

利用小波变换对影像进行融合的研究^{*}

王智均¹ 李德仁² 李清泉²

(1 武汉测绘科技大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

(2 武汉测绘科技大学校长办公室, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

摘要 基于小波变换可以对影像进行正交分解, 而不丢失原来信号所包含的信息。提出了一种 Wallis 变换、小波变换和 IHS 变换相结合用于融合的方法, 该方法可以有效地提高多光谱影像的空间分辨率, 同时保持原来多光谱影像的色调。

关键词 影像融合; 小波变换; 多分辨率分析; Mallat 算法; 频率域; Wallis 变换

分类号 TP751; P237.3

随着多种遥感卫星的发射成功, 从不同遥感平台获得的不同空间分辨率和时间分辨率的遥感影像形成了多级多分辨率的影像金字塔序列, 给遥感用户提供了从粗到精、从多光谱到细分光谱段的对地观测数据源, 这是现代遥感技术的特点(李德仁, 1994)。Chavez (1991)把影像融合定义为“把多传感器、多分辨率影像结合起来的处理过程”。如图 1 所示, 融合有两方面的优点: ①多传感器融合的盈余信息提高了影像判读的可靠性; ②多传感器的互补信息融合提高了对影像的解译能力。许多研究工作表明, 把高分辨率影像和多光谱影像融合起来, 可以把两种不同传感器的优点结合在一起, 提高对影像的信息分析和提取能力, 以广泛地应用于地形测绘和地图更新、土地资源调查、农业、森林资源调查和保护、军事等领域。

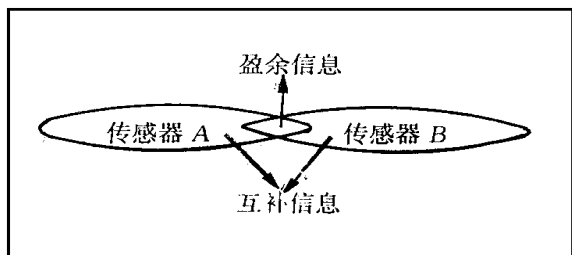


图 1 影像融合的描述

Fig. 1 The Description of Image Fusion

影像融合方法的发展大体可以分为 3 个阶段: (1)简单的影像融合方法, 主要是针对各个图

像通道, 利用一些如替换、算术等简单的方法来实现。应用较广的有 RGB 假彩色合成、IHS 彩色变换(孙家炳, 1998; Schetselaar, 1998)、PCA 主分量变换、分量置换法(李军, 1999)等。这些方法简单易行, 在不同的遥感领域得到应用。在 1998 年洪涝灾害期间, 笔者曾用 RGB 假彩色合成方法制作了大量的洪水灾情监测图, 取得了很好的效果。王智均(1999)也介绍了一种基于灰度调制的 IHS 变换方法, 研究显示, 该方法也能在提高影像空间分辨率的同时而基本保持原来的彩色合成不变。(2)80 年代中期, 随着塔式算子的提出, 在融合领域也出现了一些较为复杂的模型。塔式算法的基本思路是: 把原始影像进行塔式分解, 在不同的分解水平上对影像进行融合, 然后再通过塔式反变换来获得融合影像。(3)进入 90 年代, 小波变换应用到影像融合领域, 用小波变换的多尺度分析替代塔式算法。小波变换作为一种新的数学工具, 它是介于函数的时间域(或空间域)表示和频率域表示之间的一种表示方法。它在时间域和频率域上同时具有良好的局部化性质, 对高频成分采用逐步精细的时间域(空间域)取样步长, 可以“聚焦”到对象的任意细节, 从而被誉为“数学显微镜”。它能够将一个信号分解成信号对空间和时间独立部分, 同时又不丢失原信号所包含的信息, 并且可以找到正交基, 实现无盈余的信号分解。本文提出一种把小波变换和 IHS 变换相结合的方法, 并对该方法进行分析和比较。

收稿日期: 1999-09-14.

*国家自然科学基金资助项目, 编号 49631050.

1 小波理论

设 $\psi(x) \in L^2(R)$, 即 $\psi(x)$ 是可测且平方可积函数 $\int_{-\infty}^{+\infty} |\psi(x)|^2 dx < +\infty$, 如果 $\psi(x)$ 的傅立叶变换 $\Psi(\omega)$ 满足条件:

$$C_\psi = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\Psi(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < +\infty$$

则称 $\psi(x)$ 为基本小波或母小波 (mother wavelet)。母小波 $\psi(x)$ 通过伸缩和平移, 可以生成的函数族 $\{\psi_{a,b}(x)\}$ 为:

$$\psi_{a,b}(x) = |a|^{-\frac{1}{2}} \psi\left(\frac{x-b}{a}\right), b \in R, a \in R - \{0\}$$

式中, $\psi_{a,b}(x)$ 称为连续小波变换或分析小波 (analyzing wavelet)。其中, a 为尺度因子; b 为平移因子。实际工作中取 $a = 2^j, b = 2^j \tau_0$, 称为二进小波。设 $\tau_0 = 1$, 此时 $\psi_{a,b}(x)$ 变为:

$$\psi_{j,k}(x) = 2^{\frac{j}{2}} \psi(2^j x - k)$$

则 $W_f(j, k)$ 的内积形式为:

$$W_f(j, k) = \langle f(x), \psi_{j,k}(x) \rangle$$

文献中常称上式为离散小波变换。数学中的标架理论保证了任意函数 $f(x) \in L^2(R)$ 都可通过它的小波系数 $W_f(j, k)$ 稳定重建。如果 $\{\psi_{j,k}(t)\}$ 构成一个标架, 并且还组成一组线性独立族, 则称 $\{\psi_{j,k}(t)\}$ 为一组 Riesz 基。任何 Riesz 小波可以把完备的内积 Hilbert 空间 $L^2(R)$ 分解成闭子空间 $\{W_j; j \in Z\}$ 的某种直接和, 即 $L^2(R) = \sum_{j \in Z} W_j$ 。

如果定义 $V_j = \dots + W_{j-2} + W_{j-1}$, 则有 $V_{j+1} = V_j \oplus W_j$, V_j 可以理解为 $L^2(R)$ 在 2^j 分辨率水平上的概貌, W_j 则为 V_{j+1} 和 V_j 之间的差别即细节信号。一个尺度函数 $\phi(x)$ 可以生成一个 $L^2(R)$ 的多分辨率分析 $\{V_j\}$ 。根据子空间 V_j 所满足的逐级替换特性, 就把小波变换和多分辨率分析有机地结合在一起。二尺度差分方程是空间逐级二剖分赋予函数 $\phi(x), \psi(x)$ 的最基本性质, 它是许多其他性质的基础。二尺度差分方程阐明了任意两相邻空间剖分 $V_{j+1} \rightarrow V_j, W_j$ 间基础函数 $\phi_{j+1,k}(x)$ 和 $\phi_{j,k}(x), \psi_{j,k}(x)$ 之间的内在联系:

$$\phi_{j,0}(t) = \sum_k h_{0k} \phi_{j+1,k}(x)$$

$$\psi_{j,0}(t) = \sum_k h_{1k} \phi_{j+1,k}(x)$$

h_{0k} 和 h_{1k} 分别为线性组合中的权重系数。设任一函数 $f(x) \in L^2(R)$, 它在 V_j 中的投影设为 $A_j f(x)$ 。 $A_j f_k(k \in Z)$ 称为 $f(x) \in L^2(R)$ 在 V_j 中的离散近似, $D_j f$ 为 $f(x) \in L^2(R)$ 在 W_j 中的

离散细节。

$$A_j f_k = \sum_n A_{j+1} f_n \phi_{-1,k}(x-k),$$

$$\phi_{0,n}(x-n) \rangle = \sum_n h_{0(n-2k)} A_{j+1} f_n$$

$$D_j f_k = \sum_n A_{j+1} f_n \psi_{-1,k}(x-k),$$

$$\phi_{1,n}(x-n) \rangle = \sum_n h_{1(n-2k)} A_{j+1} f_n$$

上式是通过 $A_{j+1} f$ 求 $A_j f, D_j f$ 的公式, 称为分解算法。

由于 $V_{j+1} = V_j \oplus W_j$, 函数 $f(x) \in L^2(R)$, 设它在 V_{j+1} 中的投影 $A_{j+1} f(x)$ 可以用 V_j 中的 $A_j f(x)$ 和 W_j 中的 $D_j f(x)$ 来表示。即

$$A_{j+1} f_n = \sum_k h_{0(n-2k)} A_j f_k + \sum_k h_{1(n-2k)} D_j f_k$$

上式为通过 $A_j f, D_j f$ 求 $A_{j+1} f$ 的公式, 称为重建算法, 又称 Mallat 算法。

从分解和重建算法可见, 多分辨率分析和小波变换是有机地结合在一起的。小波变换用于图像处理是小波应用效果比较突出的领域之一, 由于图像信号是二维信号, 因此需要把小波变换由一维推广到二维。多分辨率分析也是如此。二维图像信号的小波变换可以分成 x 和 y 两个方向的一维小波变换, 即先沿 x 方向分别用 $\phi(x)$ 和 $\psi(x)$ 做分析, 把 $f(x, y)$ 分解成概貌和细节两部分, 然后再沿 y 方向分别用 $\phi(y)$ 和 $\psi(y)$ 做类似的分析。这样得到的 4 路输出经 $\phi(x)\phi(y)$ 处理所得的是 $f(x, y)$ 的二维概貌, 其余 3 路输出分别为 x 方向、 y 方向和对角线 xy 方向的小波细节函数。它的重建也可处理为两个一维方向, 如图 2 所示。图 2 中, $G, H, \tilde{G}, \tilde{H}$ 分别为低通、高通滤波器和它们的时序反转。对影像融合来讲, 不同滤波器所得出的结果影像的质量差别很大。

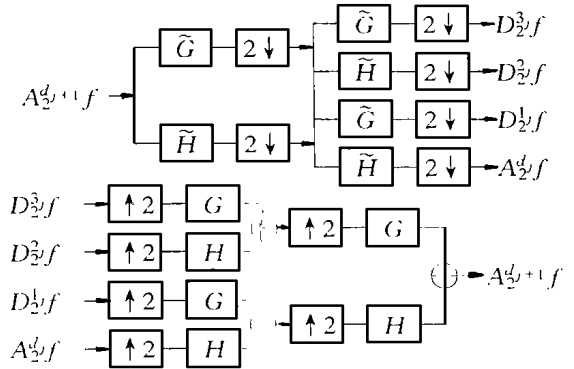


图 2 Mallat 算法的小波分解和重建过程

Fig. 2 The Procedure of Wavelet Decomposition and Reconstruction of Mallat Algorithm

2 小波融合的方法

从信号处理的角度看, 遥感卫星影像是通过

对信号的二维截取、响应和采样形成的。因此对应于同样一块地面景物, TM 影像的采样间隔为 30m, 而 SPOT 影像的采样间隔为 10m; TM 影像的频率域主值区间的截断频率 ω_{mTM} 是 SPOT 影像的频率域主值区间的截断频率 ω_{mSPOT} 的 1/3。也就是说, 如果 SPOT 影像的归一化频域为 $[(-\pi, -\pi) \sim (\pi, \pi)]$, 则 TM 影像的归一化频域为 $[(-\pi/3, -\pi/3) \sim (\pi/3, \pi/3)]$ 。TM 影像相对 SPOT 影像来讲, 仅包含了低频信息, 但它体现了一光谱段的光谱信息, SPOT 影像则包含了更多的空间纹理高频信息。TM 的光谱特性有助于对目标的识别和判读, 而 SPOT 的高分辨率特性有助于提高定位和判读精度。可以通过一些算法对频率域进行分解, 把代表 TM 影像光谱信息的低频分量和代表 SPOT 影像纹理信号的高频分量有效地融合在一起, 这就是对卫星影像进行融合的理论基础。对于影像融合, 在频率域进行比在时间域进行更为有效, 融合算法的设计必须把融合的技术目的和遥感影像的频率域表现即融合理论基础结合起来考虑。从前面介绍的融合方法看, 多是在时间域对影像进行算术运算, 没对处理影像时相应频率域变化进行考虑。不同的方法在频率域有不同的表现, 这种频率域表现是否合适、有理, 在一定程度上说明了融合方法是否有效, 如果没有充分考虑时间域和频率域的互动关系, 融合的效果会受到限制。小波变换由于具有“数学显微镜”聚焦的功能, 因而能实现时间域和频率域的步调统一, 而且能把频率域进行正交分解, 因此, 小波变换在影像融合中的作用越来越大。常用的二进小波变换可以有效地处理分辨率相差为 2^j 倍的情况。如果分辨率相差 3 倍或 5 倍, 则应使用三进小波或五进小波等多进小波算法, 多进小波正是当前小波研究的热点问题。

鉴于多进小波算法仍然在研究之中, 本文的试验仍然采用二进小波。小波融合的方法和思路较多, 如当两种影像的分辨率之比为 1:2 时, 可以直接利用低分辨率影像作为高分辨率影像的 $j=-1$ 级的近似, 再用小波重建的方法把两种影像融合在一起。

笔者采用 Landsat 7 TM743 波段组合和 TM8 波段(全色波段)进行融合, 在融合之前要对其影像数据进行预处理, 如拉伸、直方图均衡等, 使得 TM743 色调均衡、清晰。Wallis 变换的目的是将影像的均值和反差映射到给定的均值和反差, 使得影像不同位置处的灰度均值、反差近似相等; 使影像反差小的区域得到增强, 反差大的区域得到

压缩(张力, 1999)。对 TM8 波段主要进行 Wallis 变换, 使得 TM8 波段影像的反差得到增强, 同时滤除掉噪声。融合的步骤如下:

(1) 把 TM743 采样到和 TM8 数据一样大, 为了保持线性地物的边缘, 常采用 3 次内插方法。

(2) 把 TM743 从 RGB 空间变换到 IHS 空间, 得到 I、H、S 三通道数据, 此时在频率域中, I 的频率间隔和频率区间已调整到和 TM8 一样。

(3) 对 I 和 TM8 进行直方图统一, 目的是使频率域中 I 和 TM8 的幅度值保持一致。

(4) 对 I 和 TM8 分别进行小波分解 ($j=-3$), 在频率域对频率空间进行分解。

(5) 用 I 的近似替代 TM8 的近似, 低频代表了概貌信息, 以保持融合后的色调。

(6) 在相同分解级别上, 取 I 和 TM8 对应的小波系数的较大值组成新的小波系数分量, 因为 TM8 的高频信号比 I 的内容丰富, 同时也为了不丢失 TM743 所包含的纹理信息。

(7) 用新的一组多尺度分析数据进行小波重建, 用以实现 TM8 和 TM743 I 通道的融合, 得到融合后的 I' 通道。

(8) 对 H、S 通道进行中值滤波, 得到去掉噪声的 H' 、 S' 通道。

(9) 利用 IHS 反变换从 $I'H'S'$ 获得融合后的 RGB 影像。

分解和重建滤波器算子及分解水平的选择对影像融合的效果有很大影响。本文通过比较和筛选, 选用的分解水平为 $j=-3$, 滤波器组算子为 Daubechies 小波算子。

3 试验和结论

本文取北京西郊地区最新的 Landsat7 影像为试验区, 另外介绍一种把中值滤波、Wallis 变换、小波变换和 IHS 变换相结合的方法实现数据融合的过程, 该过程充分考虑到每一步在频率域的影响, 从而能有效地把两种影像融合起来。该区域的特点是既有山、水又有城区、农村, 所以可以检验所介绍的融合方法对不同地貌的效果。

图 3 是试验区的一组数据, 图像中左上为山区, 右下为中关村城区, 左下为郊区农村, 中部的湖在颐和园内, 右上的湖在圆明园内。西郊机场也在图像的左下角。融合结果的好坏通常可以用定性分析和定量分析来评价。目视判读仍然是简单有效的定性分析方法, 由图 3(c)和图 3(b)的比较可知, Wallis 变换大大地改善了影像的反差。

由图 3 (a) 和图 3 (d) 的对比看, 融合后影像 (图 3 (d)) 的空间分辨率明显提高, 山区的细节明显, 湖泊和郊区农村的植被色调得到保持, 城区的道路和房屋清晰可见, 从总体上看, 融合影像的空间分辨率得到提高, 且色调得到保持。此外, 结果影像必须具有以下 3 个性质: ① 结果影像被降解到它原来的分辨率时, 必须和原来的影像一样; ② 结果影像应尽可能和高分辨率影像的空间分辨率一样; ③ 结果影像的光谱特性应当和多光谱影像尽可能一样^[12]。定量分析的方法很多, 常用的有比较融合影像和低分辨率多光谱影像的辐射统计参数 (均值、均方差、平均梯度、偏差指数、熵和

影像间的相关系数等)。综合上述方法, 笔者认为把目视判读和检验统计参数中的均值、均方差、偏差指数结合起来考虑是一种简单实用的方法, 如表 1 所示。偏差指数由融合前的强度值 I 和融合后的强度值 I' 经下式计算:

$$D_{\text{index}} = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \frac{|I'(i, j) - I(i, j)|}{I(i, j)}$$

从融合的结果看, 无论是通过目视判读还是通过统计特性的比较, 效果都很好, 原来波段组合的颜色未变 (指人眼对色调的感应能力而言), 偏差仅为 6.54%, 而且几何分辨率得到很大的提高, 判读起来十分清晰。在小波变换应用到影像



(a) 原始 Landsat 7 TM743 波段组合



(b) Landsat 7 TM 8



(c) 经 Wallis 变换后的 (b)



(d) 融合后的结果

图 3 北京西郊地区卫星影像融合

Fig. 3 Remote Sensing Image Fusion of Suburban Area of Western Beijing City

融合的过程中, 分解和重建滤波器算子及分解水平的选择对影像融合的效果有较大的影响, 不合适的算子将会引起斑块效应, 如 Haar 算子。不同的影像分解水平将影响颜色的保真度和细节信号的清晰度。本次试验选用 Daubechies 小波算子, 在 $j = -3$ 时, 效果比较好。

通过本文的试验得出, 影像融合方法的设计必须充分考虑两组影像在频率域的特性, 小波变换能对影像的频率域进行有效的分解和重建, 因而小波变换可以在影像融合中发挥重要作用。小波分解的近似影像包含了影像的绝大部分能量, 小波系数则包含了影像的纹理信息, 而且小波系

数的均值基本为 0, 因而当用 TM8 的影像替换 TM743 的近似影像时, 融合后的影像保持了 TM743 的亮度和反差, 因而色调可以保持不变, 同时提高了影像的几何分辨率。由于未来的传感

器全色波段将会继续保持相对于多光谱具有较高分辨率的特点, 因而该方法的研究和应用将具有普遍意义。

表 1 融合前后 TM743 影像的统计特性比较

Tab. 1 The Statistic Characteristic Comparison of TM743 Composite before and after Image Fusion

	融合前			融合后		
	TM 7	TM 4	TM 3	TM 7	TM 4	TM 3
均 值	112. 97	139. 59	101. 41	112. 84	140. 09	102. 74
均方差	46. 15	43. 17	50. 83	53. 44	51. 53	58. 13
中 值	114	139	102	112	141	100
偏差指数				6. 54%		

参 考 文 献

- 1 杨福生. 小波变换的工程分析与应用. 北京: 科学出版社, 1999
- 2 陈述彭, 童庆禧, 郭华东. 遥感信息机理研究. 北京: 科学出版社, 1998
- 3 姜建国, 曹建中, 高玉明. 信号与系统分析基础. 北京: 清华大学出版社, 1994
- 4 崔锦泰. 小波分析导论. 程正兴译. 西安: 西安交通大学出版社, 1992
- 5 程正兴. 小波分析算法与应用. 西安: 西安交通大学出版社, 1998
- 6 李德仁. 论自动化和智能化空间对地观测数据处理系统的建立. 环境遥感, 1994, 9(1): 1~10
- 7 李 军. 多源遥感影像融合的理论、算法和实践: [学位论文]. 武汉: 武汉测绘科技大学, 1999
- 8 张 力. Wallis 滤波在影像匹配中的应用. 武汉测绘科技大学学报, 1999, 24(1): 24~27
- 9 Coulogner, Ranchin T, Valtonen V P, et al. Benefit of the Future SPOT 5 and Data Fusion to Urban Roads Mapping. INT. J. Remote Sensing, 1998, 19(8): 1519~1532
- 10 David A. Image Merging and Data Fusion by Means of the Discrete Two-dimensional Wavelet Transform. J. Opt. Soc. Am., 1995, 12(9)
- 11 李德仁, 邵巨良. 影像融合与复原的小波模型. 武汉测绘科技大学学报, 1996, 21(3): 213~217
- 12 Schetselaar E M. Fusion by the IHS Transform: Should We Use Cylindrical or Spherical Coordinates. INT. J. Remote Sensing, 1998, 19(4): 759~765
- 13 Sunar F, MUSAOGLU N. Merging Multi-resolution SPOT PAN and Landsat TM Data: The Effects and Advantages. INT. J. Remote Sensing, 1998, 19(2): 219~224
- 14 Fan H, Yang X, Du Y. Application of Principle Component Transform and Inverse Transform for Image Fusion of ADEOS AVNIR XS and PAN. Remote Sensing Technology and Application, 1998, 13(3)
- 15 Zhou J, Civio 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
- 16 Sun J, Liu J, Li J. Multi-source Remote Sensing Image Fusion. Journal of Remote Sensing, 1998, 2(1)
- 17 Castleman K R. Digital Image Processing. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1997
- 18 Liu J, Moore J M. Pixel Block Intensity Modulation: Adding Spatial Detail to TM Band 6 Thermal Imagery. INT. J. Remote Sensing, 1998, 19(13): 2477~2491
- 19 Wald L, Ranchin T, Mangolini M. Fusion of Satellite Images of Different Spatial Resolutions: Assessing the Quality of Resulting Images. PE&RS, 1997
- 20 Mallat S G. A Theory for Multiresolution Signal Decomposition: The Wavelet Representation. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1989, 11(7)
- 21 Wang Z J, Li D R. Image Fusion Based on IM-IHS Transform. The 11st National Remote Sensing Technical Conference, Haikou, 1999

王智均, 男, 31 岁, 博士生, 现从事遥感图像处理、GIS 研究。
E-mail: zjwang@wtusm.edu.cn

Image Fusion with Wavelets Analysis

WANG Zhijun¹ LI Deren² LI Qingquan²

(1 National Laboratory for Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing,
WTUSM, 129 Luoyu Road Wuhan, China, 430079)

(2 Presidential Secretariat, WTUSM, 129 Luoyu Road, Wuhan, China, 430079)

Abstract The definition of image fusion is described by a figure. The evolution of image fusion technique is reviewed and the advantage and shortcoming of those image fusion methods are briefly explained as well. By analyzing formulation theory of remote sensing satellite image in frequency domain, it is concluded that high-resolution image covers more wide frequency domain and low-resolution multi-spectral image covers relatively smaller frequency domain. The requirement for combining the high frequency part of high resolution image with the low frequency part of the low resolution multi-spectral image is arisen from several user groups. Some possibilities to combine the high frequency part of the high resolution images with the low resolution images which are called image fusion methods are proposed by different application purposes. The theoretical basis of image fusion is then given. The basic theory and advantage of wavelets, Mallat algorithm and Wallis transformation are introduced. Wavelets analysis can be used to decompose the image orthogonal while keeping the information of the original image and Wallis transformation can be used to enhance the contrast of weak contrast area and remove the noise. It is found that those benefits of wavelet analysis, Wallis transformation can be used for image fusion. IHS transformation is a common image fusion technique. It can be used to transfer RGB image channels from RGB space to IHS channels of IHS space, the intensity of the image is separated from hue and saturation channels. It provides the possibility to keep the colorful characteristics of the original color composite while modulating the intensity channel. An image fusion method which integrates the advantages of Wallis transformation, wavelets analysis and IHS transformation is proposed. Median filter is also used to remove the noise of the hue and saturation channel. A test area of the suburban area of western Beijing city is chosen to check the proposed image fusion process. The test site includes different topographic geomorphies such as mountain area, rural area, lakes and urban area. It is useful to check the proposed image fusion method whether it can enhance the resolution by checking the details of the mountain area and the roads of urban area and keep the original color composite by checking whether the color of lake surface and the land cover is changed or not. Some quantitative and qualitative evaluation methods are introduced and the results show that details of high resolution image are added to the low resolution multi-spectral images while keeping the spectral characteristics of the original image.

Key words image fusion; wavelet transformation; multi-resolution analysis; Mallat algorithm; frequency domain; Wallis transformation