

文章编号: 0253-2239(2007)02-0243-6

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*

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, 西安 710071)

摘要: 提出了一种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算法。该算法采用 \hat{a} trous 小波变换提取全色波段图像的空间细节信息, 并将提取的空间信息按照一定的注入模型调整后添加到各波段多光谱图像中去, 得到具有高空间分辨率的多光谱图像。注入模型充分考虑了各波段成像传感器的相对光谱响应函数、地表物体对各波段的光谱反射率以及各波段的辐射调整系数等成像系统的物理特性, 使融合后的多光谱图像在显著提高空间质量的同时, 最大可能地保留了原始多光谱图像的光谱特性。对 IKONOS 卫星遥感影像的融合实验结果表明, 该算法在光谱保留和空间质量提高方面较其它基于小波变换的融合算法都具有更高的性能。

关键词: 信息处理; 图像融合; 成像系统物理特性; 小波变换; 注入模型

中图分类号: TP391 文献标识码: A

Fusion of Multispectral and Panchromatic Images Based on the Physical Characteristics of Imaging System

Zhang Qiang Guo Baolong

(Institute of Intelligence Control and Image Engineering, School of Electromechanical Engineering, Xidian University, Xian 710071)

Abstract: A novel algorithm for multispectral and panchromatic images based on the physical characteristics of the imaging systems is proposed. In the new algorithm, the \hat{a} trous wavelet transform is used to extract the detail information of the panchromatic image, and after being adjusted with a certain injection model, the extracted information is injected into the original multispectral images. Multispectral images with high spatial resolution are obtained. Some physical characteristics of the imaging system, including the relative spectral response of multispectral sensors, reflectance of the objects on the earth surface and radiometric calibration coefficient of each band, have been taken into account in the proposed injection model. With the proposed algorithm, the spatial quality of fused multispectral images is improved, and meanwhile the spectral characteristics of original multispectral images are preserved as much as possible. We have used the method to merge a set of IKONOS images. The results demonstrate that the proposed approach performs significantly better than other wavelet transform-based methods in the spatial resolution improvement and spectral information preservation.

Key words: information processing; image fusion; physical characteristics of imaging system; wavelet transform; injection model

1 引 言

在遥感应用中, 多光谱 (Multispectral, Ms) 成像传感器可获得多个光谱波段的遥感图像, 但成像分辨率较低, 清晰度较差, 而全色波段 (Panchromatic, Pan)

成像传感器可获得高空间分辨率的全色波段遥感图像, 但其光谱分辨率较低。如何综合利用多光谱遥感图像与全色波段遥感图像各自的信息优势, 获得高空间分辨率的多光谱图像是当前遥感影像数据处理领

* 国家自然科学基金 (60572152) 和国家 863 计划 (2006AA012127) 资助项目。

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。E-mail: zhangqiang134@163.com

导师简介: 郭宝龙 (1962-), 男, 陕西人, 教授, 博士生导师, 研究方向为图像处理和图像通信、神经网络与模式识别、智能信息处理。E-mail: blguo1199@163.com

收稿日期: 2006-03-22; 收到修改稿日期: 2006-06-14

域中研究的热点,在土地利用调查、城区识别和森林资源调查等遥感应用领域中有着极其重要的作用。

传统的多光谱图像与全色波段图像融合算法包括基于亮度-色调-饱和度(Intensity-hue-saturation, IHS)的彩色空间变换,基于主成份分析(Principal component analysis, PCA)和基于 Brovey 变换(BT)的图像融合方法^[1]。此类算法在有效地提高融合图像空间分辨力的同时却引入了严重的频谱失真。近年来,基于多分辨力分解的图像融合算法被广泛运用到遥感图像融合处理中,典型的为基于金字塔变换^[2]和基于小波变换^[3~6]的遥感图像融合算法。这些融合算法有效地解决了传统融合算法中的光谱失真问题。然而,此类算法在将全色波段图像的细节成分注入到各个波段多光谱图像的过程中没有考虑到各波段成像系统自身的物理特性,比如各波段成像传感器的光谱响应和地表物体对各波段的光谱反射率等因素。因而,融合后的多光谱图像中出现了细节“过”注入或“抵消”等现象,甚至出现了一些目标的光谱特性轻微改变的现象。

本文在综合分析了各波段成像传感器的相对光谱响应、地表物体对各波段的光谱反射率以及各波段的辐射调整系数等成像系统物理特性的基础上,提出了一种新的基于“à trous”小波变换的多光谱图像与全色波段图像融合算法。算法定义了一种新的注入模型,并在注入模型中给出了对应于成像系统物理特性的三个注入因子,从而使融合后的多光谱图像在提高空间质量的同时,更好地保持了原始多光谱图像的光谱特性。最后将算法运用到 IKONOS 卫星影像的融合中,并对融合性能进行了主客观评价。

2 遥感图像融合算法

文献[7]指出,第 k 波段高空间分辨多光谱图像 M_k^{high} 在某像元位置 (i, j) 处的像素值 $M_k^{\text{high}}(i, j)$ 可近似由相应像元位置处原始多光谱图像的像素值 $M_k^{\text{low}}(i, j)$ 、全色波段图像空间细节信息 $w(i, j)$ 及相应波段注入模型调整系数 $\alpha_k(i, j)$ 决定,如(1)式所示:

$$M_k^{\text{high}}(i, j) = M_k^{\text{low}}(i, j) + \alpha_k(i, j)w(i, j), \quad (1)$$

从式(1)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,添加了全色波段图像的细节信息,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波段图像空间细节信息 $w(i, j)$ 的提取以及注入模型调整系数

$\alpha_k(i, j)$ 的确定。

2.1 全色波段图像细节成分的提取

à trous 小波算法^[8]的基本思想是将信号或图像分解为不同频带上的细节信息和最低频带的近似信息。其细节信息称为小波面,大小与原始图像大小相同。该小波算法具有平移不变性以及所得到的的小波面具有相同大小等优点,在融合过程中能够减少配准误差对融合结果的影响以及较容易找到各个小波面系数之间的对应关系,有利于融合运算^[9]。因此,本文采用 à trous 小波算法对全色波段图像进行分解,以提取全色波段图像的细节信息 $w(i, j)$ 。全色波段图像经 N 层 à trous 小波算法分解后得到

$$P(i, j) = \sum_{l=1}^N w_l(i, j) + P_N(i, j), \quad (2)$$

式中 $P_N(i, j)$ 为近似图像, $\sum_{l=1}^N w_l(i, j)$ 为各层小波面之和,即全色波段图像的细节信息。 N 取决于 à trous 小波分解过程中所采用的滤波器及全色波段图像与多光谱图像之间空间分辨力之比。我们在小波分解过程中,一维低通滤波器采用的是 23 阶通用拉普拉斯金字塔(GLP)滤波器^[3],其使用采样频率 f_s 进行归一化后的频谱响应如图 1 所示。该滤波器具有通带和阻带区域无纹波和 -6 dB 截止频率为 0.25 等优良特性,适合于空间分辨力之比为 2^k (k 为整数)的遥感图像的融合。小波分解层数 N 则取为 $N = \text{lb } 2^k = k$ 。

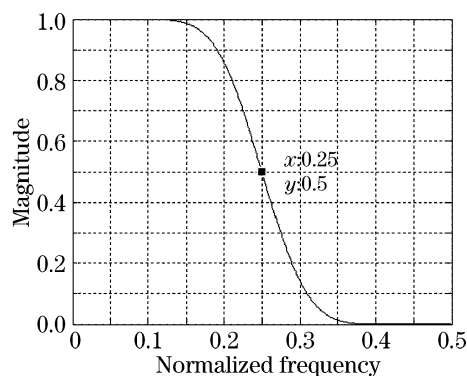


图 1 23 阶通用拉普拉斯金字塔滤波器归一化的频谱响应

Fig. 1 Frequency response of the 23-taps GLP filter

2.2 注入模型 α_k 的确定

不失一般性,以 IKONOS 卫星为例,给出注入模型 α_k 的确定过程。IKONOS 卫星各波段图像在 (i, j) 位置处的像素值 $DN_k(i, j)$ 与相应位置处成像传感器响应后的太阳辐射能量 $L_k(i, j)$ 之间存在线性关系^[10]:

$$DN_k(i, j) = C_k L_k(i, j), \quad (3)$$

其中 C_k 为各波段辐射调整系数。 $L_k(i, j)$ 可以通过在 350 ~ 1035 nm 波长范围内对传感器端的太阳辐射能量 $L(i, j, \lambda)$ 和相应波段成像传感器的相对光谱响应 $R_k(\lambda)$ 积分得到^[10]

$$L_k(i, j) = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} L(i, j, \lambda) R_k(\lambda) d\lambda, \quad (4)$$

对可见光及近红外波长范围内, 到达传感器端的太阳辐射能量 $L(i, j, \lambda)$ 可以认为主要由地表反射的能量组成, 即

$$L(i, j, \lambda) \approx \rho(i, j, \lambda) E(i, j, \lambda), \quad (5)$$

其中 $\rho(i, j, \lambda)$ 为地表光谱反射率。而对于其他如大气等复杂因素都包含在地表端太阳辐射能量 $E(i, j, \lambda)$ 参量中。

根据(3)式~(5)式, 可以得到

$$DN_k(i, j) = C_k \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \rho(i, j, \lambda) R_k(\lambda) E(i, j, \lambda) d\lambda, \quad (6)$$

(6) 式说明了在到达地表端的太阳辐射能量一定时, 各波段图像的像素值主要取决于各波段成像传感器的相对光谱响应 $R_k(\lambda)$ 、地表物体对各波段的光谱反射率 $\rho(i, j, \lambda)$ 及各波段辐射调整系数 C_k 三个因素。因此, 我们在注入模型中充分考虑了这三个因素, 使全色波段图像的细节信息能够恰当地注入到各多光谱波段图像中去, 得到的高分辨力多光谱图像应与原始多光谱图像之间的光谱特性尽可能地保持一致。

1) 成像传感器相对光谱响应

设 $R_k(\lambda), R_p(\lambda)$ 分别表示多光谱波段 (Red, Green, Blue, NIR) 和全色波段成像传感器的相对光谱响应函数, 如图 2 所示。从图 2 可知, 只有将全色波段成像传感器与各多光谱波段成像传感器共同得到的信息添加到相应多光谱波段图像中去, 才能保

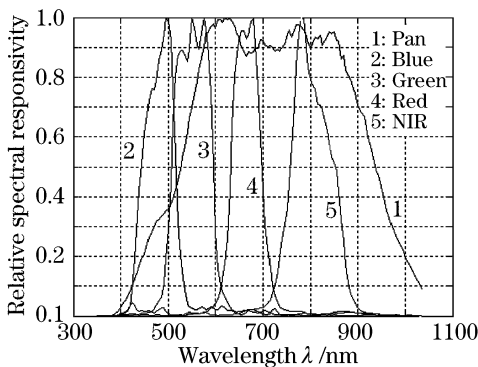


图 2 IKONOS 卫星各波段成像传感器相对光谱响应曲线
Fig. 2 Relative spectral responses of IKONOS imaging sensors of each waveband

证融合后的多光谱图像尽可能保持原始多光谱图像中的光谱特性。设全色波段图像的细节信息为 $w(i, j)$, 则 $w_k^{(1)}(i, j) = \alpha_k^{(1)}(i, j) w(i, j)$ 表示需要添加到第 k 波段多光谱图像中的细节信息。其中注入模型因子 $\alpha_k^{(1)}(i, j)$ 定义如(7)式, 它反映了成像传感器光谱响应函数在融合过程中的作用:

$$\alpha_k^{(1)}(i, j) = \alpha_k^{(1)} = \frac{A_{k,p}}{A_p} = \frac{A_k \cap A_p}{A_p} = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \min[R_k(\lambda), R_p(\lambda)] d\lambda / \left[\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} R_p(\lambda) d\lambda \right], \quad (7)$$

式中

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

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

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

2) 地表物体光谱反射率

同一地表物体对不同波段有不同的光谱反射率, 如绿色植被对近红外波段及绿光波段具有较高的光谱反射率, 反映在图像中为近红外波段图像及绿光波段图像中绿色区域具有较高的灰度值, 为了更好地保持绿色植被这种光谱特性, 应将相对多的全色波段图像的细节信息添加到近红外波段及绿光波段多光谱图像中去。所以, 在融合过程中还应考虑地表物体的光谱反射率因素。为此, 定义注入模型因子 $\alpha_k^{(2)}(i, j)$, 如(8)式所示。它反映了地表物体对各波段多光谱传感器的光谱反射特性在融合过程中的影响:

$$\alpha_k^{(2)}(i, j) = \rho_k(i, j) / \bar{\rho}(i, j), \quad (8)$$

式中 $\rho_k(i, j)$ 表示地表物体对各多光谱波段的光谱反射率。对于高空间分辨卫星图像而言, 可通过多光谱图像的像素值直接估算得到

$$\rho_k(i, j) = \frac{DN_k(i, j) - DN_k^{\min}}{DN_k^{\max} - DN_k^{\min}}, \quad (9)$$

$\bar{\rho}(i, j)$ 表示所有多光谱波段的光谱反射特性的均值, 即 $\bar{\rho}(i, j) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \rho_k(i, j)$ 。其中, n 表示多光谱图像的波段数(对 IKONOS 卫星而言, $n=4$)。

3) 辐射调整系数及基于成像系统物理特性的图像融合算法

如(3)式所示, 为正确得到各个波段图像的像素

值,还需要对成像传感器响应后的能量进行辐射(比例)调整,也即除成像传感器的光谱响应及地表物体的光谱反射率因素外,还需要对添加到各多光谱图像中的信息(能量)进行辐射(比例)调整。为此,还应在注入模型 $\alpha_k(i, j)$ 中引入因子 $\alpha_k^{(3)}(i, j)$, 其定义为各多光谱波段辐射系数 C_k 与全色波段辐射调整系数 C_P 的比值,即

$$\alpha_k^{(3)}(i, j) = \alpha_k^{(3)} = C_k/C_P. \quad (10)$$

结合因子 $\alpha_k^{(1)}(i, j)$ 、 $\alpha_k^{(2)}(i, j)$ 及 $\alpha_k^{(3)}(i, j)$ 可以定义注入模型 $\alpha_k(i, j)$ 为

$$\alpha_k(i, j) = \alpha_k^{(1)}(i, j) \cdot \alpha_k^{(2)}(i, j) \cdot \alpha_k^{(3)}(i, j) = \frac{A_{k,P}}{A_P} \cdot \frac{\rho_k(i, j)}{\bar{\rho}(i, j)} \cdot \frac{C_k}{C_P}, \quad (11)$$

根据(1)式及(11)式,本文提出的基于 \hat{a} trous 小波的全色波段图像与多光谱图像的融合算法可表示为

$$\begin{aligned} M_k^{\text{high}}(i, j) &= M_k^{\text{low}}(i, j) + \alpha_k(i, j)\omega(i, j) = \\ M_k^{\text{low}}(i, j) &+ \frac{A_{k,P}}{A_P} \cdot \frac{\rho_k(i, j)}{\bar{\rho}(i, j)} \cdot \frac{C_k}{C_P} \cdot \omega(i, j) = \\ M_k^{\text{low}}(i, j) &+ \frac{A_{k,P}}{A_P} \cdot \frac{\rho_k(i, j)}{\bar{\rho}(i, j)} \cdot \frac{C_k}{C_P} \cdot \sum_{l=1}^N \omega_l(i, j) = \\ M_k^{\text{low}}(i, j) &+ \sum_{l=1}^N \frac{A_{k,P}}{A_P} \cdot \frac{\rho_k(i, j)}{\bar{\rho}(i, j)} \cdot \frac{C_k}{C_P} \cdot \omega_l(i, j). \end{aligned} \quad (12)$$

从(12)式知,该融合算法充分考虑了成像传感器的相对光谱响应、地表物体的光谱反射率及光谱调整系数等因素,因而能够将全色波段图像中的信息恰当地注入到各多光谱图像中,在有效地提高多光谱图像的空间分辨力的同时,最大可能地保持了原始多光谱图像的光谱特性。

3 实验结果及分析

为了验证该算法的正确性和有效性,本文采用 IKONOS 卫星图像进行了仿真实验,同时与其他融合算法进行了比较。实验中所用到的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 可以从 IKONOS 卫星相关手册中查到。图 3(a)~图 3(c)分别为原始全色波段图像及其经双线性插值后的多光谱图像。图 3(d)、图 3(g)为采用亮度-色度-饱和度变换得到的融合图像。图 3(e)、图 3(h)为采用基于纹理(CBD)注入模型^[3]的并基于小波变换的融合结果图像。图 3(f)、图 3(i)为本文算法融合结果图像。

从融合结果图像可以看出,融合后的多光谱图像较原始的多光谱图像在空间质量方面都有较大的

提高。然而,采用亮度-色度-饱和度变换得到的融合图像中部分区域(如植被区域)存在着严重的光谱失真现象。而采用基于小波变换的融合算法得到的融合图像能够有效地保留原始多光谱图像的光谱信息,这与前面分析的结果是一致的。通过仔细比较图 3(e)与图 3(f),图 3(h)与图 3(i),可以发现采用 CBD 注入模型得到的融合图像中有些区域过于“锐化”,出现了原始全色波段图像和多光谱图像中没有的信息,而有些区域却没有能够很好地表示原始全色波段图像中的细节信息,出现了信息丢失现象。采用本文提出的融合算法能够将全色波段图像的细节信息及原始多光谱图像的光谱信息有机地结合在一起,使得融合后的图像更接近于理想的高空间分辨力多光谱成像传感器得到的多光谱图像。为了更清楚地说明这两种基于小波变换的图像融合算法的性能,将图 3(e)和图 3(f)中红色方框中的区域及图 3(a)中相应的区域取出经放大后排列于图 4 中。从图 4 可以看出,全色波段图像中的细节信息,如道路及道路上的汽车等,在图像 4(c)中都得到了很好地体现,图像 4(c)中的道路及汽车都清晰可辨。而在图像 4(b)中,道路及汽车等信息比较模糊,如图中椭圆区域中的信息。但图像 4(b)在融合过程中引入了一些“虚假”或“过”信息,如图中方框内的信息,图 4(c)则较好地避免了这种“虚假”或“过”信息的引入。

同时,本文使用了空间相关系数^[11](Spatial correlation coefficient, SCC)、通用图像质量指数^[12](Universal image quality index, UIQI)和整体图像质量指数^[13](简称 Q4)等特征量对融合结果进行了客观评价,结果如表 1 所示。其中,SCC 值反映了融合图像空间信息与全色波段图像空间信息的相关度,可以表征融合后多光谱图像空间质量提高的程度;UIQI 值反映了各波段原始多光谱图像与融合后多光谱图像的相似程度;Q4 值反映了整体原始多光谱图像与融合后多光谱图像的相似程度。而 UIQI 值及 Q4 值则可以在一定程度上表征融合后的多光谱图像与原始多光谱图像之间的光谱一致性。

表 1 的实验数据表明,基于亮度-色度-饱和度变换的图像融合算法能够很好地提高图像的空间质量,但光谱失真较为严重。而文献[3]的算法及本文的融合算法不仅能够提高融合图像的空间质量,还能够有效地保持原始多光谱图像的光谱特性。但本文提出的算法较文献[3]的算法更具有优越性,这主

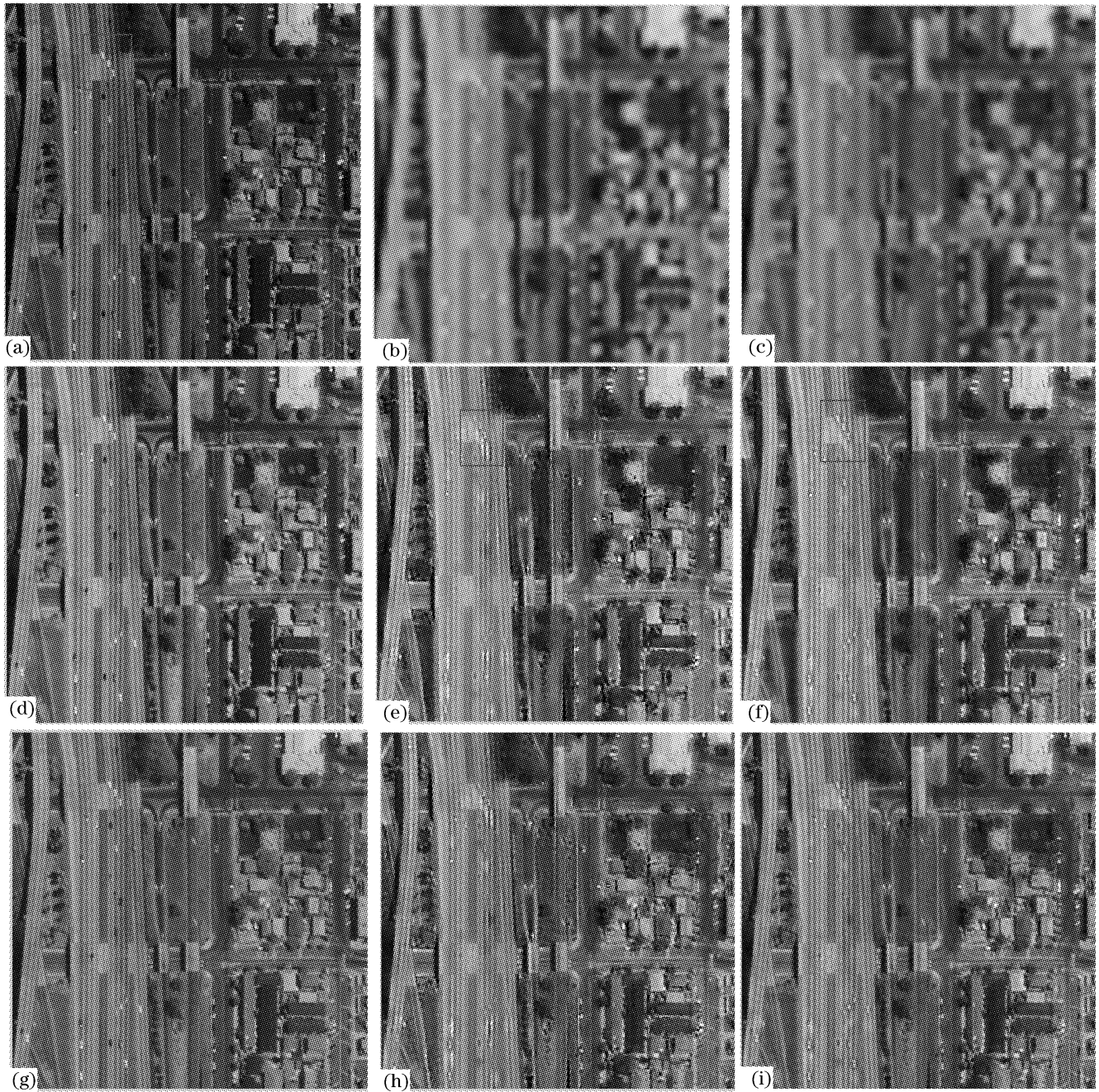


图 3 全色波段图像与多光谱图像及其融合结果。(a)原始全色波段图像,(b)重采样后的 R-G-B 多光谱图像,(c)重采样后的 NIR-R-G 多光谱图像,(d)基于亮度-色度-饱和度变换融合结果(R-G-B),(e)采用文献[3]算法的融合结果(R-G-B),(f)本文算法的融合结果(R-G-B),(g)基于亮度-色度-饱和度变换融合结果(NIR-R-G),(h)采用文献[3]算法的融合结果(NIR-R-G),(i)本文算法的融合结果(NIR-R-G)

Fig. 3 Panchromatic and multispectral images and the fusion results. (a) Original panchromatic image, (b) resampled multispectral images (R-G-B), (c) resampled multispectral images (NIR-R-G), (d) and (g) results of IHS method, (e) and (h) results of the method in paper[3], (f) and (i) results of the proposed method

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	0.9740	0.9746	0.9740	0.9765	0.7646	0.7728	0.6991	0.8678	0.7971
Method in Paper[3]	0.8821	0.8842	0.8592	0.8785	0.9048	0.9098	0.9103	0.8710	0.9057
Proposed Method	0.9800	0.9804	0.9652	0.9068	0.9232	0.9345	0.9547	0.8873	0.9296

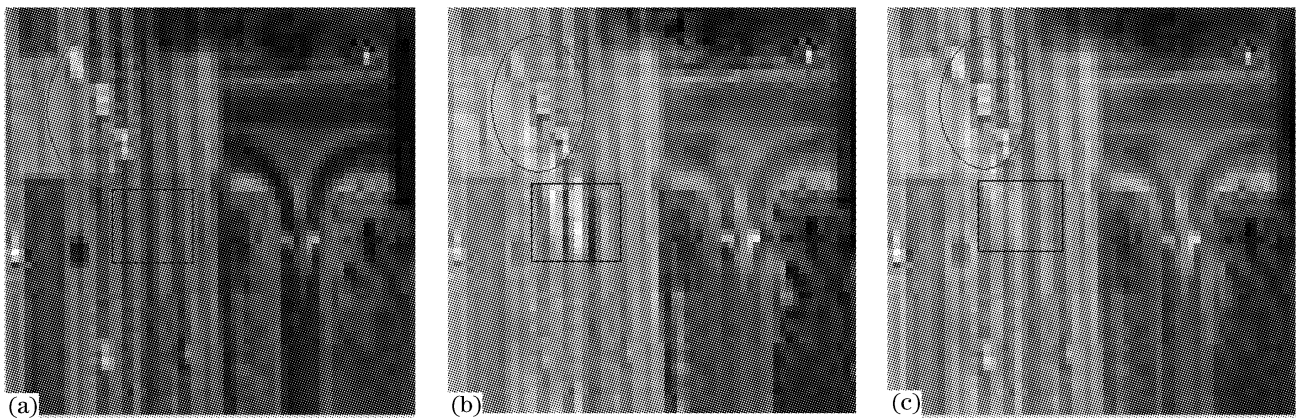


图 4 局部放大图像。(a) 取自图 3(a), (b)取自图 3(e), (c) 取自图 3(f)

Fig. 4 Locally zoomed parts. (a) Taken from Fig. 3(a), (b) taken from Fig. 3(e), (c) taken from Fig. 3(f)

要是因为在本文所提出的算法中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。

4 结 论

全色波段图像细节信息的提取及注入模型的定义是基于多分辨力分解的全色波段图像与多光谱图像融合算法中两个至关重要的环节。本文结合 \hat{a} trous 小波变换的优点,提出了一种新的基于 \hat{a} trous 小波变换的遥感影像融合算法,算法采用 \hat{a} trous 小波变换提取全色波段图像的细节信息,并在注入模型中融入了各波段成像传感器的相对光谱响应、地表物体对各波段的光谱反射率及各波段的辐射调整系数等因素,使得添加到各多光谱波段的细节信息能接近理想的高空间分辨力多光谱成像传感器得到的多光谱图像的细节信息,从而解决了其它基于小波变换的融合算法中存在的细节信息“过”注入或“抵消”现象,使融合后的多光谱图像在提高空间质量的同时,更好地保持了原始多光谱图像的光谱特性,并且被实验结果所证明。

参 考 文 献

- 1 C. Pohl, J. L. van Genderen. Multisensor image fusion in remote sensing: concepts, methods and applications[J]. *INT. J. Remote Sensing*, 1998, **9**(5): 823~854
- 2 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 (in Chinese)
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
- 3 A. Garzelli, B. Aiazzi. Interband structure modeling for oversampled multiresolution analysis-based pan-sharpening of very high resolution multispectral images [C]. *Proc. SPIE*, 2003, **5207**: 678~689
- 4 Wu Yan, Yan Wanhai, Li Ming. Image fusion based on wavelet decomposition and evolutionary strategy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(6): 671~676 (in Chinese)
吴艳,杨万海,李明. 基于小波分解和进化策略的图像融合算法[J]. *光学学报*, 2003, **23**(6): 671~676
- 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 (in Chinese)
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 Li Huihui, Guo Lei, Liu Hang. A region-based remote sensing image fusion method[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(12): 1901~1905 (in Chinese)
李晖晖,郭雷,刘航. 基于区域分割的遥感图像融合方法[J]. *光子学报*, 2005, **34**(12): 1901~1905
- 7 Zhijun Wang, Djemel Ziou, Costas Armenakis. A comparative analysis of image fusion methods[J]. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, **43**(6): 1391~1402
- 8 J. Núñez, X. Otazu, O. Fors *et al.*. Multiresolution-based image fusion with additive wavelet decomposition [J]. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 1999, **37**(3): 1204~1211
- 9 Wang Hong, Jing Zhongliang, Li Jianxun. An image approach based on object region[J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, **32**(3): 351~355 (in Chinese)
王宏,敬忠良,李建勋. 一种基于目标区域的图像融合新算法[J]. *中国激光*, 2005, **32**(3): 351~355
- 10 IKONOS Relative Spectral Response and Radiometric Calibration Coefficients; <http://www.spaceimaging.com/products/ikonos/spectral.htm>
- 11 M. González-Audicana, J. L. Saleta, R. G. 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
- 12 Zhou Wang, A. C. Bovik. A universal image quality index[J]. *IEEE Signal Process. Lett.*, 2002, **9**(3): 81~84
- 13 L. Alparone, S. Baronti, A. Garzelli. A global quality measurement of pan-sharpened multispectral imagery[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Lett.*, 2004, **1**(4): 313~317