

# 基于区域分割的 NSCT 域 SAR 与全色图像融合算法

叶传奇<sup>1,2</sup>, 王宝树<sup>1</sup>, 苗启广<sup>1</sup>

(1. 西安电子科技大学计算机学院, 陕西 西安 710071;  
2. 河南科技大学电子信息工程学院, 河南 洛阳 471003)

**摘要:** 提出了一种基于多阈值分割和无下采样 Contourlet 变换(nonsubsampled Contourlet transform, NSCT)的 SAR 与全色图像融合算法。首先对降斑 SAR 图像作多阈值分割,并定义了区域均值比量测算子将 SAR 图像进行区域划分;然后采用 NSCT 对降斑 SAR 图像和全色图像进行多尺度、多方向分解,分解后的低频部分根据区域均值比量测算子进行区域融合,高频部分则采用区域与窗口邻域相结合的融合策略;最后对融合系数进行重构得到融合图像。实验结果表明,该算法的融合图像既可保持全色图像的空间分辨率,又可有效获取 SAR 图像的目标信息,融合效果优于小波变换法以及基于像素的 NSCT 法。

**关键词:** 图像融合; 合成孔径雷达; 多阈值分割; 无下采样 Contourlet 变换; 区域均值比  
**中图分类号:** TP 391 **文献标志码:** A

## Fusion algorithm of SAR and panchromatic images based on region segmentation in NSCT domain

YE Chuan-qi<sup>1,2</sup>, WANG Bao-shu<sup>1</sup>, MIAO Qi-guang<sup>1</sup>

(1. School of Computer Science, Xidian Univ., Xi'an 710071, China;  
2. School of Electronic Information Engineering, Henan Univ. of Science & Technology, Luoyang 471003, China)

**Abstract:** An fusion algorithm for synthetic aperture radar (SAR) and panchromatic images based on multi-level threshold segmentation and the nonsubsampled Contourlet transform(NSCT) is proposed. Firstly, multi-level threshold segmentation is done for the despeckle SAR image, and the measurement named ratio of region mean(RRM) is presented to divide the SAR image into several regions. Then the NSCT is performed on the despeckle SAR image and the panchromatic image at different scales and directions. The low-frequency coefficients are fused with the region-based fusion scheme according to the RRM, and the high-frequency coefficients are fused with the windows-based rules and region-based rules. Finally the fused coefficients are reconstructed to obtain the fused image. Experimental results show that the fused image can not only preserves the spatial resolution of the panchromatic image but also effectively join the target information of the SAR image. The algorithm performs significantly better than the wavelet transform and the pixel-based NSCT.

**Keywords:** image fusion; synthetic aperture radar; multi-level threshold segmentation; nonsubsampled Contourlet transform; ratio of region mean

## 0 引言

合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)图像由于具有全天候、全天时的优点,已被广泛应用于军事和民用遥感领域。由于获取地物波谱特征信息的波段及成像方式的不同,SAR 与全色图像在反映地物电磁波谱特征方面有

很大差异。SAR 图像对目标的几何特性,无论是微观的(粗糙度和表面效应)还是宏观的(朝向和多次反射),都非常敏感,反映在图像上常常是非常暗或亮的点或区域<sup>[1]</sup>,同时在图像中还存在着相干斑噪声(Speckle);而全色图像对目标的物理和化学属性(如反射率、反照率、颜色)则更为敏感,能够反映不同地物的轮廓信息,具有很高的空间分辨率

收稿日期:2009-03-05; 修回日期:2009-05-19。

基金项目:国家自然科学基金(60702063);总装预研项目;广西壮族自治区青年科学基金(0640067)资助课题

作者简介:叶传奇(1969-),男,讲师,博士,主要研究方向为智能信息处理与模式识别、多传感器图像融合。E-mail:ycq1588@126.com

及丰富的纹理特征。因此,将 SAR 与全色图像进行融合,可以充分利用其互补信息,获得地物的多层次特性,进一步揭示地物的本质特征。

由于 SAR 图像的成像机理和波谱特性与全色图像完全不同,因此采用某些传统的图像融合方法,如 PCA、HPF 等方法往往不能得到较好的结果。而小波变换等多分辨率分析技术具有良好的时频局部分析特性,能够把图像分解到不同尺度下,便于分析源图像的近似信息和细节信息,其分解过程与人类视觉系统分层理解的特点非常类似,可以有选择地挑选图像中的细节纹理信息,得到较好的融合结果<sup>[2-4]</sup>。但目前的基于多分辨率分析的 SAR 与全色图像融合算法大多是针对整个 SAR 和全色图像进行处理,既没有考虑 SAR 和全色光图像固有的成像特点,也没有考虑空间特征不同的各个区域固有的特性,因此其融合效果存在一定的局限性。实际上,对融合算法的评价一般都是基于区域的,而且高度依赖于实际景物的特征<sup>[5]</sup>,因此可针对 SAR 和全色图像的成像特征分区进行融合。在 SAR 图像中一般可分为三类区域:表面光滑的平稳区域,在图像中表现为比较暗的区域,如机场跑道、宽阔水体等;表面倾斜及具有线性地貌的非平稳区域,在图像中表现为特别亮的点或区域,如城市建筑、公路桥梁等;表面粗糙的纹理区域,在图像中表现为亮度适中的区域,如森林、农田、植被等。SAR 图像中的非平稳区域在全色图像中往往难以辨识,有必要将其加入到融合图像。另外,SAR 图像对平稳区域的边缘定位较全色图像更为准确和全面,也有必要加入到全色图像。而全色图像的整体细节表达能力强,其空间分辨率远高于 SAR 图像,有必要将纹理区域的全色图像细节信息加入到融合图像。

小波变换在分析点状瞬态特征的奇异性时是最优的,但是在表示二维图像结构的直线/曲线奇异性时却不是最优的。因此,小波变换不能有效表达二维图像任意方向的纹理特征,从而降低了融合图像的空间质量。针对小波变换在图像处理中的缺陷,文献<sup>[6]</sup>等提出了无下采样 Contourlet 变换(nonsampled Contourlet transform, NSCT)。该变换通过使用迭代非子采样滤波器组来获得平移不变、多分辨、多方向的图像表示能力,可有效克服小波变换在二维图像处理中的不足。

基于以上分析,本文提出了一种基于区域分割的 NSCT 域 SAR 与全色图像融合算法。首先对 SAR 图像进行降斑处理,并对降斑后的 SAR 图像多阈值区域分割,建立量测算子将 SAR 图像划分为空间特征不同的区域;然后对 SAR 图像和全色图像分别进行 NSCT 分解;最后采用基于区域的融合策略指导融合过程得到融合图像。

### 1 NSCT 相关理论

NSCT 是在 Contourlet 变换<sup>[7]</sup>的基础上提出的,NSCT 的结构分为无下采样金字塔(nonsampled pyramid, NSP)分解和无下采样方向滤波器组(nonsampled directional filter bank, NSDFB)分解两部分。首先,利用 NSP 对图像进行多尺度分解,通过 NSP 分解可有效“捕获”图像中

的奇异点;然后采用 NSDFB 对高频分量进行方向分解,从而得到不同尺度、不同方向的子带图像(系数)。与 Contourlet 变换不同的是,在图像的分解和重构过程中,NSCT 没有对 NSP 以及 NSDFB 分解后的信号分量进行分析滤波后的降采样(抽取)以及综合滤波前的上采样(插值),而是对相应的滤波器进行上采样,再对信号进行分析滤波和综合滤波,使得 NSCT 不仅具有多尺度、良好的空域和频域局部特性以及多方向特性,还具有平移不变特性以及各子带图像之间具有相同尺寸大小等特性。NSCT 的框架结构如图 1 所示,该结构将 2-D 频域划分成如图 2 所示的楔形方向子带。

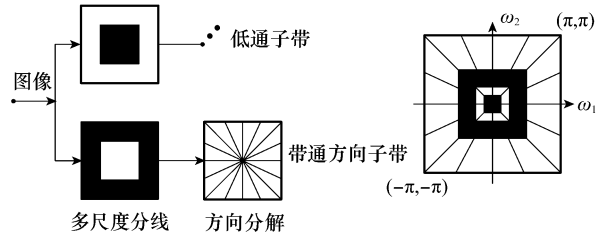


图 1 NSCT 变换结构图

图 2 NSCT 得到的理想频域切分

#### 1.1 NSP 分解

借鉴  $\hat{a}$  trous 算法的思想,NSCT 通过二维双通道无下采样滤波器组来实现 NSP 分解。下一级分解中所使用的滤波器通过对前一级相对应的滤波器进行上采样得到,即对上一尺度低频信号经上采样后的低通滤波器进行低通滤波,得到塔式分解后的低频信号;对上一尺度低频信号经上采样后的高通滤波器进行高通滤波,得到塔式分解后的高频信号。 $j$  尺度下低通滤波器的理想频域支撑区间为  $[-(\pi/2^j), (\pi/2^j)]^2$ ,而相应的高通滤波器的理想频域支撑区间为  $[(-\pi/2^{j-1}), (\pi/2^{j-1})]^2 \setminus [(-\pi/2^j), (\pi/2^j)]^2$ 。二维图像经  $k$  级 NSP 分解后,可得到  $k+1$  个与源图像具有相同尺寸大小的子带图像,分解过程如图 3 所示。

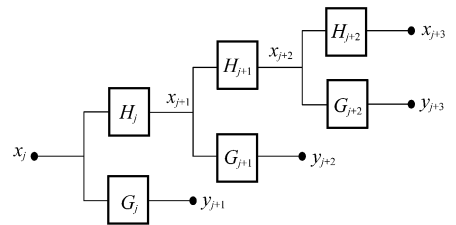


图 3 无下采样金字塔分解

其中,  $x_{j+1}$  表示第  $j+1$  尺度上的低频信号;  $y_{j+1}$  表示第  $j+1$  尺度上的高频信号。  $H_j, G_j$  分别表示  $H_0, G_0$  的  $2^j$  的尺度膨胀。

#### 1.2 NSDFB

NSDFB 是基于 Bamberger 和 Smith 所构造的扇形方向滤波器组<sup>[8]</sup>而提出的。NSDFB 是通过移去方向滤波器组中的下采样和上采样环节,而改为对方向滤波器组中相对应的滤波器进行上采样操作而获得的。NSDFB 将二维

频域平面分割成多个具有方向性的楔形块结构,每一楔形块代表了该方向上的图像细节特征,其结果是形成一个由多个双通道 NSDFB 组成的树形结构。图 4 给出了四通道的频域分解。对某尺度下的子带图像进行  $l$  级方向分解,可得到  $2^l$  个与源图像具有相同尺寸大小的方向子带图像。因此,源图像经  $J$  级分解后可得到  $1 + \sum_{j=1}^J 2^{l_j}$  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。

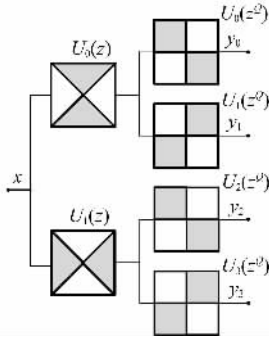


图 4 无下采样方向滤波器组分解

## 2 基于区域分割的 NSCT 域 SAR 与全色图像融合

目前基于小波变换、Contourlet 变换以及 NSCT 等多分辨分析技术的融合算法大多是基于像素或像素窗口邻域进行融合。但图像的局部区域特征不是单个像素所能表征的,而是由构成该区域的、具有较强相关性的多个像素来共同表征和体现的,因此上述融合规则有其片面性。文献[9]提出了基于区域的融合规则,将图像中的每个像素均看作区域或边缘的一部分,并用基于区域的量测指标来指导融合选取。本文对 SAR 图像做降斑及区域多阈值分割,然后利用区域均值比等指标对 SAR 图像进行区域分类,将区域作为整体参与到融合过程中,因而不会出现单个像素参与融合导致其代表的物理意义割裂的情况,最后采用 NSCT 对 SAR 与全色图像进行多分辨分解与重构。

### 2.1 SAR 图像降斑处理

SAR 图像是地物对雷达波散射特性的反应,由于成像雷达发射的是纯相干波,分布在分辨单元内不同散射点回波的空间干涉形成了相干斑噪声<sup>[10]</sup>,导致图像的像素灰度值剧烈变化,图像的解译能力降低。SAR 的相干斑噪声是乘性噪声,图像每个像素的灰度值服从指数分布,可采取诸如增强 Lee 滤波、Frost 滤波等降斑算法对 SAR 图像进行降斑处理。本文采用 Mastriani M<sup>[11]</sup>所提出的增强方向平滑滤波算法对 SAR 图像进行降斑处理,该算法在对 SAR 图像降斑的同时,可有效保持 SAR 图像的边缘信息。

### 2.2 SAR 图像分割与分析

图像分割方法包括阈值分割法、聚类分割法、统计学分割法等。本文采用基于 Otus 理论<sup>[12]</sup>的多阈值分割法对 SAR 图像进行多阈值分割。

一些基于区域分割的图像融合算法,提出了一些区域特征测度算子来表征区域特征,如文献[9,13]所提出的区域活跃度、匹配度、相似度等算子,都对提高融合效果具有一定作用。而本文区域分割的目的是要提取 SAR 图像中的平稳区域及非平稳区域信息,上述算子不能有效表征这两类区域。根据 SAR 图像的成像特征及实验观察发现:SAR 图像对成像场景中的城市建筑、公路桥梁等人造目标(尤其是金属目标)形成的角散射体等十分敏感<sup>[14]</sup>,在 SAR 图像中表现为特别亮的点或区域;而对成像场景中的机场跑道、宽阔水体等地物则不敏感,在图像中表现为特别暗的区域。针对 SAR 的这一成像特点,本文提出区域均值比(ratio of region mean, RRM),其定义如下

$$\delta_{RRM}(k) = u(k)/u$$

式中,  $u(k) = \frac{1}{n} \sum_{(i,j) \in k} f(i,j)$ ;  $u = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^N f(i,j)$ 。其中,  $n$  为区域  $k$  的像素个数;  $f(i,j)$  为 SAR 图像在点  $(i,j)$  处的亮度值;  $M/N$  分别为图像的高度和宽度;  $u(k)$  表示 SAR 图像在区域  $k$  的亮度均值;  $u$  表示 SAR 图像的亮度均值。 $\delta_{RRM}(k)$  表征了 SAR 图像在区域  $k$  的相对亮度均值大小,若  $\delta_{RRM}(k)$  值较大或较小,表明该区域趋于 SAR 图像的非平稳区域或平稳区域,而这些区域在全色图像中往往难以辨识或体现不全面,需将这二类区域的信息加入到融合图像中;反之,该区域趋于 SAR 图像中的纹理区域,可将全色图像在该区域的细节信息加入到融合图像中。

$\delta_{RRM}$  算子能够较好地表征 SAR 图像中的区域信息,因此可以利用  $\delta_{RRM}$  算子在融合过程中进行决策指导。

### 2.3 融合算法

多分辨分析技术应用于图像融合的优势在于它可以将图像分解到不同的频率域,然后在不同的频域运用不同的融合规则,从而在融合图像中保留源图像在不同频率域的显著特征。本文提出的基于区域分割的 NSCT 域 SAR 与全色图像融合算法具体步骤如下:

- 步骤 1 对 SAR 图像进行降斑处理,得到降斑图像  $SF$ ;
- 步骤 2 对  $SF$  进行区域分割得到分割映射图  $R$ , 计算图  $R$  各区域的  $\delta_{RRM}$  值;
- 步骤 3 采用 NSCT 对降斑图像  $SF$  和全色图像  $P$  分别进行多尺度、多方向分解,得到降斑图像  $SF$  和全色图像  $P$  各自的 NSCT 系数  $\{c_j^{SF}, d_l^{SF} (1 \leq j \leq J; 1 \leq l \leq l_j)\}$  和  $\{c_j^P, d_l^P (1 \leq j \leq J; 1 \leq l \leq l_j)\}$ , 其中  $J$  为尺度分解数,  $l_j$  为尺度  $j$  下的方向分解级数,  $c_j$  为低频子带系数,  $d_l$  为各带通方向子带系数;
- 步骤 4 采取一定的融合规则对分解后的 NSCT 系数  $\{c_j^{SF}, d_l^{SF}\}$  和  $\{c_j^P, d_l^P\}$  进行融合处理,得到融合的 NSCT 系数  $\{c_j^F, d_l^F\}$ ;
- 步骤 5 对 NSCT 系数  $\{c_j^F, d_l^F\}$  进行 NSCT 逆变换,所得图像即为融合图像  $F$ 。

#### (1) 低频子带的融合策略

图像的低频子带包括了图像的主要能量,决定了图像的轮廓。对于 SAR 与全色图像的融合来说,其主要目的是在获取 SAR 图像的平稳区域及非平稳区域低频子带信息

的前提下,在 SAR 图像的纹理区域加入全色图像的低频子带信息。可结合本文定义的  $\delta_{RRM}(k)$  算子来进行低频子带系数的选取。若  $\delta_{RRM}(k)$  介于阈值  $T_1$  和  $T_2$  之间,表明区域  $k$  趋于 SAR 图像的纹理区域,应选择全色图像在该区域的低频系数作为融合图像的低频系数;反之,表明该区域趋于 SAR 图像的平稳区域或非平稳区域,应选择 SAR 图像在该区域的低频系数作为融合图像的低频系数。归纳如下:

$$a_j^f(k) = \begin{cases} a_j^{PAN}(k), & T_1 \leq \delta_{RRM}(k) < T_2 \\ a_j^{SF}(k), & \text{其他} \end{cases}$$

$a_j^l(x, y) (l = P, SF, F)$  为图像  $l$  在  $J$  尺度层低频子带的 NSCT 系数,  $P, SF$  和  $F$  分别代表全色图像、降斑 SAR 图像和融合图像,  $T_1, T_2$  为区域均值比阈值,一般可取  $T_1 = 0.3 \sim 0.5, T_2 = 3 \sim 5$ 。本文实验取  $T_1 = 0.4, T_2 = 4$ 。

(2) 高频方向子带的融合策略

高频子带包含了源图像中诸如边缘、区域轮廓等细节信息。融合的目标是保留 SAR 图像的平稳区域及非平稳区域的子带信息,保持与低频子带的一致性,以保证融合图像完整加入 SAR 图像中的平稳区域及非平稳区域信息;而在 SAR 图像的纹理区域,则应保留 SAR 图像和全色图像的边缘细节信息。局部方差可有效表征图像的边缘细节信息,局部方差较大的高频子带,其对应区域的源图像清晰度也越高,因此可根据高频系数的局部方差来指导高频系数的选择。局部方差定义如下

$$\sigma_{j,r}(i, j) = \sum_{(m,n) \in \omega} (|d_{j,r}(m, n) - \bar{d}_{j,r}|)^2$$

式中,  $\sigma_{j,r}(i, j)$  为尺度  $j (1 \leq j \leq J)$ 、方向  $r (1 \leq r \leq 2^j)$ 、点  $(i, j)$  处的高频方向子带系数的局部方差;  $d_{j,r}(m, n)$  为尺度  $j$ 、方向  $r$ 、点  $(m, n)$  处的高频方向子带系数;  $\bar{d}_{j,r}$  为尺度  $j$ 、方向

$r$ 、区域  $\omega$  的高频方向子带系数绝对值的均值;  $i - k \leq m \leq i + k; j - k \leq n \leq i + k; \omega = 2 \times k + 1; k = 1, 2, \dots$ 。

高频方向子带的融合策略如下:

若  $\delta_{RRM}(k) < T_1$  或  $\delta_{RRM}(k) \geq T_2$ , 直接将 SAR 图像在该区域的高频系数作为融合图像在该区域的高频系数。

$$d_{j,r}^F(k) = d_{j,r}^{SF}(k)$$

在其他区域,以局部方差作为量测算子进行高频方向子带系数,选取

$$d_{j,r}^F(i, j) = \begin{cases} d_{j,r}^P(i, j), & \sigma_{j,r}^P(i, j) \geq \sigma_{j,r}^{SF}(i, j) \\ d_{j,r}^{SF}(i, j), & \sigma_{j,r}^P(i, j) < \sigma_{j,r}^{SF}(i, j) \end{cases}$$

$d_{j,r}^l(k) (l = P, SF, F)$  为图像  $l$  在尺度  $j$ 、方向  $r$ 、点  $(i, j)$  处的高频方向子带系数。

根据上述融合策略,可以得到融合图像  $F$  的 NSCT 系数,再经过 NSCT 逆变换,就可以重构出融合图像  $F$ 。

### 3 实验结果与分析

为验证本文提出融合算法的融合效果,本文选取一组 SAR 与全色图像进行融合实验,并与基于 NSCT 的图像融合算法<sup>[15]</sup> (NSCT\_Simple)以及文献[16]提出的基于小波变换的融合算法进行比较。NSCT\_Simple 算法采用简单的低频系数取平均、高频方向子带系数绝对值取大的融合规则,以验证不同融合规则对融合性能的影响。

实验所采用的 SAR 与全色图像来自文献[16],图 5(a)为配准后的全色图像,图 5(b)为 SAR 图像,图 5(c)为采用增强方向平滑滤波算法的降斑 SAR 图像,图 5(d)为降斑 SAR 图像的多阈值分割图,各种算法的融合结果见图 5(e)~图 5(g)。

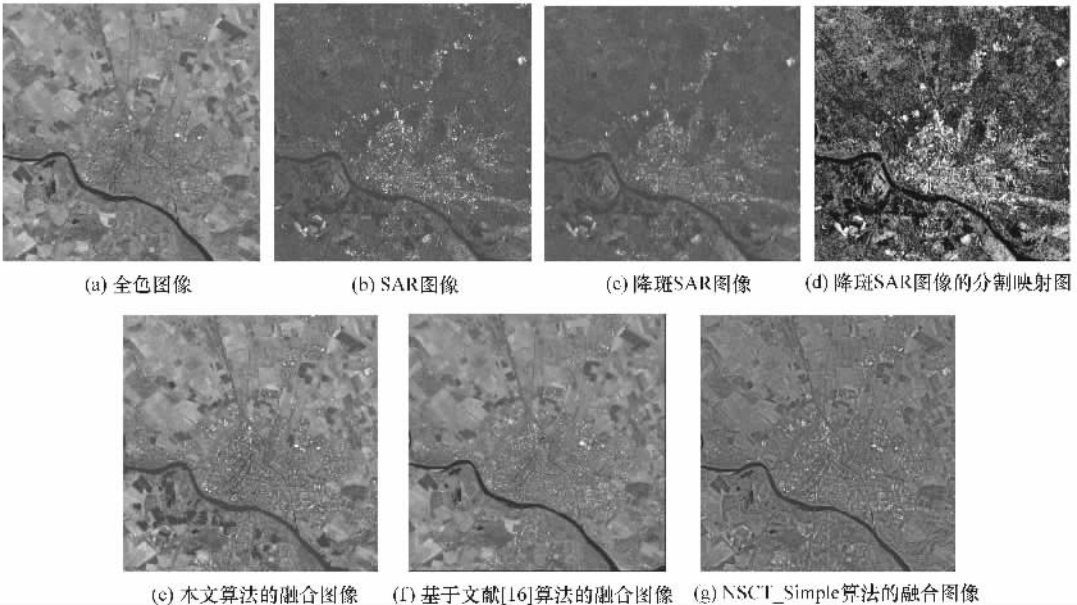


图 5 SAR 与全色图像融合实验

从视觉效果来看,三种算法的融合图像都基本保留了 SAR 图像中的城市建筑等高亮目标信息,但文献[16]算法

和 NSCT\_Simple 算法的融合图像都忽略了 SAR 图像中左下角的水体等一部分较暗的目标信息,而本文算法的融合

图像则较好地保留了 SAR 图像中的水体信息,且边缘清晰,定位准确。例如,对于横贯左下角的长条水体,虽然三种算法的融合图像都体现了长条水体的空间特征,但本文算法的融合图像对该水体的边缘特征定位更为全面准确。这是由于 SAR 图像对水体这类平稳区域的边缘定位比全色图像更为准确,本文算法的区域融合量测算子恰当表征了 SAR 图像的水体等平稳区域。总体上看,本文算法与文献[16]算法的融合图像空间细节表现力基本相当,但仔细观察可以发现,本文算法的融合图像边缘轮廓表达更为准确、全面,这是由于 NSCT 比小波变换更能“捕捉”图像的边缘信息;NSCT\_Simple 算法的融合图像空间表现力明显不如前两种算法,这是由于其融合规则不加区分地加入了空间表现力不如全色图像的 SAR 图像的低频地貌信息。因此,从视觉效果看,本文算法的融合图像具有较好的融合效果。

除了目视效果这种简单有效的定性分析法外,还可以采用相关的评价指标对融合结果进行客观评价。从基于互补信息特征的角度考虑,好的融合效果应该充分保留源图像各自的目标波谱特性以及边缘细节信息。前者可通过信息熵和交叉熵进行评价,后者可通过平均梯度进行评价<sup>[17]</sup>。其中,信息熵反映图像的信息丰富程度,熵值的大小表示图像所包含的平均信息量的多少;交叉熵反映两幅图像对应像素灰度值的差异,交叉熵越小,表示图像间的差异越小;而平均梯度反映图像对边缘细节信息的表达能力,平均梯度越大,边缘细节信息保留越多,图像越清晰。表 1 给出了三种融合算法的客观评价指标。可以看出,本文算法的熵值和平均梯度高于另两种算法,而交叉熵略高于 NSCT\_Simple 算法,明显低于文献[16]算法。综合上述评价指标值表明,本文算法在融入 SAR 重要目标信息的同时,较好保持了全色图像的高分辨率,融合效果优于另两种算法,这与视觉观察结果完全一致。

表 1 融合结果客观评价指标

融合算法	熵	交叉熵	平均梯度
本文算法	6.806 2	0.727 6	16.579 3
NSCT 融合算法	6.370 3	0.509 7	15.489 8
文献[16]算法	6.048 0	1.425 2	16.151 1

## 4 结束语

由于成像机理及波谱接收段的不同,SAR 与全色图像所反映的信息有很大差异,图像之间相关性弱,且互补性明显。本文引入区域融合的思想,通过对 SAR 图像进行多阈值分割并利用文中提出的区域均值比量测算子将 SAR 图像划分为平稳区域、非平稳区域及纹理区域;然后采用 NSCT 对 SAR 图像和全色图像分别进行多尺度分解,最后针对不同区域采取不同的融合策略。实验结果表明,该算法的融合图像既有效加入了全色图像中难以辨识的 SAR 目标信息,又有效保持了全色图像的空间分辨率,融合效果优于传统的小波变换法和基于像素的 NSCT 法。

## 参考文献:

- [1] 李晖晖,郭雷,刘航. 基于互补信息特征的 SAR 与可见光图像融合研究[J]. 计算机科学, 2006,33(4):221-224.
- [2] Sirguey P, Mathieu R, Arnaud Y, et al. Improving MODIS spatial resolution for snow mapping using wavelet fusion and ARSIS concept[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2008,5(1):78-82.
- [3] Kudoh J I, Kalpoma K, Kurita Y. An IKONOS 1m color image fusion processing with wavelet transform[C]// *Proc. of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2006:3227-3230.
- [4] Herrington W F, Horn B K P, Masaki I. Application of the discrete haar wavelet transform to image fusion for nighttime driving[C]// *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, 2005:273-277.
- [5] Bunttilov V, Bretschneider T. Objective content-dependent quality measures for image fusion of optical data[C]// *Proc. of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2004:613-616.
- [6] Cunha A L, Zhou J, Do M N. The nonsubsamped contourlet transform: theory, design, and applications[J]. *IEEE Trans. on Image Processing*, 2006,15(10):3089-3101.
- [7] Do M N, Vetterli M. The contourlet transform: an efficient directional multiresolution image representation [J]. *IEEE Trans. on Image Processing*, 2005,14(12):2091-2106.
- [8] Bamberger R H, Smith M J T. A filter bank for the directional decomposition of images: theory and design[J]. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 1992,40(4):882-893.
- [9] Piella G. A region-based multiresolution image fusion algorithm[C]// *ISIF Fusion Conference*, 2002:1557-1564.
- [10] 韩春林,赵志钦,王建国. 不同小波基下的 SAR 图像相干抑制性能分析[J]. 电子科技大学学报, 2000,29(6):578-582.
- [11] Mastriani M, Giraldez A E. Enhanced directional smoothing algorithm for edge-preserving smoothing of synthetic-aperture radar images[J]. *Measurement Science Review*, 2004,4(3):1-11.
- [12] Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms[J]. *IEEE Trans. on Systems, Man, Cybern.*, 1979,9(1):62-66.
- [13] Rong W, Liqun G, Shu Y. An image fusion approach based on segmentation region[J]. *International Journal of Information Technology*, 2005,11(7):92-100.
- [14] 刘振华,张冰,于文震. SAR 图像与其他源图像融合算法[J]. 现代雷达, 2007,29(2):56-59.
- [15] 黄海东,王斌,张立明. 一种基于非降采样 Contourlet 变换的遥感图像融合方法[J]. 复旦学报:自然科学版, 2008,47(1):124-128.
- [16] Garzelli A. Wavelet-based fusion of optical and SAR image data over urban area[C]// *Photogrammetric Computer Vision, ISPRS Commission III, Symposium, Graz, Austria*, 2002:59-62.
- [17] 苗启广. 多传感器图像融合方法研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2005.