

遥感图像融合的非采样 Contourlet 变换方法

马艳军 徐立中 汤敏 黄凤辰 马贞立

(河海大学计算机及信息工程学院, 南京 210098)

摘要 有效地融合高分辨率全色遥感图像(PAN)和低分辨率多光谱图像(MS), 均衡融合结果中的空间细节信息和光谱信息两项特征指标, 是多源遥感图像融合技术的难点。为了提高融合后图像的质量, 提出了一种基于非采样 Contourlet 变换(NSCT)的融合方法。由于“非采样 Contourlet 变换”采用非采样滤波器组实现, 具有移不变、高方向性和各向异性的特点, 能够较好地弥补“采样的 Contourlet 变换(CT)”的缺陷, 并且解决了小波变换方向性差的问题。实验中, 以 Landsat TM5 图像和 SPOT 图像进行了算法的验证, 并针对传统的直接替换、绝对值选大和局部方差选大等多分辨率融合算法与离散小波变换(DWT)及“采样的 Contourlet 变换”进行了对比分析, 结果表明, 本文方法在提高空间信息的同时, 可以较好地保持原始多光谱图像中的光谱信息, 弥补了“采样的 Contourlet 变换”在遥感图像融合应用中会导致严重的色彩畸变的缺陷。从而证明了 NSCT 在遥感图像融合领域是一种有效的多分辨率分解策略, 可以被成功的应用到遥感图像融合应用中。

关键词 非采样 Contourlet 变换 小波变换 遥感图像融合

中图分类号: TP751 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2008)11-2209-08

Remotely Sensed Images Fusion Based on Non-subsampled Contourlet Transform

MA Yan-jun, XU Li-zhong, TANG Min, HUANG Feng-chen, MA Zhen-li

(College of Computer and Information Engineer of Hohai University, Nanjing 210098)

Abstract The fusion of multispectral (MS) and panchromatic (PAN) images is the nodus of Remotely Sensed Images Fusion. In order to improve the quality of the fused image, in this paper, a novel fusion strategy based on non-subsampled contourlet transform (NSCT) is presented. Due to the non-subsampled contourlet transform (NSCT) is obtained by coupling a non-subsampled pyramid structure with the non-subsampled directional filter bank (DFB), and the non-subsampled contourlet transform (NSCT) is shift-invariant and high directionality, it can remedy the limitation of the subsampled contourlet (CT) transform and solve the low directional problem of discrete wavelet transform (DWT). In the experiment we used the images of Landsat TM5 and SPOT to validate this strategy, and compared with the DWT and CT use the method of direct replace, chose the maximal absolute value and chose the maximal local Variance. The experimental results show that our method is more effective than other methods in improving the quality of image. This also proves that NSCT is an effective strategy in the field of remotely sensed images fusion, and it can be successfully used in the application of remotely sensed images fusion.

Keywords non-subsampled contourlet transform, wavelet transform, remotely sensed image fusion

1 引言

有效地融合高分辨率全色遥感图像(PAN)和

低分辨率多光谱图像(MS), 均衡融合结果中的空间细节信息和光谱信息两项特征指标, 是多源遥感图像融合技术的研究热点。在近20年中, 这项技术已经取得了长足的发展, 提出了大量的遥感图像融合

基金项目: 国家自然科学基金项目(60374033); 教育部科学技术研究重点项目(107057); 江苏省高技术研究重大项目(BG2006003)

收稿日期: 2007-01-08; 改回日期: 2007-05-31

第一作者简介: 马艳军(1981~), 男。河海大学信号与信息处理专业硕士研究生。研究方向为信息融合, 图像处理。

E-mail: mayanjun@nsbd.cn

方法。

目前应用最多的是基于多分辨率分解的图像融合策略。而离散小波变换 (DWT) 依靠其对图像较好的逼近能力成为目前在图像融合领域中最流行的多分辨率分解策略。

虽然在遥感图像融合领域中,基于 DWT 的各种融合方法已经取得了比较好的效果,但是由于常用的 2 维小波是由两个 1 维正交小波的张量积形成,其方向选择性非常有限。只有水平、垂直、对角线 3 个方向的 2 维小波不能以最“稀疏”的方式表示图像的轮廓及边缘信息,它不是表示图像的最优基^[1],而且容易在图像的边缘产生伪吉布斯效应,造成图像边缘信息的损失^[2],这就使得小波变换在图像融合处理中表现出一定的局限性。因此有必要寻求比小波变换更有效的图像多分辨率分解策略。

为克服小波变换方向选择性差的局限性,近来出现了一些新的多分辨率分解策略,比如 Ridgelet^[3,4], Curvelet^[5], 和 Contourlet^[6-8] 等。这些策略在信息表示方法上比 DWT 更加有效,为图像融合领域注入了新的活力。这些新的多分辨率分解策略是高度方向性和各向各异性的,可以更有效地萃取出图像中的空间细节信息。

特别是 Contourlet 变换 (CT) 在这方面表现的尤为突出,具有高度方向性和各向各异性。Contourlet 变换作为一种“真正”的图像 2 维表示方法,能捕捉到图像信息内在的几何结构特征,也称为塔形方向滤波器组 (PDFB) 分解^[6-8]。它采用双重滤波器组结构,是结合拉普拉斯塔形分解 (LP) 和方向滤波器组 (DFB) 实现的一种多分辨率的、局部的、方向的图像表示方法。

但研究发现由于它的频繁采样,不仅不具有移不变特性,而且会产生频谱混淆,从而导致光谱信息丢失严重,使得它在遥感图像融合中的效果并不明显,甚至比 DWT 还要逊色。然而非常幸运的是 Cunha 等人利用类似 à trous 运算法则的方法实现了非采样 Contourlet 变换 (NSCT)^[9],很好地弥补了 Contourlet 变换的缺陷,并且继承了 Contourlet 变换的高方向性和各向各异性的特点,从而使之在图像融合领域中应用成为可能。

现在对非采样 Contourlet 变换的研究和应用还仅限于图像去噪、图像编码以及边缘提取等领域。考虑到它在图像表示方面的优异表现,本文首次将其引入到遥感图像融合的应用中。通过运用常

用的直接替换、绝对值选大、局部方差选大等多分辨率融合策略对基于 DWT, CT, 以及 NSCT 的融合方法进行了对比实验。通过对实验结果进行比较可以看出,基于 NSCT 的各种融合方法表现都很突出,NSCT 在遥感图像融合中是一种有效的多分辨率分解策略,可以成功地应用到遥感图像融合应用中。

2 CT 与 NSCT 比较分析

2.1 采样的 Contourlet 变换 (CT)

Contourlet 变换是对 2 维图像域内小波变换的一种新扩展,是一种“真正”的图像 2 维表示方法,能捕捉到图像信息内在的几何结构特征,也称为塔形方向滤波器组 (PDFB) 分解。是由 Do 和 Vetterli 于 2002 年在继承 Curvelet 思想的基础上构造出的一种新的多方向多尺度变换。它采用双重滤波器组结构,是结合拉普拉斯塔形分解 (LP) 和方向滤波器组 (DFB) 实现的一种多分辨率的、局部的、方向的图像表示方法^[6]。

该变换的基函数分布于多尺度、多方向上,可仅利用少量系数有效地捕捉图像中的光滑轮廓,而光滑轮廓正是自然图像的主要特征。

Contourlet 变换的基本思想是首先用拉普拉斯多尺度分解捕捉边缘奇异点,再根据方向信息将位置相近的奇异点汇集成轮廓段。Contourlet 变换由拉普拉斯塔式分解 (Laplacian pyramid) 和方向滤波器组 (DFB) 实现^[6-8]。拉普拉斯塔式分解把原始图像分解为低频子带和高频子带。其中低频子带是由原始图像经过 2 维低通滤波和隔行隔列下抽样产生;低频子带经过上抽样和低通滤波后形成与原始图像尺寸相同的低频分量,原始图像减去该低频分量形成高频子带。高频子带再经过方向滤波器组分解为 2^{l_j} 个方向子带 (对于不同的分辨率 j , l_j 可以取不同值)。对低频子带重复上述过程可实现多分辨率多方向分解。图 1 给出了离散 Contourlet 变换的滤波器组结构图,首先对图像进行拉普拉斯金字塔分解得到一个高频子带和低频子带,然后对该高频子带用多方向滤波器组进行处理。并依次对分解出来的低频子带进行下一层的金字塔分解。原始图像经 PDFB 结构多层分解可得到多尺度多方向的子带图像。在实际应用中,方向滤波器的方向数可任意调整,但一般要随着尺度增大而增多。

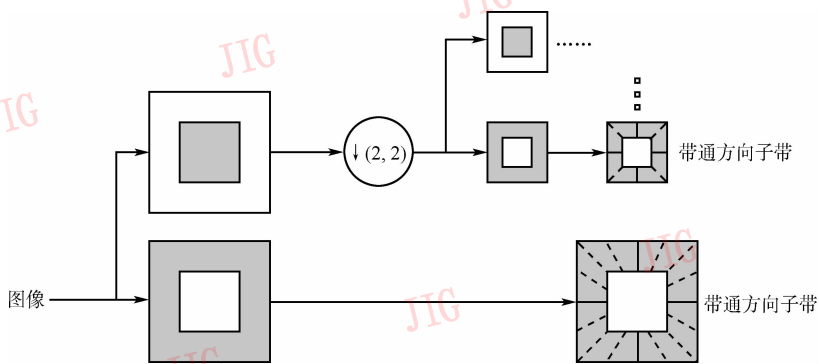


图 1 Contourlet 变换

Fig. 1 The Contourlet transform

2.2 非采样的 Contourlet 变换

采样的 Contourlet 变换通过使用拉普拉斯金字塔分解得到图像的多尺度分解然后利用方向滤波器组得到方向分解。但根据多抽样率理论^[2],对滤波后的图像再进行隔行隔列下抽样会产生频谱混淆,因此采样的 Contourlet 得到的低频子带和高频子带均存在频谱混淆现象。而各方向子带是由高频子带经过方向滤波器组形成,这意味着方向子带也同样存在频谱混淆现象。而且由于拉普拉斯金字塔滤波器和多方向滤波器在分解和重构时都需要进行重采

样,所以不具有移不变特性。然而,易产生频率混淆和不具有移不变特性在图像多分辨率分解融合应用中是较大的缺陷。

Cunha 等人提出了非采样 Contourlet 变换^[9],它是通过构造非采样的金字塔滤波器组和非采样方向滤波器组得到的移不变和各向各异的多分辨率图像表示方法,是 Contourlet 变换的移不变版本。NSCT 通过反复运用非采样滤波器组,来得到图像的移不变方向多分辨率分解^[9-11]。图 2 给出了 NSCT 的示例图和理想频率分割图。

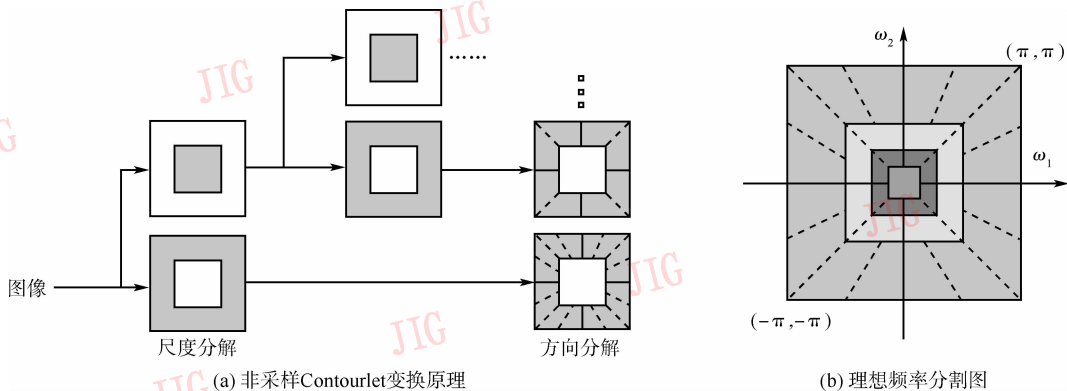


图 2 非采样 Contourlet 变换

Fig. 2 The nonsubsamped Contourlet transform

3 基于多分辨率分解的遥感图像融合方法分析

3.1 基于多分辨率分解的遥感图像融合方法

在遥感图像融合中对多分辨率分解后图像的低频系数(位于最高分解层)一般取 MS 图像的分解系数,以尽可能地保持光谱特性,减少色彩畸变,虽然这样会损失掉 PAN 图像低频分量中的空间信息。

而高频系数的选取有以下几种方法比较常用:

(1) 直接替换

直接替换方法是指直接用 PAN 图像经多分辨率分解后得到的高频系数来取代 MS 图像分解后的相应的高频系数得到融合后的多分辨率分解系数。WTR,CTR,NSCTR 就是分别指利用 DWT,CT,NSCT 进行多分辨率分解,然后利用直接替换方法对高频系数进行选择的融合方法。

直接替换是最简单的多分辨率融合策略,但由

于直接替换掉了 MS 图像的高频分解系数不仅丢失了 MS 图像中互补的空间信息,而且对光谱信息的保持不利,会有较大的色彩畸变。

(2) 绝对值选大

在多分辨率分解后的变换域中,细节系数幅度值较大的位置对应于灰度突变,即对应于边缘、线和区域边界等显著特征,于是产生了绝对值选大的融合策略。

设分解后的 MS 图像的高频系数矩阵 T , 高分辨率全色图像 (PAN) 的高频细节分量的系数矩阵 S , 基于绝对值最大的融合方法融合后的高频系数矩阵 F , (i, j) 表示图像中像素点的坐标。则 F 按以下方法选取:

$$F(i, j) = \begin{cases} T(i, j) & |T(i, j)| \geq |S(i, j)| \\ S(i, j) & |T(i, j)| < |S(i, j)| \end{cases} \quad (1)$$

WTM, CTM, NSCTM 就是分别指利用 DWT, CT, NSCT 进行多分辨率分解, 然后利用绝对值选大方法对高频系数进行选择的融合方法。

绝对值选大方法在一定程度上改善了直接替换策略的融合效果, 也是一种简单而常用的多分辨率融合策略, 是一种“基于像素”的融合规则。然而图像的边缘特征往往不是由一个像素所能表征的, 而是由某一局域多个像素来表征和体现的; 同时, 通常图像中某一局部区域内的各像素间往往有较强的相关性, 因此, 这种基于像素的简单融合规则具有其片面性, 其融合效果有待改善。于是有人提出了局部方差选大的融合策略。

(3) 局部方差选大

设分解后的 MS 图像的高频系数矩阵 T , 高分辨率全色图像 (PAN) 的高频细节分量的系数矩阵 S , 融合后的高频系数矩阵 F 。然后求一个窗口 (一般取 3×3 , 5×5 或者 7×7) 内部的方差, 得到局部方差矩阵设为 M_T 和 M_S , (i, j) 表示图像中像素点的坐标。则局部方差的融合方法融合后的高频系数 F 按以下方法选取:

$$F(i, j) = \begin{cases} T(i, j) & M_T(i, j) \geq M_S(i, j) \\ S(i, j) & M_T(i, j) < M_S(i, j) \end{cases} \quad (2)$$

WTS, CTS, NSCTS 就是分别指利用 DWT, CT, NSCT 进行多分辨率分解, 然后利用局部方差选大方法对高频系数进行选择的融合方法。

3.2 融合的基本步骤

遥感图像融合方法的基本步骤为

(1) 将高分辨率全色图像 PAN 与低分辨率多光

谱图像 MS 进行配准;

(2) 对 PAN 图像和 MS 图像按照一定的多分辨率分解策略分解得到高频分解系数和低频分解系数;

(3) 对多分辨率分解后的系数按照一定的融合规则进行选择, 得到融合后的分解系数;

(4) 将融合后的各分解系数按照多分辨率重构规则进行重构, 得到融合后的图像 F 。

4 实验及其性能评价

实验采用的 MS 图像为 Landsat5 TM 图像 (分辨率 30m), PAN 图像为 SPOT 图像 (分辨率 10m), 这两类图像融合的结果应该是 10m 分辨率的 MS 图像, 但是由于实验条件的限制, 并没有分辨率为 10m 的理想 MS 图像作为参考图像, 来衡量融合算法的性能。为了解决这个问题, 实验做如下设计^[12]:

(1) 把原始的 30m 分辨率多光谱 TM 图像 (其由 2, 3, 4 波段组成分别记作 B 波段、G 波段、R 波段) 作为参考图像, 记为 TM1;

(2) 将 TM1 采样到 90m 分辨率变为降质图像, 记为 TM2;

(3) 将 10m 分辨率的全色 SPOT 图像, 采样到 30m 分辨率, 并记此图像为 SPOT2;

(4) TM2 和 SPOT2 经过几何配准, 大小为 256×256 。

(5) DWT, CT, NSCT 分解层数都设为 3 层。其中, TM1、TM2、SPOT2 分别如图 3、图 4、图 5 所示。基于 DWT, CT 和 NSCT 的直接替换, 绝对值选大, 局部方差选大的融合结果如图 6 ~ 图 8 所示。

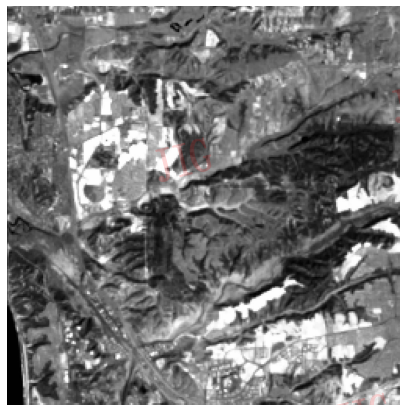


图 3 TM1 (原始 MS 图像, 即参考图像)

Fig. 3 TM1 (Original MS image)

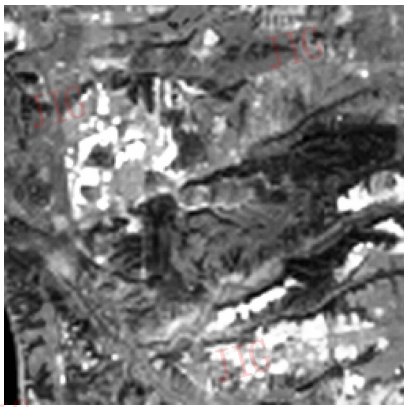


图 4 TM2(降质 MS 图像)
Fig. 4 TM2(Resample MS image)

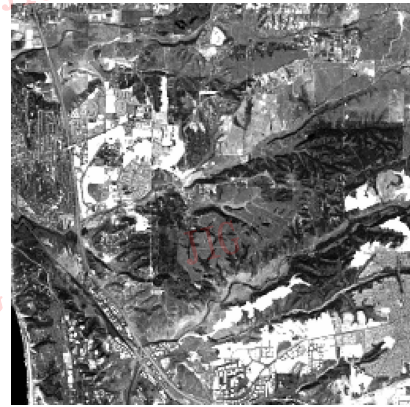


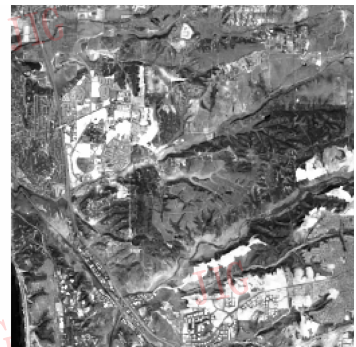
图 5 SPOT(高分辨率 PAN 图像)
Fig. 5 SPOT(Panchromatic image)



(a) WTR融合结果



(b) WTM融合结果

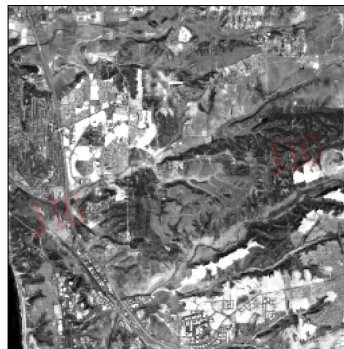


(c) WTS融合结果

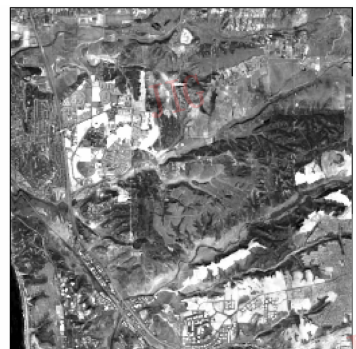
图 6 基于 DWT 的融合结果图
Fig. 6 Fused images based on DWT



(a) CTR融合结果



(b) CTM融合结果



(c) CTS融合结果

图 7 基于 CT 的融合结果图
Fig. 7 Fused images based on CT

利用主观评价方法对各种方法的融合结果进行评价可以看出,各种融合方法得到的结果在空间质量上都比融合前的 TM2 图像有明显的提高,而且基于 CT 和 NSCT 的各种方法比基于 DWT 的融合结果要更接近于参考图像。

另外,可以看出基于 CT 的融合结果有较大的

色彩畸变,而基于 DWT 和 NSCT 的融合结果要好很多,但 NSCT 融合结果更接近于参考图像。所以,基于 NSCT 的融合方法是有效的,NSCT 在遥感图像融合中是一种有效的多分辨率分解策略。下面利用客观评价方法从融合图像的光谱质量和空间细节质量两个方面对融合结果加以分析比较。

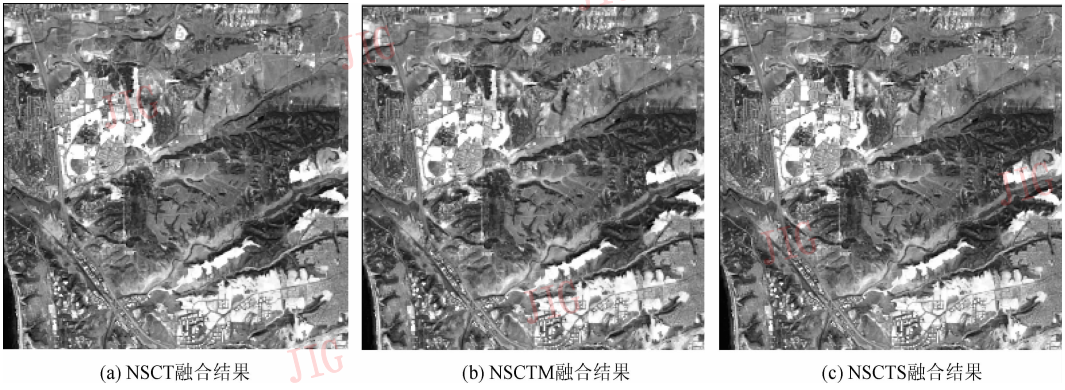


图 8 基于 NSCT 的融合结果图

Fig. 8 Fused images based on NSCT

4.1 融合图像的光谱质量评价^[21]

引入如下衡量融合图像光谱质量的参数:

(1) 相关系数 (correlation coefficient, CC), 是指融合图像的 B、G、R 波段和参考图像 TM1 的对应波段之间相关系数, 融合结果光谱信息保持越多, CC 值越接近于 1, 理想的情况应该是 1。

(2) 相对平均光谱误差指数 (RASE)^[12] 定义如下:

$$RASE = \frac{1}{M} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N RMSE^2(X_i)} \quad (3)$$

式中, M 是参考图像 TM1 所有波段的中值; N 是参考图像 TM1 波段数目, 这里 $N = 3$; $X_i (i = 1, 2, 3)$ 分别对应于 B、G、R 波段; $RMSE(X_i)$ 是 X_i 波段的均方根误差; 其定义如下:

$$RMSE^2(X_i) = bias^2(X_i) + SDD^2(X_i) \quad (4)$$

式中的中值偏差 $bias$ 是参考图像的一个波段的中值与融合图像对应波段的中值的偏差;

标准方差偏差 SDD 是参考图像一个波段的标准方差与融合图像对应波段的标准方差的偏差;

$RASE$ 用百分数表示, 融合图像的光谱质量越高, 则 $RASE$ 越低, 理想情况应该是 0;

(3) 相对整体维数综合误差^[12] (ERGAS)

$$ERGAS = 100 \frac{h}{l} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{RMSE^2(X_i)}{M^2(X_i)} \right)} \quad (5)$$

式中, h 为全色图像的空间分辨率, 这里为 30m; l 为降质 MS 图像的空间分辨率, 这里为 90m; $M(X_i)$ 是融合图像的 X_i 波段的中值; 融合图像的光谱质量越高, 则 $ERGAS$ 越低, 理想情况应该是 0;

表 1 列出了上述各种算法的融合图像与参考图

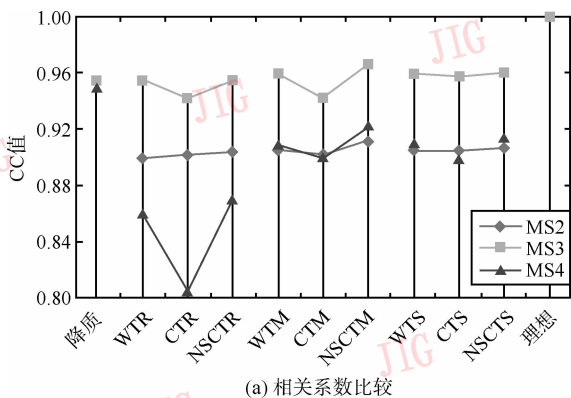
像 TM1 对应波段间的光谱质量参数的数值, 为了更好地进行分析比较, 在表 1 中的第 1 行, 给出了降质的多光谱图像 TM2 与参考图像 TM1 间的光谱参数值, 而最后一行则给出了各参数的理想值。

为了便于观察, 图 9 给出了 DWT、CT 和 NSCT 利用对应的融合策略得到的参数的折线图。

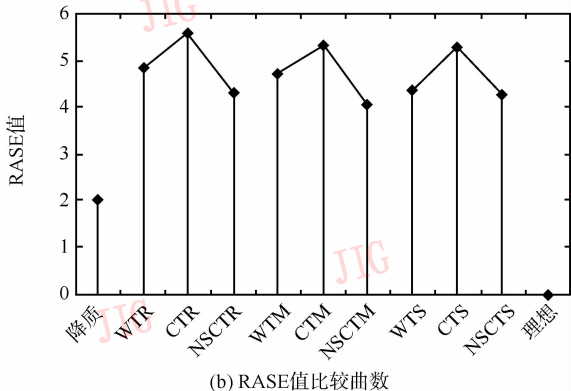
从表 1 中可以看出, 基于 CT 的融合结果的 $RASE$ 和 $ERGAS$ 都较大, 而相关系数 CC 总体偏低, 甚至逊于基于 DWT 的结果。这表明融合结果图像有较严重的光谱失真, 即所谓的色彩畸变。而基于 NSCT 的方法中除了 NSCTR 表现较差外 (但仍然比 WTR 和 CTR 效果要好), NSCTM 和 NSCTS 都取得了很好的效果, 尤其 NSCTM 表现得最好, 参数 CC 较其他的融合算法都高, 更接近于 1; 而 $RASE$ 、 $ERGAS$ 这两个参数比其他算法的值都小, 也更接近于 0。

表 1 融合图像的光谱质量比较
Tab. 1 Compare spectral quality of fused images

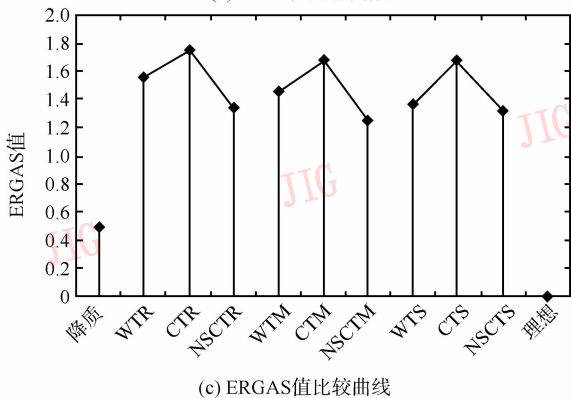
融合方法	CC			RASE (%)	ERGAS	
	B 波段	G 波段	R 波段			
降质	0.953 8	0.954	0.949 4	2.00	0.489 5	
WTR	0.899 6	0.955	0.859 9	4.85	1.547 6	
DWT	WTM	0.904	0.959 4	0.908 7	4.71	1.449 9
	WTS	0.904 6	0.959 6	0.909 9	4.36	1.351 9
	CTR	0.901 9	0.941 8	0.804 9	5.57	1.740 1
CT	CTM	0.902 6	0.942 1	0.900 5	5.32	1.672 3
	CTS	0.904 2	0.956 9	0.898 8	5.29	1.668 2
	NSCTR	0.903 5	0.954 1	0.870 1	4.29	1.330 4
NSCT	NSCTM	0.911 1	0.965 8	0.922 1	4.05	1.241 4
	NSCTS	0.906 4	0.959 9	0.912 6	4.27	1.312 4
理想	1	1	1	0	0	



(a) 相关系数比较



(b) RASE值比较



(c) ERGAS值比较

图 9 光谱质量对比

Fig. 9 The comparative of spectral quality

观察图 9 可知,对于各种融合策略可以得到一个相同的结论:基于 CT 的各种融合方法得到的 CC 值最小,NSCT 得到的 CC 值比 DWT 和 CT 的都大;而 RASE 和 ERGAS 两个参数则是 CT 的最大,NSCT 的最小。也就是说基于 NSCT 的各种方法在光谱信息的保持上最出色。

以上的分析表明基于 NSCT 的融合方法在光谱质量的改善方面优于其他算法。

4.2 融合图像的空间细节质量评价

衡量一个融合算法的融合图像的空间细节质量的高低就是考虑 PAN 图像的空间细节信息“注入”

到整个 MS 图像的多少。为了提高融合图像的空间细节质量,要把 PAN 图像的空间细节信息尽可能多地“注入”到 MS 图像中。

为了评估融合图像的空间细节质量,采用 Zhou 提出的方法^[13],即融合图像与 PAN 图像分别经过拉普拉斯滤波器的滤波以提取细节信息,采用的拉普拉斯滤波模板为

$$\begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 8 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$

记经过拉普拉斯滤波以后的图像波段分别为 B_h 波段、 G_h 波段、 R_h 波段,则拉普拉斯滤波后的融合图像的 B_h 波段、 G_h 波段、 R_h 波段与拉普拉斯滤波后的 PAN 图像对应波段间的相关系数(CC)值越高,就表明在融合过程中,有更多的 PAN 图像的空间信息“注入”到 MS 图像。为进行比较,表 2 中的第 1 行给出了降质图像 TM2 经拉普拉斯滤波后的各波段与 PAN 图像经拉普拉斯滤波后对应波段间的相关系数,最后两行给出了参考图像 TM1 经拉普拉斯滤波后的各波段与经拉普拉斯滤波后的 PAN 图像的相关系数和参数的理想值。

为了便于观察,图 10 给出了 DWT、CT 和 NSCT 利用对应的融合策略得到的参数折线图(图 10 中为了凸显出各种融合方法的空间质量差异将图进行了拉伸处理,降质图像由于相关系数过低没有在图中表示出来,比较时请参照表 2 数据)。

通过观察表 2 和图 10 可以看出,各种融合算法经过融合以后的图像,与降质图像相比都有了明显的提高,而基于 CT 和 NSCT 的融合算法的空间细节质量总体上相差不多,但均优于基于 DWT 的融合方法。

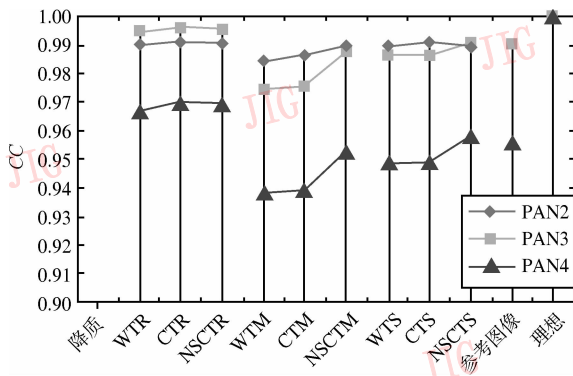


图 10 空间质量对比

Fig. 10 The comparative of spatial quality

表 2 各种融合算法得到的融合图像的空间质量比较

Tab.2 Compare spatial quality of fused images

融合方法	CC 值			
	B _h 波段	G _h 波段	R _h 波段	
降质	0.457 9	0.464 8	0.406 8	
WTR	0.990 2	0.994 9	0.967 5	
DWT	WTM	0.984 4	0.974 3	0.938 6
	WTS	0.989 6	0.986 6	0.948 5
	CTR	0.991 6	0.995 8	0.970 3
CT	CTM	0.986 3	0.975 6	0.939 4
	CTS	0.990 7	0.986 3	0.949 2
	NSCTR	0.990 8	0.995 5	0.969 5
NSCT	NSCTM	0.989 6	0.987 5	0.953 2
	NSCTS	0.990 1	0.991	0.958 4
参考图像	TM1	0.990 3	0.990 2	0.955 7
理想	1	1	1	

在综合考虑光谱质量和空间细节质量的前提下,基于 NSCT 的各种融合方法取得了比较理想的融合效果,不论在光谱信息的保留上还是在空间细节信息的注入上都优于 DWT。而基于 CT 的融合方法除了在空间信息的注入上表现较好外,会导致较严重的色彩畸变,其在遥感图像融合中并不实用。

综上所述,NSCT 在遥感图像融合中是一种有效的多分辨率分解策略。

5 结 论

本文首次将非采样 Contourlet 变换引入到遥感图像融合应用中,并针对传统的多分辨率融合算法与小波变换及“采样的 Contourlet 变换”进行了对比实验,通过对实验结果进行比较分析,可以看出,基于非采样 Contourlet 变换的各种融合方法表现都很突出,可以在提高空间信息的同时,较好地保持原始多光谱图像的光谱信息。改善了传统的多分辨率融合算法的融合效果,弥补了“采样的 Contourlet 变换”在遥感图像融合应用中会导致较严重的色彩畸变的缺陷。从而证明了非采样 Contourlet 变换在遥感图像融合中是一种有效的多分辨率分解策略。

基于非采样 Contourlet 变换的融合方法如何选择高频和低频系数,以进一步提高融合效果是今后努力的方向。

参考文献 (References)

- Candes E J. Harmonic analysis of neural networks [J]. Applied and Computational Harmonic Analysis, 1999, 6(2): 197 ~ 218.
- Lian Qiu-sheng, Kong Ling-fu. The construction of redundant contourlet transform and its application to SAR image despeckling [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2006, 7(28): 1215 ~ 1218. [练秋生, 孔令富. 冗余轮廓波变换的构造及其在 SAR 图像降斑中的应用 [J]. 电子与信息学报, 2006, 7(28): 1215 ~ 1218.]
- Viscito E, Allebach J P. The analysis and design of multidimensional FIR perfect reconstruction filter banks for arbitrary sampling lattices [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 1991, 38(1): 29 ~ 41.
- Donoho D L. Orthonormal Ridgelets and Linear Singularities [J]. SIAM Journal on Applied Mathematics, 1998, 31(5): 1062 ~ 1099.
- Candes E J. Ridgelets: Theory and Applications [D]. Stanford, CA, USA: Department of Statistics, Stanford University, 1998.
- Candes E J, Donoho D L. Curvelets: A Surprisingly Effective Nonadaptive Representation for Objects with Edges [M]. Nashville TN USA: Vanderbilt University Press, 2000: 105 ~ 120.
- Do M N, Vetterli M. Contourlets: A Directional Multiresolution Image Representation [A]. In: Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing [C], Rochester, New York, USA, 2002. 357 ~ 360.
- Do M N, Vetterli M. Contourlets and sparse image expansions [A]. In: Proceedings of International Society for Optical Engineering [C], San Diego, USA, 2003, 5207: 560 ~ 570.
- Eslami R, Radha H. The contourlet transform for image denoising using cycle-spinning [A]. In: Proceedings of A Silo Mar Conference on Signals, Systems, and Computers [C], Pacific Grove, USA, 2003: 1982 ~ 1986.
- Cunha A L, Zhou J, Do M N. The nonsubsampling contourlet transform: theory, Design, and Applications [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(10): 3089 ~ 3101.
- Zhou J P, Cunha A L, Do M N. Nonsubsampling Contourlet Transform: Construction and application in Enhancement [A]. In: Proceedings of International Conference on Image Processing, Piscataway, New Jersey, USA, 2005, 1: 469 ~ 472.
- Cunha A L, Zhou J, Do M N. Nonsubsampling Contourlet Transform: Filter Design and Applications in Denoising [A]. In: IEEE International Conference on Image Processing [C], Genova, Italy, 2005: 749 ~ 752.
- Maía González-Audiciana, José Luis Saleta, Raquel García Catalán, et al. Fusion of multispectral and panchromatic images using improve IHS and PCA mergers based on wavelet decomposition [J]. IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, 2004, 42(6): 1291 ~ 1299.
- Zhou J, Civco D L, Silander J A. A wavelet transforms method to merge Landsat TM and SPOT panchromatic data [J]. International Journal of Remote Sensing, 1998, 19(4): 743 ~ 757.