

一种新的非抽取提升结构小波变换图象融合算法

杨 静^{1,2,3} 王岩飞³ 刘 波⁴

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710068)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100854)

(3 中国科学院电子所, 北京 100080)

(4 中国科学院高技术发展局, 北京 100864)

摘 要 遥感图象的数据融合是当前图象处理界研究的热点之一. 在对提升小波变换的原理和特点研究和分析的基础上, 将 IHS 变换与非抽取提升结构小波变换相结合, 提出了一种新的图象融合方法. 实验证明, 与其他用于图象融合的小波多分辨率分析方法相比较, 本算法可以在得到良好融合性能的同时, 具有较快的处理速度, 有着较高的实际应用价值.

关键词 数据融合; 非抽取小波变换; 提升结构

中图分类号 TP751 **文献标识码** A

0 引言

随着遥感技术的空前发展, 获取遥感数据的手段越来越多, 遥感数据也越来越丰富. 与此同时, 遥感的应用领域也在不断地扩大和深入. 如何从这些丰富的数据源中提取出更丰富、更有效、更有用的信息, 在遥感技术的应用中变得越来越重要.

SAR 作为一种主动式的微波遥感, 具有主动、全天候、全天时, 作用距离远、分辨率高、穿透能力强等优点, 由于这些特性, 使它能够提供可见光和红外遥感所不能提供的信息, 尤其在阴雨天, 它能穿透云层, 较好地反映地物的特征. 多光谱图象可以较好地反映地物的光谱特征, 具有影像信息丰富、分辨率高的特点, 这两种图象提供的信息互补性很强, 其融合对于图象解译、图象分类等均有十分重要的意义. 本文在对提升小波变换的原理和特点研究和分析的基础上, 提出了一种具有平移不变性的非抽取提升方案小波变换 (ULWT) 的图象融合算法.

1 图象的小波分解

小波是一种重要的函数分层分解数学工具. 随着小波在信号处理, 物理和近似理论等方面取得了非常多的成功应用, 在遥感领域, 利用小波分析进行数据处理也越来越普遍, 近年来, 应用离散小波变换 (DWT) 进行遥感图象融合得到了一些成果. 这种方法通常是对源图象分别进行小波分解, 将对应子带按照一定规则进行结合, 并对结和结果进行小波逆变换得到融合图象.

1.1 传统小波变换^[2]

与传统的傅里叶分析相比, 小波分析在时域和频域同时具有良好的局部化特性, 更利于信号局部特征的分析. 小波的有效性体现在用少量的小波系

数就能获取数据集合中的一些本质特征.

传统小波, 或第一代小波^[1], 是由同一母函数经过平移和伸缩运算而得到的一组函数. 小波函数被定义为在 $L^2(R)$ 空间上的母小波 $\Psi(t)$ 的二进伸缩与平移, 即小波函数为

$$\phi_{j,k}(x) = \Psi(2^j x - k), k \in Z \quad (1)$$

对信号进行小波变换满足多分辨率分析, 低分辨率 j 和高分辨率 $j-1$ 之间满足双尺度方程

$$\phi_{j,k}(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} h_{n-2k} \phi_{j-1,n}(x) \quad (2)$$

$$\Psi_{j,k}(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} g_{n-2k} \phi_{j-1,n}(x) \quad (3)$$

滤波器 $\bar{h}_n = (-1)^{n+1} g_{-n}$, $\bar{g}_n = (-1)^{n+1} h_{-n}$ 对信号 c^{j-1} 进行分解的公式为

$$c_k^j = \sum_n \bar{h}_{n-2k} c_n^{j-1} \quad (4)$$

$$d_k^j = \sum_n \bar{g}_{n-2k} c_n^{j-1} \quad (5)$$

这里的 c^j 和 d^j 分别为低频和低频分量. 由 c^j 和 d^j 重构 c^{j-1} 的重构公式为

$$c_n^{j-1} = \sum_k [h_{n-2k} c_k^j + g_{n-2k} d_k^j] \quad (6)$$

为了处理图象信号, Mallat^[2] 将多分辨率分析推广到二维情况. 二维小波变换和一维小波变换类似, 分别对行和列进行一维小波变换.

在实际遥感图象融合应用中, 第一代小波存在着一些问题: 1) 信号经过第一代小波变换后产生的是浮点数, 由于计算机有限字长的影响, 往往不能实现精确地重构信号. 2) 图象的尺寸有要求, 并不能对所有尺寸的图象进行变换. 3) 对内存的需求量较大. 不适用于用专用 DSP 芯片实时实现. 4) 不满足平移不变性.

1994 年, Sweldens. W 提出一种不依赖于傅里叶变换的新的的小波构造方法-提升方法. 提升方法既保持原有的小波特性, 又克服平移伸缩不变性所带来的局限. 提升方法可以实现小波快速算法, 并可在当前位置上进行变换, 有人称提升方法为第二代

小波构造方法.

1.2 提升结构小波

提升方法与第一代小波构造方法的区别在于不依赖于傅里叶变换,在空间域中实现小波的构造.由提升方法构成的小波变换过程可分为 3 个步骤:分裂(split)、预测(predict)、更新(update).

1) 分裂

此过程将一数据集(原始信号) $S_j(2^j, j \in Z^+)$ 按照奇偶项分裂成两个较小的子集合 S_{j-1} 和 d_{j-1} , d_{j-1} 也称为小波子集,即

$$\text{split}(S_j) = (S_{j-1}, d_{j-1}) \quad (7)$$

2) 预测

预测过程是一个对偶提升的过程.若 d_{j-1} 不包含任何信息,用 S_{j-1} 便能更紧凑代表 S_j .实际上这种情况几乎很难出现,基于原始数据的相关性用偶数序列 S_{j-1} 去预测(或者内插)奇数序列 d_{j-1} ,即

$$d_{j-1} = d_{j-1} - P(S_{j-1}) \quad (8)$$

3) 更新

经过上面两个步骤还不能在子数据集 S_{j-1} 中维持原始数据集 S_j 中的某些整体性质,如均值等.因此,必须采用更新过程.更新的基本思想是找出一个更好的子数据集 S_{j-1} ,使之保持原始数据集 S_j 的一些尺度特性,如均值、消失矩等不变,构造一个算子 U 去更新 S_{j-1} ,定义如下

$$S_{j-1} = S_{j-1} + U(d_{j-1}) \quad (9)$$

提升结构小波变换的分解和重构如图 1 所示.

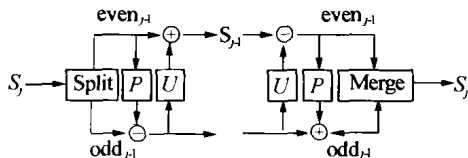


图 1 提升方法分解和重构示意图

Fig. 1 Wavelet decomposition and reconstruction in lifting scheme

与第一代小波构造方法相比,第二代小波构造方法具有许多的优越性,这体现在:1)可实现整数小波变换^[3].2)同址计算:即不需要辅助存储器,原信号(图象)可被小波变换的结果覆盖.更快的小波变换:与传统的 DWT 相比,提升方案可把变换速度提高 1 倍.3)不需要借助傅氏分析便可获得逆变换.实际上,只要简单地调整一下正变换中的正负号即可.此优点使得不需要很强的傅氏分析的背景便可理解小波的特性和小波变换.

1.3 非抽取小波变换

平移不变性意味着原始信号的平移并不意味着小波系数会有相应的平移,这个性质在图象处理中是很关键的.当模式被平移后,它的数值表示算子应当是被平移,而不是被改变.事实上,如果它的表示依赖于其位置,模式的搜索将特别困难.同样,在图象融合中,由于图象获取的限制,很难保证待融合

的图象之间位置没有任何偏差,由于 DWT 不具备平移不变性,融合结果产生相位偏差的可能性很大,降低了融合的准确性.通常情况下,由于降采样(提升方案的奇偶分离步骤)和对奇、偶采样的不同处理,提升方案不具备平移不变性,但用下述方法很方便得到具备平移不变性的变换^[4].如图 2 所示为具有平移不变性的提升小波分解与重构方案示意图.这里仅给出了分解层数 $i=1$ 时的情况,与静态小波变换(SWT)相类似,当 $i>1$ 时,分别令 $s_i(z) = s_1(z^{2^{i-1}})$, $t_i(z) = t_1(z^{2^{i-1}})$ 即可.这种情况下的提升小波变换性质与 SWT 相类似.

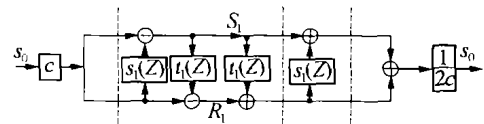


图 2 具有平移不变性的提升小波分解与重构示意图

Fig. 2 Undecimated wavelet decomposition and reconstruction in lifting scheme

2 基于非抽取提升小波变换的图象融合算法设计

本文提出了一种基于非抽取提升小波变换的图象融合算法,应该指出,这里的 SAR 图象和 TM 光学图象的配准精度在 0.8 个象素之内.

2.1 算法设计

该方法的基本步骤包括:

1)对合成多光谱伪彩色图象进行 IHS 变换,得到图象的 I、H 和 S 三个分量.变换模型采用圆柱体模型或三角锥模型均可,效果差别不大;

2)分别取 SAR 图象和第一步中得到的 I 分量进行非抽取提升小波变换,这么做的目的是为了最大限度的保留 TM 图象的光谱信息(色度与饱和度).小波基选用 Cohen-Daubechies-Feauveau 双正交小波基^[5].分解层数一般为 2~4;

3)对分解得到的各子带信号按照一定的融合规则及融合算子进行融合处理;

4)将融合得到的各子带信号进行相应的反变换,得到融合图象 I';

5)将 I' 与第一步得到的 H 和 S 分量进行相应的 IHS 逆变换,得到融合的伪彩色图象.

2.2 融合规则与融合算子

图象融合中,融合规则及融合算子的选择对于融合的质量至关重要.经小波多分辨分解后,图象的低频部分为“粗象”,高频部分为其细节信息,同时也包含噪声.由 SAR 图象的特性可知,SAR 图象不可避免的存在着一定的相干斑噪声.与普通的加性高斯白噪声不同,SAR 图象的相干斑噪声是一种乘性噪声,可以利用小波分析加以抑制.同时,SAR 图象高频部分还包含着相当有用的细节信息,不能简单的加以剔除.综合以上考虑,本文提出了一种

新的基于区域的融合规则,如图3所示.

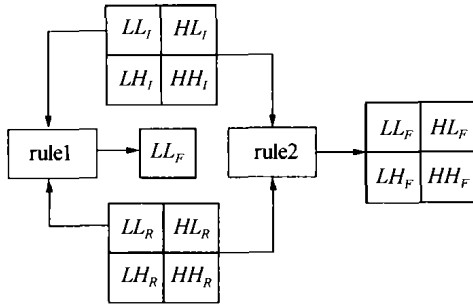


图3 融合规则

Fig. 3 Representation of the fusion rule

规则1:对于分解后的低频部分,即位于最高分解层的图象“粗象”,采用基于小波系数比率的方法(RR)

$$w_k(F)(i,j) = \begin{cases} w_k(R)(i,j) & \text{if } \frac{|w_k(R)(i,j)|}{|w_k(I)(i,j)|} \geq \sigma M \\ w_k(I)(i,j) & \text{else} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $w_k(X)(i,j)$ 表示 2^{-k} 分辨率下,图象 X 在位置 (i,j) 的小波系数,其中 $X = F, R, I$ 分别表示融合图象、SAR图象和多光谱图象的 I 分量; $M = \frac{1}{mn}$.

$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \frac{|w_k(R)(i,j)|}{|w_k(I)(i,j)|}$, σ 为预先设置的常数,根据实际情况,大小一般 $0.5 \leq \sigma \leq 1.5$.

规则2:对于各层的高频分量,采用基于Mahalanobis距离的融合规则及融合算子(MDR),具体方法为:在小波域,分解尺度为 k 时,以位置 (i,j) 为中心建立一个大小为 $N \times N$ 的窗口,则有

$$w_k(F)(i,j) = \begin{cases} w_k(R)(i,j) & \text{if } d_k(R) > d_k(I) \\ w_k(I)(i,j) & \text{if } d_k(R) < d_k(I) \\ (w_k(R)(i,j) + w_k(I)(i,j))/2 & \text{if } d_k(R) = d_k(I) \end{cases} \quad (11)$$

式中 d_k 为Mahalanobis距离,由式(12)定义

$$d_i = \sqrt{\frac{(w_i - \mu_i)^2}{\sigma^2}} \quad (12)$$

其中, μ_i 和 σ_i 分别为窗口内元素值的均值和方差.注意到,这里的 d_k 经过归一化,当雷达图象与光学图象差异较大时,这一点是很有必要的.

3 实验与结果分析

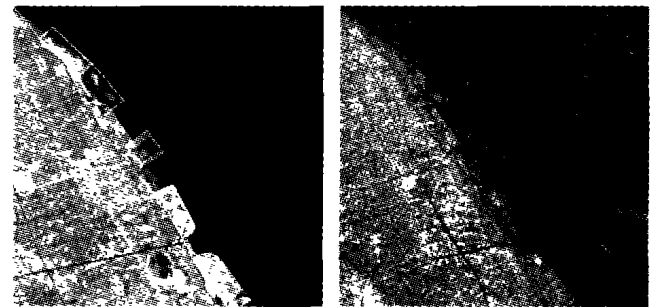
3.1 融合实验

本文实验采用的待融合图象A为Radarsat-1(模式:S2)SAR图象,成像时间为1997年9月;待融合图象B为Landsat 5 TM多光谱图象,波段分别为4(R)、5(G)和3(B),成像时间为1997年9月.实验采用的为原始图象的片断,大小均为 512×512 ,原始图象已精确配准,配准精度在0.6个象素

以内,如图4所示(为显示方便,所示图象大小小于原图象).用不同方法得到的融合结果图象F如图5所示.表1为融合性能计算结果,其中MCE和RCE分别为平均交叉熵和均方根交叉熵,其值越大,说明融合图象F与待融合图象A、B的差异越大.DWI为DWT+IHS变换,ULWI为本文提出的非抽取提升小波变换方法+IHS变换.DWI、DWT和

表1 融合性能计算结果

		熵	MCE	RCE
DWT	R	7.2533	2.3777	2.7057
	G	7.2236	2.3166	2.6582
	B	7.2281	2.1313	2.4856
DWT	R	7.3479	2.3224	2.5691
	G	7.3236	2.3366	2.6782
	B	7.3281	2.1513	2.5056
ULWI(a)	R	7.3571	2.3990	2.6534
	G	7.3218	2.2962	2.5011
	B	7.2555	2.2900	2.7357
ULWI(b)	R	7.3838	3.1137	4.2985
	G	7.4054	2.8581	3.9127
	B	7.2362	2.9932	4.2315

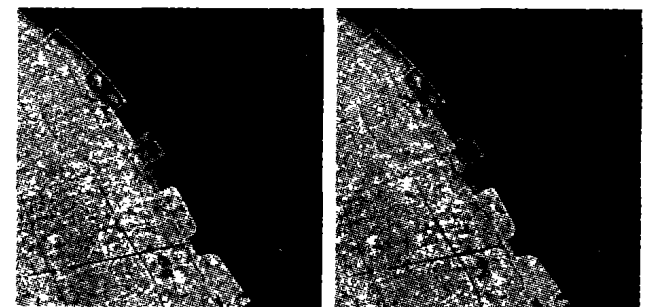


(a)Synthesized from TM 4,3,5

(b)SAR

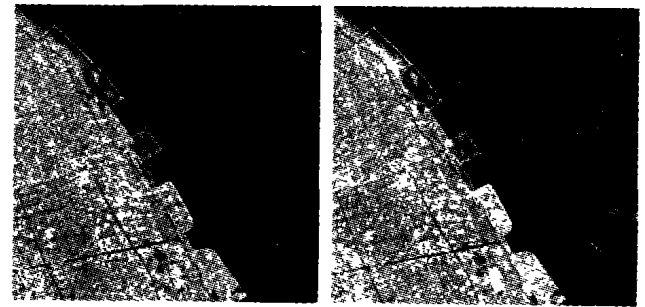
图4 待融合图象

Fig. 4 Original image



(a)DWT

(b)DWI



(c)ULWI(a)

(d)ULWI(b)

图5 融合图象

Fig. 5 Fused image

ULWI(a)均采用文献[6]介绍的融合规则与融合算子,ULWI(b)采用本文提出的融合规则与融合算子.

图象融合效果与融合质量的定量评价问题是一个十分复杂的问题,在实际评价过程中应综合考虑多个参量的评价结果.从对表1和图5的结果分析与比较可以得出以下结论:

1)将IHS变换与多分辨率分析相结合的融合方法得到的融合图象效果整体要优于单一使用多分辨率分析方法得到的融合图象;

2)采用多分辨率分析与IHS变换相结合的融合方法时,融合规则相同的情况下,ULWI得到的融合图象效果要好于DWI,这是因为非抽取小波变换满足平移不变性;

3)由于抽取小波变换耗时、耗内存,采用提升结构的小波变换,可在一定程度上提高计算效率,在实际应用中,应根据要求进行小波分解方法的选择;

4)图象融合时,根据实际需要选择合适的融合规则也很重要.实验证明本文提出的融合规则取得了比较好的效果.

4 结论

针对遥感多光谱图象与SAR图象互补性强,融合实际意义大的特点,充分考虑到小波多分辨率分析的特点,尤其是平移不变性问题和计算冗余度问题,本文提出了一种新的将非抽取提升方案小波变

换(LWT)应用于图象融合的算法.在对提升小波变换的原理和特点进行研究和分析的基础上,将IHS变换与ULWT相结合,并重新设计了新的将RR与MR相结合的融合规则,给出了总体设计和需要注意的问题.实验证明,与其他用于图象融合的小波多分辨率分析方法相比较,在一定程度上,本算法可以在得到良好融合性能的同时,具有较快的处理速度.

参考文献

- 1 Sweldens W. The Lifting Scheme: A construction of second generation wavelets [Technical Report], USA: University of South Carolina, 1995
- 2 Mallat S. A theory for multiresolution signal decomposition: The wavelet representation. *IEEE Trans on PAMI*, 1989, 11(7): 674 ~ 693
- 3 Calderbank R, Daubechies I, Sweldens W, et al. Wavelet transforms that map integers to integer [Technical Report], USA, Princeton University, 1996
- 4 Stoffel A. Remarks on the unsubsampling wavelet transform and lifting scheme, Elsevier Science, 1998
- 5 Cohen A, Daubechies I, Feauveau J C. Biorthogonal bases of compactly supported wavelets. *Commun Pure Appl Math*, 1995, 45: 485 ~ 500
- 6 Li H, Manjunath B S. Multisensor image fusion using the wavelet transform. *Graphical models and Image Processing*, 1995, 57(3): 235 ~ 245

A Novel image Fusion Algorithm on Undecimated Lifting Scheme Wavelet Transform

Yang Jing^{1,2,3}, Wang Yanfei³, Liu Bo⁴

1 Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Academia Sinica, Xi'an 710068

2 Graduate of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100854

3 Institute of Electronics, Chinese Academy of Science, Beijing 100080

4 Bureau of High Technique and Development, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080

Received date: 2003-05-25

Abstract Data fusion on remote sensing is one of the most important problems in current image processing field. A novel but efficient scheme which based on undecimated lifting scheme wavelet transform and IHS transform is given out in the paper. The results of experiments show that the fused image from the suggested algorithm is not critically subsampled, thus avoiding possible impairments in the fused image. The important advantage of the scheme is its efficiency at the same time.

Keywords Data fusion; Undecimated wavelet transform; Lifting scheme



Yang Jing was born in 1975. She received her B. S. degree in Xidian University in 1997 and M. S. degree in Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Academia Sinica in 2001 respectively. Now she is a Ph. D. candidate on photoelectric imaging techniques in XIOPM. Her current research interest is computer vision and image processing.