第33卷 第18期 计 算 机 工 程 2007年9月
Vol.33 No.18 Computer Engineering September 2007
·博士论文· 文章编号：1000—3428(2007)18—0034—03 文献标识码：A 中图分类号：TP391

基于 Contourlet 变换的多波段 SAR 图像融合

郑永安，宋建社，周文明，张 杰
(第二炮兵工程学院，西安 710025)

摘 要：针对不同波段SAR图像的融合，该文提出了一种在Contourlet变换域融合的方法，利用Contourlet变换的充分表示图像边缘信息的能力，将图像分解为低通系数和不同方向的高频系数，对方向高频系数定义一个边缘信息量测指标，选择量测指标大的系数作为融合系数，解决了小波变换融合中图像边缘信息容易丢失的问题。通过对两波段SAR图像进行融合实验并与小波变换融合结果比较，在视觉特性与统计因子客观评价上均取得了更好的效果。

关键词：Contourlet变换；图像融合；多波段；合成孔径雷达图像

Fusion Algorithm for Multiband SAR Images Based on Contourlet Transform

ZHENG Yong-an, SONG Jian-she, ZHOU Wen-ming, ZHANG Jie
(Second Artillery Engineering College, Xi'an 710025)

【Abstract】 The fusion of multiband SAR(synthetic aperture radar) images is an important application of SAR system. This paper presents a new fusion algorithm in the Contourlet transform domain. Compared with the wavelet transform, the Contourlet transform not only can capture the multiresolution and local information of an image, but also obtain its directional information in a flexible way by using different number of directions at different scales. The multiband SAR images are decomposed into different low-frequency coefficients and directional high-frequency coefficients. An edge information measurement is designed to select the fused directional high-frequency coefficients and weighted averaging method is employed for obtaining the fused low-frequency coefficients. Experiments show that the proposed algorithm works better in preserving the edge and texture information than the wavelet transform method do in image fusion.

【Key words】 Contourlet transform; image fusion; multiband; synthetic aperture radar (SAR) images

合成孔径雷达(SAR)是一种主动式相干微波遥感系统，与光学遥感系统相比，SAR图像反映结构信息好，而且具有全天时、全天候、高分辨率和穿透性等特点[1]。目前，SAR系统已朝着多波段的方向发展，弥补了单一波段SAR信息获取能力的不足。SAR是一种主动发射电磁脉冲，接收地物回波信号成像的传感器，在不同入射波长下，地物回波信号不同，必然会出现相同的地物在不同波段SAR图像上呈现不同特性的情况。对同一地区SAR各波段图像特性差异较大，高波段SAR图像能提供场景外观景象，有点接近光学图像，而低波段SAR图像较黯淡，更多的只是强反射景物和地表下的景物(含目标)的影像，穿透力比较强，对它们进行融合能够综合多源图像信息，增强SAR目标探测与识别能力[2]。

过去的20多年，小波变换在图像融合领域得到了广泛应用，并取得了较好的效果。小波变换取得成功主要归结于其刻画一维分段光滑函数的良好性能，但在二维并非同样适用。也就是说小波在分析点状瞬时状态奇异性时是最优的，但在表示图像结构的直线/曲线奇异性时不是最优的[3]。Contourlet变换正是为解决二维或更高维奇异性的一种分析工具，具有良好的方向性和各向异性，能准确将图像边缘捕获到不同尺度，不同频率的子带中，更适应于具有丰富纹理信息SAR图像的融合。

1 从小波变换到 Contourlet 变换

离散小波变换可以把二维信号从时域变换到频域，一个能量有限信号 $x(t)$可以由尺度函数 $\varphi(t)$ 的伸缩与母小波函数 $\psi(t)$ 的平移函数族表示为

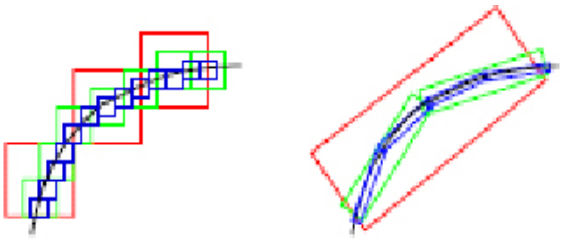
$$x(t)=\sum_{k\in Z}u_{j_0,k}\phi_{j_0,k}(t)+\sum_{j=-\infty}^{j_0}\sum_{k\in Z}w_{j,k}\psi_{j,k}(t) \tag{1}$$

其中，$u_{j,k}$为平滑近似系数；$W_{j,k}(j<j_0)$为小波系数；通过选择正确的正交基，二维可分离小波变换可以由二维信号的行、列分别进行一维小波变换构造而成。由图1可知由一维小波张量而成的二维小波基具有正方形的支撑区间，在不同的分辨率下，其支撑区间为不同尺寸大小的正方形，二维小波逼近奇异曲线过程，最终表现为以点来逼近线的过程，在尺度 j，小波支撑区间的边长近似为 2^{-j}，幅值超过 2^{-j} 的小波系数的个数至少为 $O(2^j)$ 阶，当尺度变细时，非零小波系数的个数呈指数级增长，出现了大量不可忽略的系数，最终表现为不能“稀疏”表示函数[3]，同时变换的方向数也恒定为3个，无法捕获光滑的曲线。

为克服小波变换只能表示点奇异性的缺点，Do和Vetterli[4]在Candès和Donoho[5]提出的Ridgelet和Curvelet基础上提出了Contourlet变换，不仅继承了小波变换多分辨率和时

基金项目：国家自然科学基金资助项目(60272022)
作者简介：郑永安(1979－)，男，博士研究生，主研方向：遥感图像处理和多传感器信息融合；宋建社，教授、博士生导师；周文明，博士研究生；张 杰，硕士研究生
收稿日期：2006-10-08 **E-mail：**zyaomeng@163.com

频局域化的特征，还具有良好的方向性和各向异性，能够以较少的系数表示图像光滑的直线(曲线)边缘特征。Contourlet 变换由离散域的滤波器组理论进行构建，首先Laplacian塔形分解用来捕获点奇异性，然后用一个方向滤波器组(Directional Filter Bank)把奇异点连接成线状结构，分为多尺度分解和多方向分解两个过程，也可称塔形方向滤波器组，其多尺度分解与多方向分解是相互独立的过程，Contourlet 变换的结构如图 2 所示。



(a)小波变换　　(b)Contourlet 变换

图 1　小波变换与 Contourlet 变换基的支撑区间

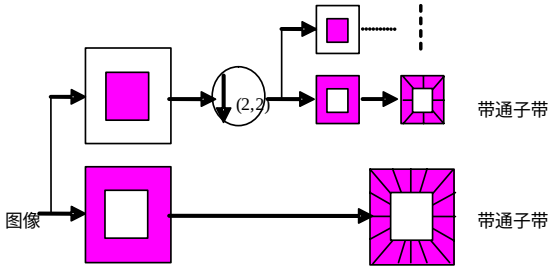


图 2　Contourlet 变换结构

Laplacian塔形多尺度分解类似于小波变换的多分辨分析，将空间V_0进行逐级二剖分为一系列子空间V_{j0}和$\{W_j\}$，V_{j0}是尺度为2^{j_0}的近似子空间，W_j为其正交补空间，包含了分辨率为2^{j-1}时信号的细节信息。二维平方可积空间可以表示为

$$L^2(\mathbb{R}^2)=V_{j_0}\oplus\left(\bigoplus_{j=j_0}^{\infty}W_j\right) \tag{2}$$

在Laplacian塔形分解中每个子空间W_j都由框架

$$\left\{\mu_{j,n}(t)\right\}_{n\in\mathbb{Z}^2}$$

张量而成。

对于方向滤波器组，l层的方向分解可以生成空间$l^2(\square^2)$的局部方向基，基由2^l个方向滤波函数及其平移函数族的冲激响应构成。

$$\left\{g_k^{(l)}\left[\cdot-S_k^{(l)}n\right]\right\}_{0\le k<2^l,n\in\mathbb{Z}^2} \tag{3}$$

采样矩阵$S_k^{(l)}$具有下面两种形式，取决于所表示的方向为近似水平或近似垂直。

$$S_k^{(l)}=\begin{cases}\begin{bmatrix}2^{l-1}&0\\0&2\end{bmatrix} & 0\le k<2^{l-1}\\ \begin{bmatrix}2&0\\0&2^{l-1}\end{bmatrix} & 2^{l-1}\le k<2^l\end{cases} \tag{4}$$

在Contourlet变换中，假设有l_j层方向分解应用到Laplacian塔形分解的细节子空间W_j，这就将子空间W_j在尺度2^j下分解成了2^{l_j}个方向子空间。

$$W_j=\bigoplus_{k=0}^{2^{l_j-1}}W_{j,k}^{(l_j)} \tag{5}$$

每一个子空间$W_{j,k}^{(l_j)}$由框架

$$\left\{\rho_{j,k,n}^{(l_j)}(t)\right\}_{n\in\mathbb{Z}^2}$$

张量而成，和 Laplacian 变换一样，其冗余率为 1/3。其中

$$\rho_{j,k,n}^{(l_j)}(t)=g_k^{(l_j)}\left[m-S_k^{(l_j)}n\right]\mu_{j,m}(t) \tag{6}$$

此外

$$\left\{\rho_{j,k,n}^{(l_j)}(t)\right\}_{n\in\mathbb{Z}^2}$$

由一个简单的镜像函数及其平移函数族组成。

$$\rho_{j,k,n}^{(l_j)}(t)=\rho_{j,k}^{(l_j)}\left(t-2^{j-1}S_k^{(l_j)}n\right)\quad n\in\mathbb{Z}^2, \tag{7}$$

Do and Vetterli 把函数

$$\rho_{j,k,n}^{(l_j)}(t)$$

看作 Contourlet 变换的系数，其下标j,k,n分别代表了系数的尺度、方向和位置。多尺度分解与方向分解相互独立，对于 Laplacian 塔形第j层分解的带通系数，进行第l_j级方向分解时，允许分解成任意方向。

2　多波段 SAR 图像融合

对同一地区 SAR 各波段图像特性差异较大，高波段 SAR 图像能提供场景外观景象，接近于光学图像，而低波段 SAR 图像较黯淡，更多的只是强反射景物和地表下的景物(含目标)的影像，各图像的相关性较之光学成像的多波段图像间的相关性更低，不同波段 SAR 图像具有融合的意义与可能。

对配准好的多波段 SAR 图像(以两个波段为例)分别进行多尺度 Contourlet 变换，先对输入图像进行多尺度的 Laplacian 塔式分解，得到一组分辨率不同的低通系数

$$\left\{S_l^A(i,j),l=1,2,...,N\right\}$$
$$\left\{S_l^B(i,j),l=1,2,...,N\right\}$$

和带通系数

$$\left\{D_l^A(i,j),l=1,2,...,N\right\}$$
$$\left\{D_l^B(i,j),l=1,2,...,N\right\}$$

然后在每一尺度下对带通系数进行方向滤波器组分析，得到不同方向高频细节信息

$$\left\{D_l^A(i,j,k_l),l=1,2,...,N\right\}$$
$$\left\{D_l^B(i,j,k_l),l=1,2,...,N\right\}$$

其中，k_l为第l层带通系数被分解的方向个数，对于每一层带通系数可以有不同的方向个数，融合处理时应注意两幅原图像分解的方向数要一致。

2.1　融合规则

对分解后的低通子带选用简单的平均方法融合，设融合后的低通子带为

$$\left\{S_l^F(i,j),l=1,2,...,N\right\}$$

则有

$$S_l^F(i,j)=\left(S_l^A(i,j)+S_l^B(i,j)\right)\Big/2 \tag{8}$$

对于方向高频细节信息，定义一个基于窗口的边缘信息量测指标为$M_l^A(i,j,k_l)$和$M_l^B(i,j,k_l)$，那么有

$$M_l^{\varepsilon}(i,j,k_l)=\sum_s\sum_t w(s,t)D_l^{\varepsilon}(i+s,j+t,k_l) \tag{9}$$

其中，$\varepsilon=A$或者B，代表不同的原图像。

$$\boldsymbol{w}(s,t)=\begin{bmatrix}-1&-1&-1\\-1&8&-1\\-1&-1&-1\end{bmatrix} \tag{10}$$

$\boldsymbol{w}(s,t)$为 Laplacian 边缘提取模板。设融合方向高频系数为

$$\left\{D_l^F(i,j,k_l),l=1,2,...,N\right\}$$

则有

$$D_l^F(i,j,k_l)=\begin{cases}D_l^A(i,j,k_l) & M_l^A(i,j,k_l)>M_l^B(i,j,k_l)\\ D_l^B(i,j,k_l) & M_l^A(i,j,k_l)\le M_l^B(i,j,k_l)\end{cases} \tag{11}$$

融合后对低通系数和方向高频系数进行概率方法的一致性检验，如果某个系数的 8 领域系数中有 6 个及以上系数从图像 A 得到，那么该融合系数就由 A 确定，反之由图像 B 确定。对经过一致性检验的融合低通与方向高频系数进行 Contourlet 反变换，得到最终融合结果。融合方法的基本框架如图 3 所示。

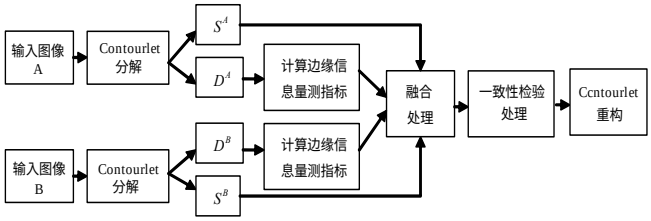


图 3　Contourlet 融合

2.2　融合效果评价

熵、交叉熵、均值、方差等统计量[6]常被用来评价融合效果，但这些量只从图像统计特征的某一个方面对图像质量进行评价，例如熵、交叉熵反映图像的信息量，均值只反映图像的平均亮度，方差反映图像的对比度。文献[7]提出了一种基于图像质量因子的图像融合客观评价标准，将融合图像与源图像之间的相关性，亮度失真和对比度失真模型化到一个变量进行评价，不依赖于测试图像、观测条件和观测者。

设 $x=\{x_i\,|i=1,2,...,n\}$ 和 $y=\{y_i\,|i=1,2,...,n\}$ 为输入图像信号，$\bar{x}$ 和 $\bar{y}$ 为均值，σ_x^2，σ_y^2 和 σ_{xy} 分别为 x，y 的方差与协方差。Z Wang 和A C Bovik [8]定义图像质量因子为

$$Q=\frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x\sigma_y}\cdot\frac{2\bar{x}\bar{y}}{(\bar{x}^2+\bar{y}^2)}\cdot\frac{2\sigma_x\sigma_y}{(\sigma_x^2+\sigma_y^2)} \tag{12}$$

设融合源图像分别为 $a(i,j)$ 和 $b(i,j)$，某一窗口模板为 $w(i,j)$，用窗口模板扫描图像得到的区域质量因子为 $Q(a,b\,|w)$，在完成对整个图像扫描后，对所有子图像的质量评价因子采用平均运算即可得到整个图像质量因子值。

$$Q(a,b)=\frac{1}{|W|}\sum_{w\in W}Q(a,b|w) \tag{13}$$

其中，$|W|$是集合 W 的势，在此基础上定义的熵加权图像融合质量因子和均方根图像融合质量因子分别为

$$Q_\alpha(a,b|f)=\frac{1}{|W|}\sum_{w\in W}\left[\lambda(a|w)Q(a,f|w)+(1-\lambda(a|w))Q(b,f|w)\right] \tag{14}$$

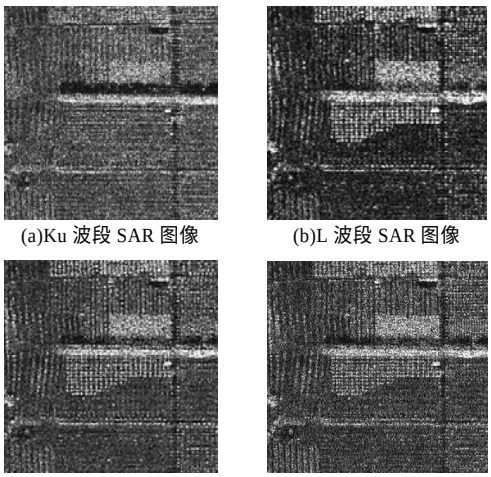
$$Q_\beta(a,b|f)=\sqrt{\frac{\left(\frac{1}{|W|}\sum_{w\in W}Q(a,f|w)\right)^2+\left(\frac{1}{|W|}\sum_{w\in W}Q(b,f|w)\right)^2}{2}} \tag{15}$$

其中，$\lambda(a|w)=\dfrac{H(a|w)}{H(a|w)+H(b|w)}$；$H(a|w)$ 为源图像 a 上某个窗口子图像 w 的区域熵。

以熵加权图像融合质量因子和均方根图像融合质量因子作为图像融合的客观标准，把图像融合过程中亮度失真、对比度失真以及融合图像与源图像之间的相关性综合考虑，不需要用参考图像来对比，不依赖测试图像、观测者的先验知识和外部环境，适用于不同的图像融合方法，具有较强的通用性，图像融合质量因子越大，融合效果就越好。

3　实验结果及评价

采用文中的融合方法对 Ku 波段和 L 波段 SAR 图像(电子科技集团第 38 研究所提供)进行融合实验，并与基于小波变换的融合方法得到的结果进行对比，如图 4 所示。



(a)Ku 波段 SAR 图像　(b)L 波段 SAR 图像

(c)Contourlet 变换融合图像　(d)小波变换融合图像

图 4　融合结果对比

从视觉上看，基于 Contourlet 变换融合得到的结果边缘和纹理信息更丰富，采用文中提到的客观评价标准对融合结果进行评价，分别采用 3×3 和 5×5 的窗口统计熵加权和均方根加权图像融合质量因子值，并以熵和综合交叉作为参考评价量，其统计结果见表 1。

表 1　融合结果效果评价

	Q_α(3×3)	Q_β(3×3)	Q_α(5×5)	Q_β(5×5)	H	D_α
小波变换融合	0.370 4	0.363 4	0.478 7	0.460 1	5.107 5	0.119 8
Contourlet 变换融合	0.550 2	0.518 7	0.593 9	0.575 1	5.118 2	0.110 7

从表 1 中可以看出，基于 Contourlet 变换得到的融合结果具有较大的熵加权与均方根加权图像融合质量因子，说明融合结果与源图像具有较大的相关性和较小的亮度、对比度失真；同时 Contourlet 变换的融合结果还具有较大的熵值和较小的综合交叉熵值，说明融合图像从两幅源图像融合得到的有效信息更多，基于 Contourlet 变换的融合取得了比小波变换融合更好的效果。

4　结论

Contourlet 变换不仅继承了小波变换的多分辨率与时频局域化的特性，还具有强的方向性与各向异性，能够有效地表示图像的直线和曲线，克服了小波变换对图像几何结构不能充分表示的缺点，已被广泛应用到图像处理各领域中。不同波段 SAR 图像能反映出不同的地物特征，同一目标在不同波段 SAR 图像上也具有不同的图像特性，同时 SAR 图像具有光学图像无法比拟的纹理信息， Contourlet 变换能够更有效地表示图像的纹理信息，具有对不同波段 SAR 图像融合的优势。通过对 Ku 与 L 波段 SAR 图像进行融合实验，并与基于小波变换的融合结果进行对比，在视觉和统计评价因子值上都取得更好的结果。

参考文献

1 赵英时. 遥感应用分析原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2003.

2 陈宁红, 常文革. 优化视觉特性型多波段 SAR 图像像素级融合方法[J]. 系统工程与电子技术, 2004, 26(9): 1299-1301.

3 焦李成, 谭　山. 图像的多尺度几何分析：回顾和展望[J]. 电子学报, 2003, 31(12A): 1975-1981.

(下转第 58 页)