度是 f_2 , 将 f_1 和 f_2 分解到尺度 2^L 下(进行 L 层分解). 选取光谱强度 f_2 的低频分量 $A_{2^{-L}} f_2$ 和高分辨图像的高频分量构造新的频率分量 I'_{DWT} , 对 I'_{DWT} 进行小波反变换, 得到融合后的光谱强度 I' . 光谱强度 I' 中同时包含了高分辨图像的高频信息和多光谱图像的光谱信息. 理论上, 小波方法是最大可能地保留了光谱信息和图像细节, 应该是一种很理想的方法, 一直以来被认为是高分辨、多光谱图像融合的最优方法.

2 存在方块效应的原因

为了简化问题, 我们对一维信号进行分析, 高分辨图像为一维快变信号 s_1 , 多光谱图像的光谱强度为一维慢变信号 s_2 . 利用小波变换对这两个信号进行融合的方法是: 首先将这两个信号在某个小波尺度下进行分解, 然后利用 s_2 的低频分量和 s_1 的高频分量组成一个新的频率成分, 最后利用小波变换可以得到这两个信号的融合信号. 一个好的融合结果应该是具有 s_1 的变化快慢, 同时具有 s_2 的取值范围.

假设一维信号共有 $M = 2^N$ 个采样点, 令 $Z = \{0, 1, 2, \dots, 2^N - 1\}$ 再假设 s_1 和 s_2 为简单的斜坡信号, $s_1 = k_1 i$, $s_2 = k_2 i$, $i \in Z$, $k_1 > k_2$. 我们利用 Haar 小波来进行分析: 将 s_1 和 s_2 在第 L 层进行分解, 小波分解的尺度为 2^L , 将分析信号分解在 $k = 2^L - 1$ 和 $k = 2^L$ 两个尺度相邻点上的低频分量和高频分量. 令 $ca_{2^L}^-(k)$ 为 s_2 在点 k 处的低频分量, $ca_{2^L}^+$ 为 s_1 在点 k 处的高频分量, 则有

$$\begin{aligned} ca_{2^L}^-(2^L - 1) &= \frac{s_2(0) + s_2(1) + \dots + s_2(2^L - 1)}{\sqrt{2}} = \frac{k_2 \sum_{i=0}^{2^L - 1} i}{\sqrt{2}}, \\ ca_{2^L}^-(2^L) &= \frac{s_2(2^L) + s_2(2^L + 1) + \dots + s_2(2^L + 2^L - 1)}{\sqrt{2}} = \frac{k_2 \sum_{i=0}^{2^L - 1} (2^L + i)}{\sqrt{2}} + s_2, \\ ca_{2^L}^+(k) &= \frac{s_1(k) + \dots + s_1(k + 2^{L-1} - 1) - s_1(k + 2^{L-1}) - \dots - s_1(k + 2^L - 1)}{\sqrt{2}} \end{aligned}$$

$$= \frac{2^{2L-2}}{\sqrt{2}} k_1$$

取 s_2 的低频分量 $ca_{2^L}^-$ 和 s_1 的高频分量 $ca_{2^L}^+$, 重构出新的信号 s , 由小波重构定理知, 新信号 s 在 $k = 2^L - 1$ 和 $k = 2^L$ 这两个点上的值为 $s(2^L - 1)$ 和 $s(2^L)$. 将 s_1 和 s_2 在第 L 层分解的低频和高频分量代入, 可以得到重构信号在 $(2^L - 1)$ 和 2^L 两个点上的强度差为

$$\begin{aligned} \Delta &= s(2^L) - s(2^L - 1) = 2^L (\sqrt{2})^{L-1} k_2 - \\ &\quad \frac{2^L (\sqrt{2})^L - 1}{2\sqrt{2} - 1} k_1. \end{aligned} \quad (1)$$

当 L 较大时, $\Delta \approx 2^L (\sqrt{2})^{L-1} k_2 - 2^{L-1} (\sqrt{2})^L k_1$. 考虑到高分辨、多光谱图像融合时, 多光谱图像的钝化程度比高分辨图像严重得多, 一般都可以满足 $k_1 > \sqrt{2} k_2$, 此时可以推出 $\Delta \leq 0$. 同时, 随着 L 的增大, Δ 的绝对值将单调增加, 也就是说, 随着 L 的增大, 重构信号的强度不是单调增加的变化趋势, 而是在尺度边缘的两个点上出现一个向下的跳变. 利用类似的方法可以证明重构信号在一个尺度范围内是单调增加的情况. 也就是说, 小波重构后的一维信号以一个尺度范围为周期, 信号出现周期跳变的情况. 具体地讲, 尺度为 2^1 时, 重构信号在 $k = 2, 4, \dots, 2^N - 2$ 这些采样点上出现跳变; 尺度为 2^2 时, 重构信号在 $k = 4, 8, \dots, 2^N - 4$ 这些采样点上出现跳变; 尺度为 2^L 时, 重构信号在 $k = 2^L, 2^{L+1}, \dots, 2^N - 2^L$ 这些采样点上出现跳变; 尺度为 2^{N-1} 时, 重构信号在 $k = 2^{N-1}$ 采样点上出现跳变; 尺度为 2^N 时, 重构信号都在一个尺度范围内, 此时不存在跳变点, 重构信号呈现单调增加的趋势, 并且单调增加的幅度与信号 s_1 一致. 由于重构信号的低频分量与信号 s_2 的低频分量相同, 即两个信号均值应该相同, 因此重构信号的取值范围与信号 s_2 的取值范围不同, 并且随 s_1 的变化越快 (k_1 越大), 重构信号与信号 s_2 的取值范围差异越大. 这种现象表现在高分辨、多光谱图像融合上就是融合图像出现明显的光谱信息损失, 并且多光谱图像的光谱强度与高分辨图像的高频差异越大, 融合图像的光谱信息损失越严重.

为了说明随着小波变换尺度的增加, 重构信号强度的取值范围发生的变化, 我们分析在 $k = 0$ 这个点上的重构信号强度随尺度变化的情况. 由小波重构定理可知, 在小波变换尺度为 2^L 时, 重构信号在 $k = 0$ 点的强度为

$$s(0) \approx 2^{\frac{3L-3}{2}} k_2 - 2^{\frac{L-3}{2}} k_2 - 2^{\frac{3L-4}{2}} k_1 -$$

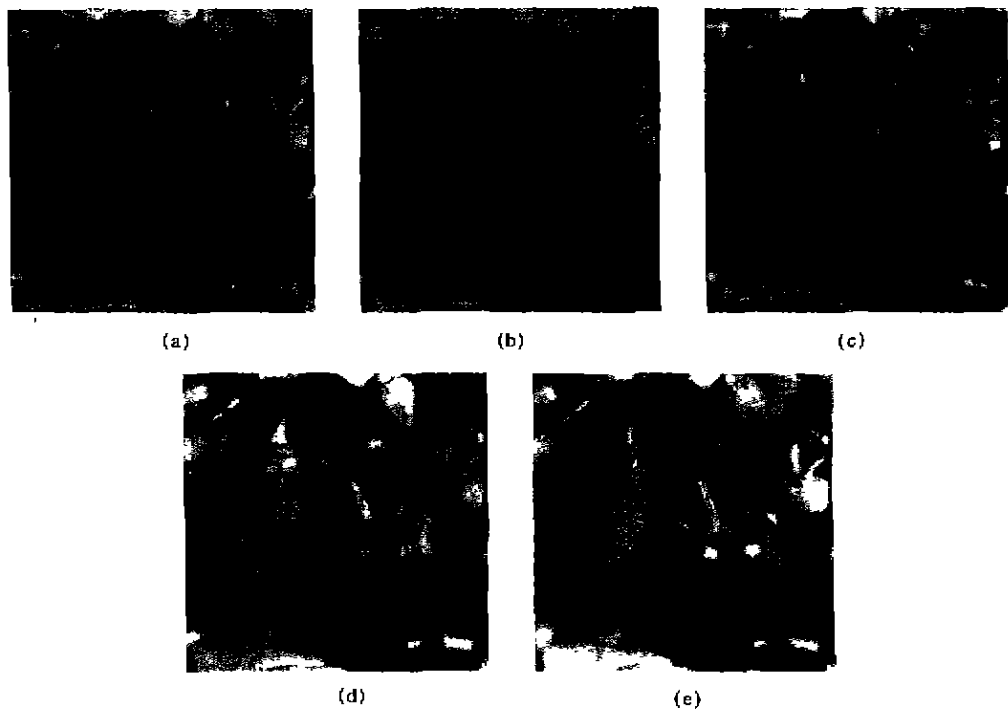


图 1 彩色辣椒图在不同尺度下的融合图像

(a) 原图, (b) $L=2$, (c) $L=4$, (d) $L=6$, (e) $L=8$

Fig. 1 Fusion images of peppers with different decomposition scales

(a) original image, (b) decomposition scale $L=2$, (c) decomposition scale $L=4$,

(d) decomposition scale $L=6$, (e) decomposition scale $L=8$

$$2^{-2}k_1. \quad (2)$$

从式(2)可知,随着 L 的增大,由于 $k_2 < k_1$,则有 $s(0) < 0$,并且随着小波变换尺度的增加, $s(0)$ 的绝对值逐渐增大.也就是说,重构信号的强度取值范围发生了变化,并且随着小波变换尺度的增加,重构信号的取值范围变化愈加剧烈.这一特点表现在融合图像上就是融合图像随着小波变换尺度的增加其光谱信息损失逐渐严重.

一维重构信号在不同小波变换尺度下的这种跳变现象,表现在图像中就是方块效应,即在尺度 2^L 下,融合图像表现为由若干 $2^L \times 2^L$ 大小的方块组成.在每个小方块内,融合图像的高频分量与高分辨图像接近;尺度越大,融合图像在方块内的高频分量与高分辨图像越接近,由于重构信号强度的取值范围随尺度增加而变化剧烈,因此融合图像的光谱信息的损失逐渐增大;当尺度达到最大时($2^L = 2^N$),融合图像的高频成分达到最大,此时融合图像损失的光谱信息也达到最大.

3 实验结果

我们使用彩色 Peppers 图作为理想融合图像,

它对应的灰度图像作为高分辨率图像,其高斯钝化处理后作为多光谱图像,然后利用小波变换法在不同尺度下进行图像融合,如图 1(a)~(e).从图中可以看出,当尺度较小时(图 1(a)和(b))融合图像的细节相对较少,视觉效果比较模糊,但光谱信息保持得比较理想;当尺度逐渐增大后(图 2(c)),融合图像中的方块效应越来越明显,图像细节逐渐丰富,光谱信息也逐渐出现损失;当尺度达到最大时(图 1(e)),融合图像的方块效应消失,图像细节与高分辨率图像几乎完全近似.但此时光谱信息损失最大,这与我们的理论分析结果完全一致.

4 结论

小波变换法一直被认为是最优的高分辨、多光谱图像融合方法,但其融合图像具有方块效应,且随着尺度的增大,融合图像的光谱信息逐渐出现损失.当小波变换尺度达到最大时,融合图像高频信息最丰富,方块效应消失,但光谱信息的损失达到最大.本文针对小波变换方法存在的上述问题,利用一维信号模型证明了方块效应存在的原因,并分析了光谱信息逐渐损失的原因.相应的实验结果证明了理

论分析的正确性. 本文的研究成果可以为高分辨多光谱图像融合方法提供一定的理论参考价值.

REFERENCES

- [1] Carper W J, Lillesand T M, Kiefer R W. The use of intensity-hue-saturation transformations for merging SPOT panchromatic and multispectral image data. *Photogram. Eng. Remote Sens.*, 1990, **56**: 459—467
- [2] Jorge Nunez, Xavier Otazu, Octavi Fors. Image fusion with additive multiresolution wavelet decomposition applications to SPOT + Landsat images. *J. Opt. Soc. Am.*, A, 1999, **16** (3): 467—474
- [3] David A Yocky. Image merging and data fusion by means of the discrete two-dimensional wavelet transform. *J. Opt. Soc. Am.*, A, 1995, **12**(9): 1834—1841
- [4] Zhou J, Civo D L, Silander J A. A wavelet transform method to merge Landsat TM and SPOT panchromatic data. *Int. J. Remote Sensing*, 1998, **19**(4): 743—757
- [5] Mallat S G. Multifrequency channel decomposition of images and wavelet models. *IEEE Trans. Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1989, **37**: 2091—2110