

文章编号: 0253-2239(2008)01-0074-07

基于非采样 Contourlet 变换的遥感图像融合算法

张 强 郭宝龙

(西安电子科技大学机电工程学院智能控制与图像工程研究所, 陕西 西安 710071)

摘要 为了使融合后的多光谱图像在尽可能保持原始多光谱图像光谱特性的同时, 显著提高空间分辨力, 提出了一种基于非采样 Contourlet 变换(NSCT)的遥感图像融合算法。算法首先对全色波段图像进行非采样 Contourlet 变换, 得到全色波段图像的低频子带系数和各带通方向子带系数; 然后针对多光谱图像的每一个波段, 将其进行双线性插值后作为融合后多光谱图像的低频子带系数, 对全色波段图像的各带通方向子带系数采用基于成像系统物理特性的注入模型(调整系数)进行局部调整后, 作为融合后多光谱图像的各带通方向子带系数, 从而得到融合后多光谱图像的非采样 Contourlet 变换系数; 最后再经非采样 Contourlet 逆变换得到该波段具有高空间分辨力的多光谱图像。采用 IKONOS 卫星遥感图像进行了仿真实验, 实验结果表明, 该算法在光谱保留和空间质量提高方面优于其它传统的遥感图像融合算法。

关键词 信息处理; 图像融合; 非采样 Contourlet 变换; 成像系统物理特性

中图分类号 TP391 文献标识码 A

Remote Sensing Image Fusion Based on the Nonsubsampled Contourlet Transform

Zhang Qiang Guo Baolong

(Intelligent Control and Image Engineering Institute, School of Electromechanical Engineering, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract In order to make the fused multispectral (Ms) images keep the spectrum of the original multispectral images as much as possible and improve the spatial resolution effectively, a novel algorithm for remote sensing image fusion based on the nonsubsampled contourlet transform (NSCT) is proposed. Firstly, the panchromatic (Pan) image is decomposed by the NSCT to obtain the detail information of the Pan image. Secondly, the low frequency subband coefficients of the NSCT are substituted by the band to be fused of the resampled multispectral image and the bandpass directional coefficients of the NSCT are locally adjusted by employing an injection model, in which some physical characteristics of imaging systems are included, and then the NSCT coefficients of the fused multispectral image are attained. Lastly, the fused multispectral image with high spatial resolution is obtained by performing the inverse NSCT on the attained coefficients. Several sets of IKONOS images have been merged by the proposed algorithm. The experimental results demonstrate that the proposed approach outperforms the other traditional methods in the spectral information preservation and in the spatial resolution improvement.

Key words information processing; image fusion; nonsubsampled contourlet transform; physical characteristics of imaging systems

1 引 言

遥感图像融合是指将不同传感器获得的同一区域的不同空间分辨力图像的信息融合在一起, 并利

用它们在时空上的相关性以及信息熵的互补性来获得对地表景物更全面、清晰的描述, 以便于遥感图像的解译与分析^[1]。

收稿日期: 2007-04-24; 收到修改稿日期: 2007-06-18

基金项目: 国家自然科学基金(60572152)和国家 863 计划(2006AA01Z127)资助课题。

作者简介: 张 强(1979—), 男, 山东枣庄人, 讲师, 博士研究生, 主要从事图像的多尺度几何分析及其在图像融合中的应用方面的研究。E-mail: zhangqiang134@163.com

导师简介: 郭宝龙(1962—), 男, 陕西人, 教授, 博士生导师, 主要从事图像处理 and 图像通信、神经网络与模式识别、智能信息处理等方面的研究。E-mail: blguo1199@163.com

传统的像素级遥感图像融合算法包括基于亮度-色调-饱和度(IHS)彩色空间变换、基于主成份分析(PCA)以及基于 Brovey 变换的图像融合算法^[2]。这些方法能够很好地保留全色图像的空间细节信息,但容易引入较严重的光谱失真。近年来,基于小波变换的多尺度分解方法^[3~7]被广泛运用于遥感图像的融合处理中,并取得了成功。此类算法的主要思想是首先对全色图像进行小波变换以提取全色图像的细节信息,然后对提取到的细节信息直接或局部调整后注入到多光谱(Ms)图像中,得到融合图像。该类算法主要是在保留原始多光谱图像光谱信息不变的基础上添加全色图像的细节信息,从而有效解决了上述传统融合算法中光谱失真的问题。然而,小波变换在对二维图像进行分析时不能充分利用图像数据本身所特有的几何特征,挖掘图像中方向边缘信息,使得融合后图像容易引入方块效应,从而降低了融合后多光谱图像的空间质量。

针对小波变换在图像处理中的缺陷,M. N. Do 和 M. Vetterli 提出了一种“真正”的二维图像稀疏表达方法——Contourlet 变换^[8]。相对于小波变换,Contourlet 变换除了具有多尺度、时频局部特性外,还具有多方向特性,允许每个尺度上有不同数目的方向,其基支撑区间具有随尺度而长宽比变化的“各向异性”特性,能够用更少的系数来表达光滑的

曲线,更好地捕捉图像的边缘信息。但是,在对图像进行 Contourlet 变换过程中,需要对图像进行降采样和上采样操作,从而使得 Contourlet 变换缺乏平移不变性,而平移不变性在边缘检测、图像增强以及图像融合等图像处理中都发挥着重要的作用。为此,A. L. Cunha 等^[9]又提出一种具有平移不变性的 Contourlet 变换-非采样 Contourlet 变换(Nonsubsampled contourlet transform, NSCT)。本文在综合分析了非采样 Contourlet 变换特性的基础上,提出了一种基于非采样 Contourlet 变换的遥感图像融合算法。算法首先采用非采样 Contourlet 变换提取全色图像的细节信息,然后采用一定的注入模型对全色图像细节信息进行调整后注入到多光谱图像中,得到融合后的多光谱图像。

2 非采样 Contourlet 变换^[9]

非采样 Contourlet 变换是将多尺度分析和方向分析分开进行,首先采用非采样塔式滤波器组(Nonsubsampled Pyramid Filter Bank, NSPFB)对图像进行多尺度分解,然后再采用非采样方向滤波器组(Nonsubsampled Directional Filter Bank, NSDFB)对得到的各带通子带图像进行方向分解,从而得到不同尺度、方向子带图像(系数)。图 1 给出了非采样 Contourlet 变换的分解结构示意图。

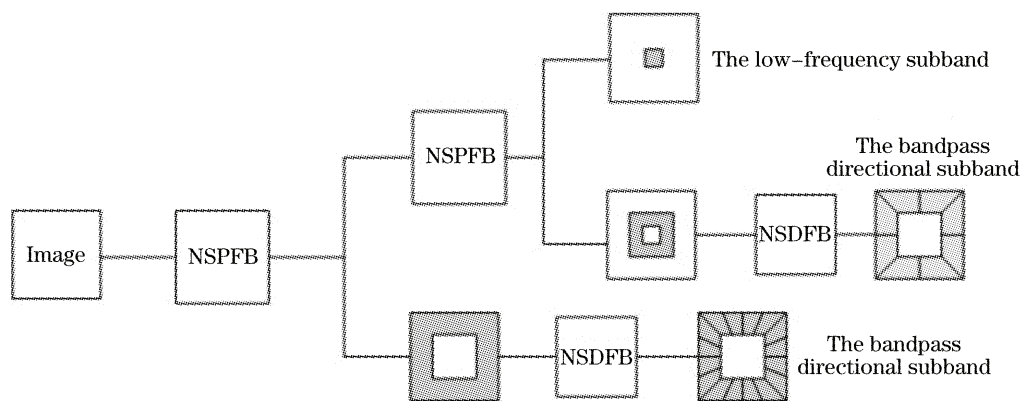


图 1 非采样 Contourlet 变换结构示意图

Fig. 1 The structure of nonsubsampled contourlet transform

非采样 Contourlet 变换采用的非采样塔式滤波器组是一组二通道二维非采样滤波器组。其频谱响应如图 2(a)、图 2(b)所示。为了实现多尺度分解,与一维 à trous 小波变换类似,每一级需要对上一级中所采用的滤波器按采样矩阵 $D=2I$ (其中 I 为二阶单位矩阵) 进行上采样。 j 尺度下低通滤波器的理想频域支撑区间为 $\left[-\frac{\pi}{2^j}, \frac{\pi}{2^j}\right]^2$ 而相应的带通滤波器的理

想频域支撑区间为 $\left[-\frac{\pi}{2^{j-1}} \times \frac{\pi}{2^{j-1}}\right]^2 / \left[-\frac{\pi}{2^j} \times \frac{\pi}{2^j}\right]^2$ 。图像经过 N 级非采样塔式分解后,可得到 $N+1$ 个与源图像具有相同尺寸大小的子带图像。

非采样 Contourlet 变换中所采用的非采样方向滤波器组也是一组二通道非采样滤波器组,其理想频域支撑区间为扇形形状,如图 2(c)、图 2(d)所示。在此基础上,对扇形滤波器 $U_0(z)$ 和 $U_1(z)$ 采用不同的

采样矩阵进行上采样,并对上一级方向分解后的子带进行滤波,可以获得频域中更为精确的方向分解。例如,可以对扇形滤波器 $U_0(z)$ 和 $U_1(z)$ 分别按采样矩阵 $\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$ 进行上采样得滤波器 $U_0(z^{\mathbf{D}})$ 和 $U_1(z^{\mathbf{D}})$,然后再对上一级二通道方向分解后得到的子带图像进行滤波,从而实现四通道方向分解。对于更多方向的分解,需要采用更为复杂的采样矩阵对滤波

器进行上采样。如果对某尺度下子带图像进行 l 级方向分解,可得到 2^l 个与源图像尺寸大小相同的方向子带系数。因此图像经非采样 Contourlet 变换经 N 级分解后可得到 $1 + \sum_{j=1}^N 2^j$ 个与原始输入图像尺寸大小相同的子带图像,其中 l_j 为尺度 j 下的方向分解级数。

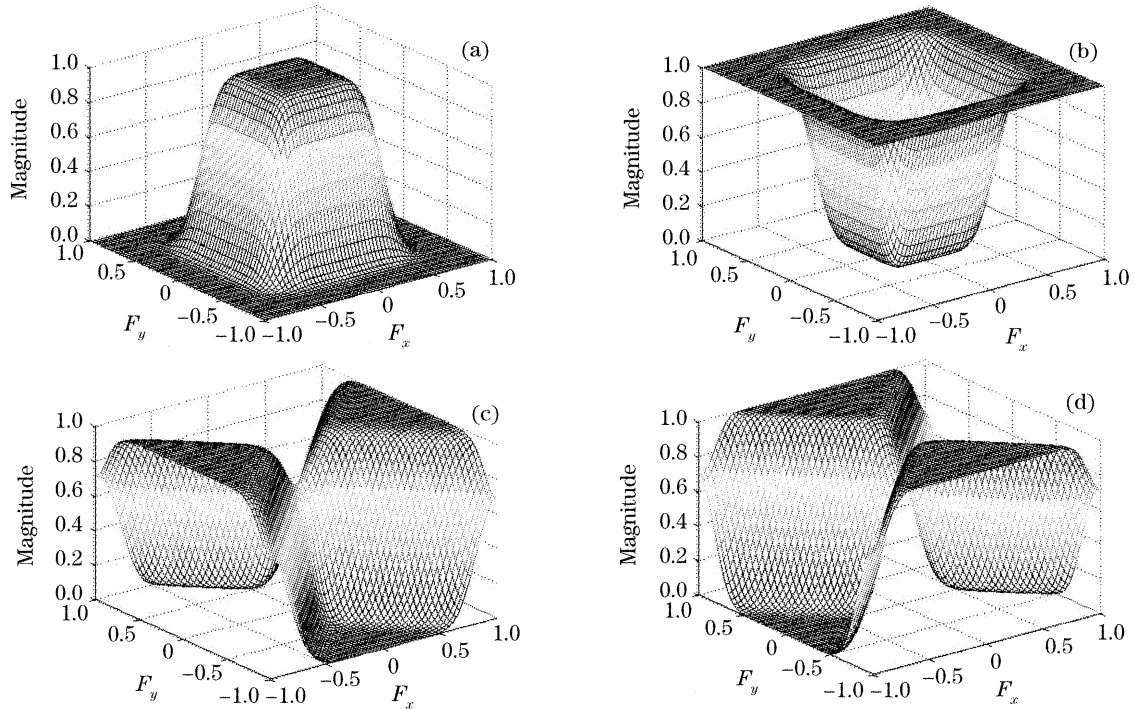


图 2 塔式滤波器及扇形滤波器的频谱响应。(a),(b)为非采样塔式滤波器组中塔式滤波器 $H_0(z)$ 、 $H_1(z)$ 的归一化频谱响应, (c),(d)为非采样方向滤波器组中扇形滤波器 $U_0(z)$ 、 $U_1(z)$ 的归一化频谱响应

Fig. 2 Frequency response of pyramid filters and fan filters. (a),(b) are normalized frequency response of the pyramid filters employed in the NSPFB; (c),(d) are normalized frequency response of the fan filters employed in the NSDFB

3 遥感图像融合

文献[10]指出,第 k 波段高空间分辨多光谱图像 $M_{s_k}^{\text{high}}$ 在某像元位置 (m,n) 处的像素值 $M_k^{\text{high}}(m,n)$ 可近似由相应像元位置处原始多光谱图像的像素值 M_k^{low} 、全色图像空间细节信息 $w(m,n)$ 及相应波段注入模型(调整系数) $\alpha_k(m,n)$ 决定,如(1)式所示:

$$M_k^{\text{high}}(m,n) = M_k^{\text{low}}(m,n) + \alpha_k(m,n)w(m,n). \quad (1)$$

从(1)式可以看出,融合后的多光谱图像是在保持原始多光谱图像的光谱信息不变的基础上,添加了全色图像的细节信息,从而有效地避免了光谱失真现象。融合性能主要取决于全色图像空间细节信息 $w(m,n)$ 的提取以及注入模型 $\alpha_k(m,n)$ 的确定。

3.1 全色图像细节信息的提取

非采样 Contourlet 变换不仅具有良好的空域

和频域局部特性,还具有方向特性,因此能够更好地提取和表示原始图像的特征,为融合图像提供更多的信息。同时,非采样 Contourlet 变换在分解和重构过程中不存在降采样和上采样环节,使得非采样 Contourlet 变换具有平移不变性以及得到各级子带图像与源图像具有尺寸大小相同等特性,在融合过程中能够有效减少配准误差对融合结果的影响以及较容易找到各个子带图像之间的对应关系^[11],从而有利于融合运算的实现。因此,本文采用非采样 Contourlet 变换对全色图像进行分解,以提取全色图像的细节信息。对全色图像进行 N 级非采样 Contourlet 分解,每一级再进行 l_j 级方向分解,从而得到一个低频子带图像, $\sum_{j=1}^N 2^j$ 个方向子带图像 $C_{j,l}^p(m,n)$ 。分解层数 N 取决于全色图像与多光谱图

像之间的空间分辨力之比, l_j 取决于分析图像的大小等因素。

3.2 注入模型 $\alpha_k(m, n)$ 的定义

注入模型定义了如何将全色图像细节信息恰当地注入到多光谱图像中, 使得融合后的多光谱图像在提高空间质量的同时, 尽可能地保持原始多光谱图像的光谱特性。文献[12]以快鸟(Quick Bird)卫星为例, 将成像传感器光谱响应等因素引入到注入模型中, 取得了良好的效果。针对 IKONOS 卫星, 文献[4]从成像系统成像机理出发, 提出了一种基于成像系统物理特性的注入模型。针对 IKONOS 卫星图像的融合, 本文采用成像系统物理特性模型作为注入模型。下面简单描述该注入模型的定义[4]。

对于 IKONOS 卫星图像, k 波段(包括红, 绿, 蓝, 近红外四个多光谱波段和一个全色波段)图像在 (m, n) 位置处的像素值 $N_k(m, n)$ 可近似取决于 k 波段成像传感器相对光谱响应函数 $R_k(\lambda)$ 、地表光谱反射率 $\rho(m, n, \lambda)$ 以及各波段辐射调整系数 C_k 等因素, 如(2)式所示, 而对于其它如有关大气特性等复杂因素都包含在地表端太阳辐射能量 $E(m, n, \lambda)$ 参量中:

$$N_k(m, n) = C_k \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \rho(m, n, \lambda) R_k(\lambda) E(m, n, \lambda) d\lambda, \quad (2)$$

为此, 文献[4]在注入模型中引入了三个注入模型因子 $\alpha_k^{(1)}(m, n)$ 、 $\alpha_k^{(2)}(m, n)$ 、 $\alpha_k^{(3)}(m, n)$, 分别用来表征上述三个因素对融合性能的影响。 $\alpha_k^{(1)}(m, n)$ 定义为

$$\alpha_k^{(1)}(m, n) = \alpha_k^{(1)} = \frac{A_{k,p}}{A_p} = \frac{A_k \cap A_p}{A_p} = \frac{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \min[R_k(\lambda), R_p(\lambda)] d\lambda}{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} R_p(\lambda) d\lambda}, \quad (3)$$

其中 $R_k(\lambda)$ 、 $R_p(\lambda)$ 分别表示多光谱波段成像传感器和全色波段成像传感器的相对光谱响应函数:

$$A_k = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} R_k(\lambda) d\lambda, \quad A_p = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} R_p(\lambda) d\lambda,$$

$$A_{k,p} = A_k \cap A_p = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \min[R_k(\lambda), R_p(\lambda)] d\lambda.$$

$\alpha_k^{(2)}(m, n)$ 定义为

$$\alpha_k^{(2)}(m, n) = \begin{cases} \frac{\rho_k(m, n)}{\bar{\rho}(m, n)}, & \bar{\rho}(m, n) \neq 0 \\ 0, & \bar{\rho}(m, n) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

其中, $\rho_k(m, n)$ 表示地表物体对 k 波段的光谱平均反射率, 可以通过图像像素值近似估算得到, 如(5)式所示, $\bar{\rho}(m, n)$ 表示所有波段的光谱反射特性的均值, 即 $\bar{\rho}(m, n) = \frac{1}{B} \sum_{k=1}^B \rho_k(m, n)$, B 表示多光谱图像的波段数(对 IKONOS 卫星而言, $B=4$):

$$\rho_k(m, n) = \frac{N_k(m, n) - N_k^{\min}}{N_k^{\max} - N_k^{\min}}, \quad (5)$$

$\alpha_k^{(3)}(m, n)$ 定义为各多光谱波段辐射调整系数 C_k 与全色波段辐射调整系数 C_p 的比值, 如(6)式所示:

$$\alpha_k^{(3)}(m, n) = \alpha_k^{(3)} = C_k / C_p, \quad (6)$$

结合(3)式、(4)式以及(6)式, 成像系统物理特性注入模型的 $\alpha_k(m, n)$ 定义为

$$\alpha_k(m, n) = \alpha_k^{(1)}(m, n) \cdot \alpha_k^{(2)}(m, n) \cdot \alpha_k^{(3)}(m, n) = \begin{cases} \left\{ \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \min[R_k(\lambda), R_p(\lambda)] d\lambda / \left[\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} R_p(\lambda) d\lambda \right] \right\} \cdot \frac{\rho_k(m, n)}{\bar{\rho}(m, n)} \cdot \frac{C_k}{C_p}, & \bar{\rho}(m, n) \neq 0 \\ 0, & \bar{\rho}(m, n) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中, 成像传感器的相对光谱响应数据 $R_k(\lambda)$ 及各波段辐射调整系数 C_k 是已知常数, 均可以从 IKONOS 卫星相关手册中查到[13]。

3.3 本文提出的非采样 Contourlet 变换-成像系统物理特性图像融合算法

假设在图像融合之前, 多光谱图像与全色图像已经经过严格配准。图 3 给出了空间分辨力之比为

1:4 的多光谱图像与全色图像融合算法流程图。算法可具体分为如下四个步骤:

1) 将第 k 波段原始多光谱图像 Ms_k 进行双线性插值得到与全色图像具有相同像元尺寸的多光谱图像 Ms_k^{low} ;

2) 对全色图像进行 N 级非采样 Contourlet 变换, 得到全色图像的低频子带系数 $C_0^p(m, n)$ 和各带

通方向子带系数 $\{C_{j,l}^p(m,n), j=1,2,\dots,N; l=1,2,\dots,2^{l_j}\}$ 。其中 l_j 为尺度 j 下方向分解级数,对于空间分辨力之比为 $1:4$ 而言,可令 $N=2$ 。

3) 根据(8)式、(9)式分别获得融合后 k 波段多光谱图像的非采样 Contourlet 变换低频子带系数

$C_{k,0}^{Ms}(m,n)$ 和各带通方向子带系数 $C_{k,j,l}^{Ms}(m,n)$ 。

$$C_{k,0}^{Ms}(m,n) = M_k^{low}(m,n), \quad (8)$$

$$C_{k,j,l}^{Ms}(m,n) = \alpha_k(m,n) \cdot C_{k,j,l}^p(m,n), \quad (9)$$

4) 进行非采样 Contourlet 逆变换,得到具有高空间分辨力的 k 波段多光谱图像 M_k^{high} 。

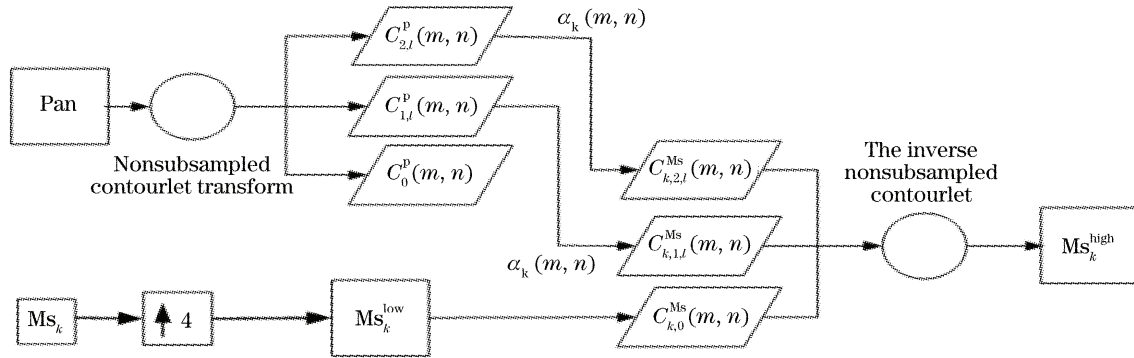


图 3 基于非采样 Contourlet 变换的遥感图像融合算法流程图(空间分辨力之比为 $1:4$)

Fig. 3 Flowchart of NSCT-based image fusion procedure for a $1:4$ scale ratio

4 实验与分析

为了验证该算法的正确性和有效性,本文采用了 IKONOS 卫星图像进行了仿真实验。为了更好地进行比较,本文采用了五种融合算法进行比较。方法一为采用基于 IHS 彩色空间变换融合算法(IHS 融合算法)。方法二、方法三和方法四分别为采用基于内容决策(CBD)注入模型^[3]的基于 \hat{a} trous 小波变换(ATWT)、基于 Contourlet 变换(CT)和基于非采样 Contourlet 变换融合算法,分别称为 ATWT_CBD 融合算法、CT_CBD 融合算法和 NSCT_CBD 融合算法,主要为了验证不同图像多尺度分解工具对融

合性能的影响。方法五为本文提出的非采样 Contourlet 变换-成像系统物理特性(NSCT-PCIS)融合算法,进一步验证注入模型对融合性能的影响。图 4 分别给出了原始全色图像、经双线性插值的多光谱图像以及不同融合算法融合结果图像。

从融合图像结果可以看出,采用 IHS 彩色空间变换得到融合图像空间质量提高的同时,部分区域,尤其是植被区域,存在着严重的光谱失真现象。而其它四种融合算法都可以很好地保持原始多光谱图像的光谱特性。但通过仔细比较可以发现,采用 CT_CBD 融合算法得到的融合相对于其它融合算法得到的融合图像而言,图像视觉效果较差,引入了一定的虚假信息。而这主要是由于 CT 在对图像进行

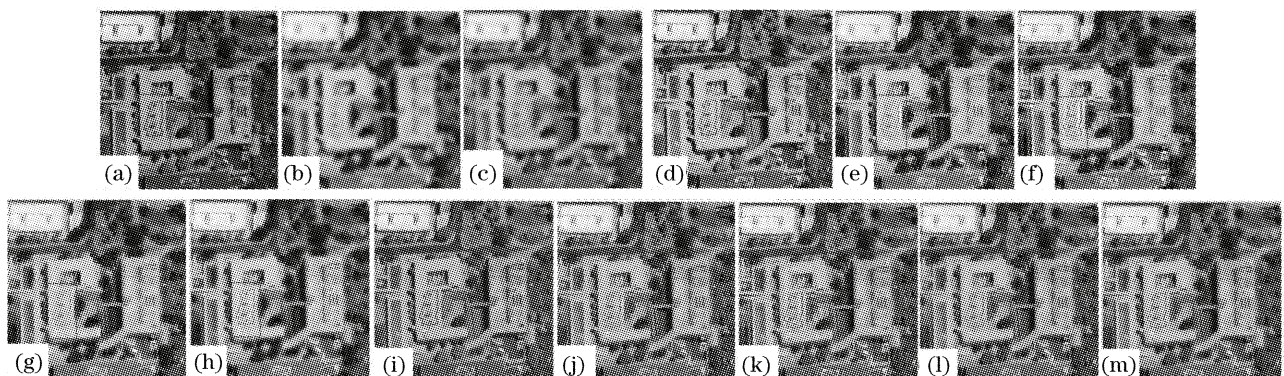


图 4 全色波段图像与多光谱图像及其融合结果。(a)原始全色图像,(b)重采样后的 R-G-B 多光谱图像,(c)重采样后的 NIR-R-G 多光谱图像(d)、(i)基于 IHS 变换融合结果,(e)、(j) ATWT_CBD 算法融合结果,(f)、(k) CT_CBD 算法融合结果,(g)、(l)NSCT_CBD 算法融合结果,(h)、(m)非采样 Contourlet 变换-成像系统物理特性算法融合结果

Fig. 4 Test images and the fusion results. (a) Original Pan image, (b) the resampled multispectral images (R-G-B), (c) the resampled multispectral images (NIR-R-G), (d), (i) results of the IHS method, (e), (j) results of the ATWT_CBD method, (f), (k) results of the CT_CBD method, (g), (l) results of the NSCT_CBD method, (h), (m) results of the proposed NSCT_PCIS method

分解和重构时需要图像进行重采样,缺乏平移不变特性,较容易引入频率混叠项而造成的,从而说明了平移不变特性对融合性能的提高起着十分重要的作用。比较 ATWT_CBD 算法和 NSCT_CBD 算法融合结果可以发现,采用 ATWT_CBD 融合算法得到的多光谱图像中有些区域过于“锐化”,出现原始全色图像中没有的细节信息,而有些区域却没有很好地表示原始全色图像中的细节信息,出现了信息丢失现象。采用 NSCT_CBD 融合算法得到的融合图像中,过于“锐化”的现象得到很好地消除,但也存在一定的信息丢失现象。而采用本文所提出的非采样 Contourlet 变换-成像系统物理特性融合算法得到的融合图像性能最好,不仅能够有效避免

CT_CBD 融合算法中因频率混叠而产生的虚假信息,还能够有效避免 ATWT_CBD 和 NSCT_CBD 融合算法中信息“过”注入或信息“抵消”等现象的发生,得到更接近于理想高空间分辨率多光谱成像传感器得到的多光谱图像。为了更清楚地说明,我们将图 4 中红色矩形区域中的相应部分分别取出放大后排列于图 5 中。从图 5 可以看出,全色图像中的细节信息,如建筑物的边界(图中红色椭圆区域内)等,在图 5(e)中都得到了很好的体现,建筑物的边界连续、清晰可见。而在图 5(b)、图 5(d)中建筑物的边界则表现为模糊不清,甚至出现了“断开”现象。图 5(c)则明显存在一定的“虚影”,在建筑物的边界处也出现了一定的信息“过”注入现象。

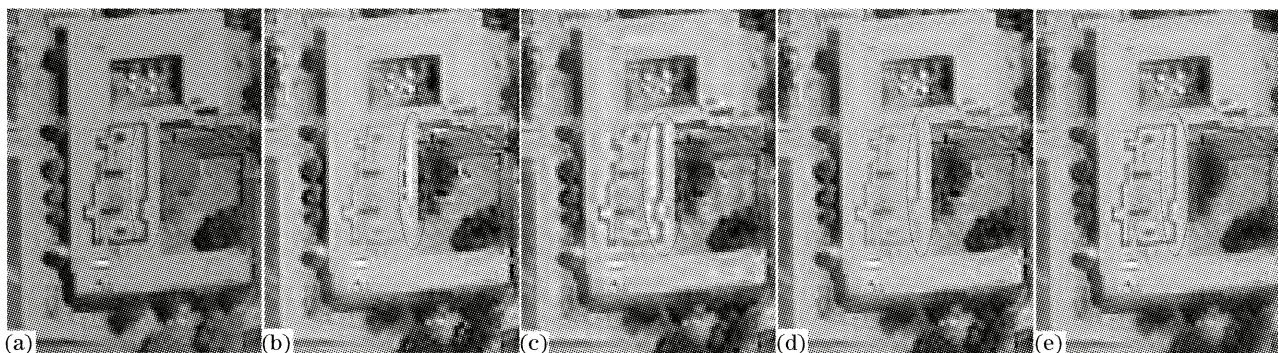


图 5 局部放大图像。(a)取自图 4(a), (b)取自图 4(e), (c)取自图 4(f), (d)取自图 4(g), (e)取自图 4(h)

Fig. 5 Locally zoomed parts. (a) Taken from Fig. 4(a), (b) taken from Fig. 4(e), (c) taken from Fig. 4(f), (d) taken from Fig. 4(g), (e) taken from Fig. 4(h)

为了更好地评价融合算法的性能,本文采用了空间相关系数(sCC)^[14]、通用图像质量指数(UIQI)^[15]以及整体图像质量指数(Q4)^[16]三个特征量对融合结果进行客观评价。

空间相关系数 SCC 值反映了融合后各波段多光谱图像的空间细节信息与全色图像的空间细节信息之间的相关程度,在一定程度上表征了融合后多光谱图像空间质量提高的程度。空间相关系数值越高表明越多的全色图像的细节信息添加到多光谱图像中去,从而表明融合图像空间质量提高的程度越大。UIQI 值反映了各波段原始多光谱图像与融合后多光谱图像之间的相似程度,从而表征了各波段融合后多光谱图像光谱保持程度。Q4 反映了原始多光谱图像与融合后多光谱图像之间的整体相似程度,进而可以在一定程度上表征融合后多光谱图像与原始多光谱图像之间的光谱一致性程度。

表 1 给出了各种融合算法的性能数据。从表 1 中的实验数据可以看出,基于 IHS 彩色空间变换的图像融合算法能够很好地提高融合图像的空间质

量,但光谱失真较为严重。其余算法不仅能够提高融合图像的空间质量,还能够有效保持原始多光谱图像的光谱特性。无论从空间质量提高方面还是从光谱保留方面比较,本文所提出的非采样 Contourlet 变换-成像系统物理特性融合算法都具有最高的性能。这主要是因为非采样 Contourlet 变换不仅能够更稀疏地表示图像的特征,变换后能量更加集中,更利于跟踪和分析图像的特征,而且还具有平移不变特性,从而能够从全色图像中提取更多的有用空间细节信息,并且能够有效避免因频率混叠而造成的“虚假”信息的引入,最大限度地提高融合图像的空间质量。同时算法所采用的成像系统物理特性注入模型,相对于内容决策注入模型,充分考虑了各波段成像传感器的光谱响应、地表物体对各波段的光谱反射特性以及各波段的辐射调整系数等成像系统物理特性,因而使融合后的多光谱图像在提高了空间质量的同时,最大可能地保持了原始多光谱图像的光谱特性。

表 1 不同融合算法性能比较

Table 1 Comparison of various fusion methods

Method	sCC				UIQI				Q4
	Red	Green	Blue	NIR	Red	Green	Blue	NIR	—
IHS Method	0.9753	0.9758	0.9754	0.9780	0.7753	0.7826	0.7147	0.8637	0.8012
ATWT_CBD method	0.8415	0.8467	0.8168	0.8407	0.9175	0.9213	0.9243	0.8893	0.9182
CT_CBD method	0.8926	0.8994	0.8761	0.8952	0.9220	0.9247	0.9299	0.9059	0.9241
NSCT_CBD method	0.9127	0.9151	0.9022	0.9134	0.9329	0.9359	0.9405	0.9108	0.9336
NSCT_PCIS method	0.9877	0.9876	0.9607	0.9275	0.9334	0.9587	0.9890	0.9577	0.9586

5 结 论

全色图像细节信息的提取及注入模型的定义是基于多尺度分解的遥感图像融合算法中两个至关重要的环节,直接影响着融合图像的质量。非采样 Contourlet 变换作为一种新的图像多尺度几何分析工具,具有良好的空域、频域局部特性和方向特性,能够更好地捕捉图像的边缘信息,其“稀疏”表达能力能够使变换后能量更加集中,更利于分析和跟踪图像中重要特征。同时,非采样 Contourlet 变换还具有平移不变特性,以及得到的各尺度方向子带图像与源图像具有尺寸大小相同等特性,在融合过程中能够有效减少配准误差对融合结果的影响以及较容易找到各个子带图像之间的对应关系,从而有利于融合运算的实现。据此,本文将非采样 Contourlet 变换引入到图像融合领域中,提出了一种基于非采样 Contourlet 变换遥感图像融合算法,并采用了一种基于成像系统物理特性的注入模型,使得融合后的多光谱图像在最大可能保持原始多光谱图像的同时,显著提高了融合图像的空间质量。需要指出的是,利用非采样 Contourlet 变换虽然能够取得优于基于 \hat{a} trous 小波变换和基于 Contourlet 变换的融合效果,但是非采样 Contourlet 变换的算法复杂度更高,其冗余度高达 $1 + \sum_{j=1}^N 2^j$,其中 N 为尺度分解级数, l_j 为 j 尺度下方向分解级数,因此如何提高运算速度还需要进一步的研究。

参 考 文 献

- 1 Fu Wei. Research on model of remote sensing image rebuilding based on feature level data fusion[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2005, **33**(6): 1143~1145
付 伟. 基于特征级数据融合的遥感图像重构模式研究[J]. *电子学报*, 2005, **33**(6): 1143~1145
- 2 C. Pohl, J. L. van Genderen. Multisensor image fusion in remote sensing; concepts, methods and applications[J]. *INT. J. Remote Sensing*, 1998, **19**(5): 823~854
- 3 A. Garzelli, B. Aiazzi, L. Alparone *et al.*. Interband structure modeling for oversampled multiresolution analysis-based Pan-sharpening of very high resolution multispectral images [C]. *Proc. SPIE*, 2003, **5207**: 678~689
- 4 Zhang Qiang, Guo Baolong. Fusion of multispectral and panchromatic images based on the physical characteristics of imaging system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 243~248
张 强, 郭宝龙. 基于成像系统物理特性的多光谱图像与全色波段图像融合[J]. *光学学报*, 2007, **27**(2): 243~248
- 5 Zhao Chunhui, Liu Chunhong, Wang Kecheng. Research on fusion of hyperspectral remote sensing images based on second generation wavelet[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(7): 891~896
赵春晖, 刘春红, 王克成. 基于第二代小波的超谱遥感图像融合算法研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(7): 891~896
- 6 Liu Bin, Peng Jiexiong. Image fusion based on non-separable orthogonal compact supported wavelet[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(9): 1214~1218
刘 斌, 彭嘉雄. 具有紧支撑正交非张量积小波的图像融合[J]. *光学学报*, 2004, **24**(9): 1214~1218
- 7 Xuhong Yang, Zhongliang Jing, Gang Liu. Fusion of urban remote image based on multi-characteristics [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(5): 275~278
- 8 M. N. Do, M. Vetterli. The contourlet transform: An efficient directional multiresolution image representation [J]. *IEEE Transaction on Image Processing*, 2005, **14**(12): 2091~2106
- 9 A. L. da Cunha, J. P. Zhou, M. N. Do. The nonsubsampling contourlet transform: theory, design, and applications[J]. *IEEE Transaction on Image Processing*, 2006, **15**(10): 3089~3101
- 10 Z. Wang, D. Ziou, C. Armenakis *et al.*. A comparative analysis of image fusion methods[J]. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, **43**(6): 1391~1402
- 11 Li Zhenhua, Jing Zhongliang, Sun Shaoyuan *et al.*. Remote sensing image fusion based on steerable pyramid frame transform [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(5): 598~602
李振华, 敬忠良, 孙韶媛 等. 基于方向金字塔框架变换的遥感图像融合算法[J]. *光学学报*, 2005, **25**(5): 598~602
- 12 X. Otazu, M. González-Audicana, O. Fors *et al.*. Introduction of sensor spectral response into image fusion methods; application to wavelet-based methods[J]. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, **43**(10): 2376~2385
- 13 IKONOS Relative Spectral Response and Radiometric Calibration Coefficients; <http://www.spaceimaging.com/products/ikonos/spectral.htm>
- 14 M. González-Audicana, J. Luis Saleta, R. García Catalán *et al.*. Fusion of multispectral and panchromatic images using improved IHS and PCA mergers based on wavelet decomposition[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, **42**(6): 1291~1299
- 15 Zhou Wang, A. C. Bovik. A universal image quality index[J]. *IEEE Signal Processing Lett.*, 2002, **9**(3): 81~84
- 16 L. Alparone, S. Baronti, A. Garzelli *et al.*. A global quality measurement of Pan-sharpened multispectral imagery[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Lett.*, 2004, **1**(4): 313~317