文章编号:1001-5078(2018)06-0775-07

·图像与信号处理 ·

基于 NSST 变换与自适应 PCNN 的多特征 遥感图像融合

张 康,黄永东,王国芬 (北方民族大学数学与信息科学学院,宁夏银川750021)

摘 要:针对基于 NSCT 变换的遥感图像融合算法存在计算复杂度高,细节表现能力不足的问题,本文提出了一种基于 NSST 变换与自适应 PCNN 的多特征遥感图像融合算法。首先,利用 HSV 变换提取 MS 图像的亮度分量 V,并将得到的亮度分量 V 与 PAN 图像分别进行 NSST 变换;其次,对于低频子带,提出了一种基于自适应的 PCNN 融合规则,将空间频率和区域平均梯度分别作为 PCNN 的外部激励和链接强度;对于高频子带,采用基于多特征的融合规则;最后,进行逆 NSST 变换和逆 HSV 变换得到融合图像。仿真实验表明,该算法与一些经典的融合算 法相比不仅可以提高图像融合质量,在视觉效果和客观指标上也都有良好的表现。 关键词:图像融合;HSV 变换;NSST 变换;自适应 PCNN;多特征融合 中图分类号:TP391 文献标识码:A DOI:10.3969/j. issn. 1001-5078. 2018. 06. 019

Multi-feature remote sensing image fusion based on NSST transform and adaptive PCNN

ZHANG Kang, HUANG Yong-dong, WANG Guo-fen

(School of Mathematics and Information Science, North Minzu University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: As the remote sensing image fusion algorithm based on non – subsampled contourlet transform(NSCT) has high calculation complexity and can not extract details from source images effectively, a new multi – feature remote sensing image fusion algorithm based on NSST transform and adaptive PCNN is proposed. Firstly, intensity component V of multi – spectral image is extracted by HSV transform, and the intensity component V and PAN image are decomposed by NSST. Secondly, for the low frequency sub – band, an adaptive PCNN fusion rule is presented, regional average gradient is utilized as the linking intensity, and a modified spatial frequency is adopted as the input to motivate PCNN. For the high frequency sub – band, a fusion rule based on the multi – feature is employed. Finally, the fused images are obtained by inverse NSST transform and inverse HSV transform. The experimental results show that compared with classical remote sensing image fusion algorithms, the proposed fusion algorithm can improve the quality of the fused image, and has the better performance in visual effect and objective evaluation metrics.

Key words: image fusion; HSV transform; NSST transform; adaptive PCNN; multi - feature fusion

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 61261043);北方民族大学重点科研项目(No. 2017KJ36);北方民族大学研究生创 新项目(No. YCX1782)资助。

作者简介:张 康(1993 -), 男, 硕士研究生, 主要从事图像处理方面的研究。E-mail: zhang_kangkk@ 163. com

通讯作者:黄永东(1974-),男,博士生导师,教授,主要从事模式识别与图像处理方面的研究。E-mail:huang_yongdong@ 163.com

收稿日期:2017-09-28;修订日期:2017-11-25

1 引 言

遥感图像在军事和民用领域中都扮演着重要角 色^[1],如军事侦察,农业生产,地理与气象学等。在 这些应用中总希望同时拥有高光谱分辨率和高空间 分辨率的图像,而这一要求在实际中是很难直接得 到的。由此就产生了遥感图像融合方法,从而有利 于实现对图像场景的全面描述和提高观察者对图像 的理解。

近年来,基于多分辨分析的融合方法^[2]已成功 运用到不同类型的图像融合中,其主要思想是采用 小波变换^[3]、Contourlet 变换^[4]和 Curvelet 变换^[5]等 实现图像的多尺度分解,进而执行后续的融合过程。 众所周知,NSCT 变换^[6]不仅保持了 Contourlet 变换 的各向异性和局部化特性,同时又具有平移不变性, 故能有效防止伪吉布斯现象的发生;NSST 变换^[7-8] 除了具有平移不变性之外,其计算效率比 NSCT 变 换高; PCNN^[9] 拥有全局耦合和脉冲同步的出色特 性。文献[10]中的 PCNN 将所有神经元的链接强 度设置为相同的常数,其得到的结果与真实结果不 具有一致性。另一方面,在图像融合算法中,高频子 带大多采用单一的融合规则,如阈值控制^[11]、平均 梯度取大^[12]等。这些单一规则融合图像时会产生 细节表现能力不足的问题。鉴于此,王峰等^[13]提出 了一种基于多特征的遥感图像融合算法,采用了方 差、能量和平均梯度来构造多特征的高频系数融合 规则。但是,其低频系数的融合选取了像素绝对值 取大的规则,降低了融合图像的质量。

为了克服以上算法的不足,本文结合 NSST、PC-NN 和多特征的各自优点,提出了一种基于 NSST 变 换与自适应 PCNN 的多特征遥感图像融合算法。首 先,利用 HSV 变换提取 MS 图像的亮度分量 V,并将 得到的亮度分量 V 与 PAN 图像分别进行 NSST 变 换;其次,对于低频子带,提出了一种基于自适应的 PCNN 融合规则,将空间频率和区域平均梯度分别 作为 PCNN 的外部激励和链接强度;对于高频子带, 采用了基于多特征的融合规则;最后,进行逆 NSST 变换和逆 HSV 变换得到融合图像。

2 基于 NSST 变换与自适应 PCNN 的多特征遥感 图像融合算法

图像经 NSST 变换后,会得到一幅低频图像和 若干幅与原图像尺寸相同的高频图像。其中低频图 像是原图像的近似图像,高频图像主要包含图像的 细节信息,如边缘细节和线性特征等。其分解示意 图见图1。另一方面,融合规则的选取对图像融合 质量起着至关重要的作用。



Fig. 1 Decomposition framework of NSST

2.1 低频子带融合规则

对于低频子带,本文采取自适应的 PCNN 融合规则,主要考虑其外部激励 S_{ij} 和链接强度 β 的确定。

2.1.1 PCNN 模型

PCNN 是一种反馈型网络,是由 Eckhorn、Reitboeck 和 Arndt 等^[9]在模拟哺乳动物的大脑视觉皮层中神经元同步行为现象提出的一类二维人工神经 网络模型,具有全局耦合性和脉冲同步性。本文采 用一种常用的简化模型,该模型由以下方程来 描述^[14]:

$$F_{ij}(n) = I_{ij}(n)$$
(1)
$$L_{ij}(n) = \exp(-\alpha_L)L_{ij}(n-1) + V_L \sum_{kl} W_{ij,kl}$$

$$Y_{ij,kl}(n-1) \tag{2}$$

$$U_{ij}(n)F_{ij}(n) \times (1 + \beta L_{ij}(n))$$
(3)

$$\theta_{ij}(n) = \exp(-\alpha_{\theta})\theta_{ij}(n-1) + V_{\theta}Y_{ij}(n-1)$$
(4)

$$Y_{ij}(n) = \begin{cases} 1, U_{ij}(n) \ge_{\theta} ij(n) \\ 0, \text{else} \end{cases}$$
(5)

其中, S_{ij} 作为神经元的反馈输入 F_{ij} ;链接输入 L_{ij} 是 由伴随着突触权矩阵系数 W_{ijkl} 的邻域神经元;振幅 收益常数 V_L 和时间衰减常数 α_L 计算而来; $W_{ij,kl}$ 的计 算公式如下:

$$W_{ij,kl} = \begin{cases} 0, & (i,j) = (k,l) \\ \frac{1}{\sqrt{(i-k)^2 + (j-l)^2}}, (i,j) \neq (k,l) \end{cases}$$
(6)

内部活动项 U_{ij} 是通过链接强度因子 β 将反 馈输入 F_{ij} 与链接输入 L_{ij} 相结合而获得; θ_{ij} 是动 态阈值,其值是由前一状态的 θ_{ij} 和输出结果 Y_{ij} 所 获取;n 表示最大迭代次数,k,l 表示神经元的链 接范围, V_{θ} 为放大系数, α_{θ} 为衰减时间常数。若 $U_{ij}(n) \ge \theta_{ij}(n)$,则称神经元产生一个脉冲,即一 次点火。

2.1.2 外部激励 S_{ii} 的确定

由于图像的空间频率能够较好地反映原图 像的边缘细节信息,因此,选择区域空间频率^[14] 作为 PCNN 的外部激励,能够取得较好地融合效 果。一般情况下,空间频率只考虑水平和垂直两 个方向的计算,而实际上,对角线方向也非常重 要,其能够反映图像对角方向的边缘细节信息。 为此,本文采用改进后的空间频率,数学表达式 如下:

$$SF' = \sqrt{RF^2 + CF^2 + MDF^2}$$
(7)

其中, RF 为水平方向频率; CF 为垂直方向频率; MDF 为对角方向频率。它们计算公式如下:

$$RF = \sqrt{\frac{1}{M(N-1)} \sum_{m=1}^{M} \sum_{n=2}^{N} \left[C(m,n) - C(m,n-1) \right]^2}$$
(8)

$$CF = \sqrt{\frac{1}{(M-1)N} \sum_{m=2}^{M} \sum_{n=1}^{N} [C(m,n) - C(m-1,n)]^2}$$
(9)

$$MDF = P + Q, \ \mathfrak{R} \Psi:$$

$$P = \sqrt{\frac{1}{(M-1)(N-1)} \sum_{m=2}^{M} \sum_{n=2}^{N} [C(m,n) - C(m-1,n-1)]^{2}}$$
(10)

$$Q = \sqrt{\frac{1}{(M-1)(N-1)}} \sum_{m=2} \sum_{n=2} \left[C(m-1,n) - C(m,n-1) \right]^2$$
(11)

这里 *M*,*N* 为图像的行数与列数; *C*(*m*,*n*) 为图 像经 NSST 分解后在 (*m*,*n*) 处的低频子带系数。 2.1.3 链接强度 β 的确定

链接强度β反映图像像素的特征,同时可以调 节链接通道在内部活动中的权重,因此β的选取好 坏直接影响着融合效果。文献[15]中提出了一种 基于平均梯度的指数衰减形式,增强了图像质量, 然而由于使用了依赖于像素灰度值的指数函数, 使得该方法在降低计算复杂度方面变得无能为 力。为此,提出一种区域平均梯度的方法,并将其 作为链接强度β,定义图像的区域平均梯度为:

$$\bar{g}(i,j) = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^{M} \sum_{j=1}^{N} \sqrt{\frac{g_1(i,j)^2 + g_2(i,j)^2}{2}}$$

$$g_1(i,j) = |I(i,j) - I(i+1,j)|$$
(13)

$$g_{2}(i,j) = \left| I(i,j) - I(i,j+1) \right|$$
(14)

其中, M×N表示区域大小,在此取为3×3。

然后根据脉冲点火次数来选择融合系数。具体 融合规则描述如下:

$$C_{F}(i,j) = \begin{cases} C_{V}(i,j), |Y_{V}(i,j)| \ge |Y_{PAN}(i,j)| \\ C_{PAN}(i,j), |Y_{V}(i,j)| < |Y_{PAN}(i,j)| \end{cases}$$
(15)

其中, $C_{V}(i,j)$, $C_{PAN}(i,j)$ 分别为原 MS 图像的 V 分 量和原 PAN 图像经 NSST 变换后在 (i,j) 处的低频 系数, $C_{F}(i,j)$ 为融合图像在 (i,j) 处的低频系数, $Y_{V}(i,j)$ 和 $Y_{PAN}(i,j)$ 分别表示原 MS 图像的 V 分量 和原 PAN 图像经 NSST 变换后在 (i,j) 处的低频系 数的脉冲输出。

2.2 高频子带融合规则

高频系数包含了图像的细节和边缘等特征信息,所以其融合规则的选择将影响融合图像的清晰度和光谱失真度。常用的高频系数融合规则是基于标准方差、平均梯度以及能量等特征信息的融合规则。大多数的方法只使用以上一种特征作为融合规则,这样会使结果产生细节表现能力不足的问题,无法实现主观视觉和客观评价指标的综合最优。为了解决该问题,本文采取文献[13]中提出的基于多特征的规则进行高频子带的融合。规则简要描述如下:

$$K_{1}(i,j) = \frac{\text{Grad}_{\text{PAN}}(i,j)/\text{Grad}_{\text{PAN}}}{\text{Grad}_{V}(i,j)/\text{Grad}_{V}}$$
(16)

$$K_{2}(i,j) = \frac{\text{STD}_{PAN}(i,j)/\text{STD}_{PAN}}{\text{STD}_{V}(i,j)/\text{STD}_{V}}$$
(17)

$$K_{1}(i,j) = \frac{E_{PAN}(i,j)/E_{PAN}}{E_{V}(i,j)/E_{V}}$$
(18)

$$R_{1}(i,j) = \begin{cases} K_{1}(i,j), & K_{1}(i,j) \ge 1\\ \frac{1}{K_{1}(i,j)}, & K_{1}(i,j) < 1 \end{cases}$$
(19)

第48卷

$$R_{2}(i,j) = \begin{cases} K_{2}(i,j), & K_{2}(i,j) \ge 1\\ \\ \frac{1}{K_{2}(i,j)}, & K_{2}(i,j) < 1 \end{cases}$$
(20)

$$R_{3}(i,j) = \begin{cases} K_{3}(i,j), & K_{3}(i,j) \ge 1\\ \\ \frac{1}{K_{3}(i,j)}, & K_{3}(i,j) < 1 \end{cases}$$
(21)

其中, Grad_{PAN}、Grad_V、STD_{PAN}、STD_V、E_{PAN}、 E_V 分别表示 PAN 图像和 MS 图像的 V 分量的整幅图像的平均梯 度、标准差和能量(整体平均梯度、标准差和能量都不 等于 0)。Grad_{PAN}(*i*,*j*)、Grad_V(*i*,*j*)、STD_{PAN}(*i*,*j*)、 STD_V(*i*,*j*)、E_{PAN}(*i*,*j*)、E_V(*i*,*j*)分别表示 PAN 图像 和 MS 图像的 V 分量的高频系数的区域平均梯度、 标准差和能量,设定的区域大小为 3 × 3。

对于任何一个高频子带系数,将 $R_1(i,j)$ 、 $R_2(i,j)$ 和 $R_3(i,j)$ 中的最大比率所对应的融合规则 选择为这一系数处的最终融合规则。

2.3 本文融合算法步骤

基于以上的分析,算法步骤如下:

Step1 对 MS 图像进行 HSV 变换,提取亮度分量 V,并对 PAN 图像进行直方图匹配;

Step2 分别对匹配后的 PAN 图像和 MS 图像的 V 分量进行 NSST 变换;

Step3 采用 2.1 描述的低频融合规则对 PAN 图 像和 MS 图像的 V 分量的低频子带进行融合;

Step4 采用 2.2 描述的高频融合规则对 PAN 图 像和 MS 图像的 V 分量的高频子带进行融合;

Step5 通过逆 NSST 变换和逆 HSV 变换获得融合图像。

融合算法流程图见图2。



Fig. 2 Flow diagram of the proposed image method

3 实验结果与分析

为了验证算法的有效性和优越性,以 Matlab2012 为工具,选择 2 组不同的遥感图像进行 仿真实验与分析,并分别与传统的 NSCT、NSST、 NSCT – PCNN 以及文献[13]的方法进行比较。 其中 NSCT 变换采用"maxflat"滤波器和"dmaxflat7"滤波器,方向级数为[1,2,3],NSST 变换采 用"maxflat"滤波器。本文方法的 PCNN 参数如 下: $\alpha_L = 1$, $\alpha_{\theta} = 0.2$, (k, l) = (3,3), $V_L = 1$, $V_{\theta} = 20$, n = 200。两组 MS 图像与 PAN 图像及 采用不同融合算法得到的融合结果见图 3 和 图 4。



Fig. 3 The source images and fused images using various algorithms of the first group



algorithms of the second group

3.1 视觉效果评价

从图3和图4可以看出,MS图像(a)具有丰富的 光谱信息, PAN 图像(b)的细节信息显著。图(c)~ (g)分别为采用传统的 NSCT、NSST、NSCT-PCNN、文献 [13]的方法以及本文方法的融合结果。由图(c)~(g) 可知,这五种方法都能够从低分辨率的 MS 图像中提取 到光谱信息,并且从高分辨率的 PAN 图像中提取到细 节信息,并将这两种信息体现在融合图像中。然而,基 于 NSCT 和 NSST 所得的融合图像(c)和(d),由于融合 规则的不足,会丢失部分信息,造成细节表现能力不 足,图像的轮廓、纹理模糊,尤其从第二组实验中可以 看出图像对比度很低,图像很暗;基于 NSCT-PCNN 方 法所得的融合图像(e)保留 PAN 细节信息的能力远不

如本文方法,而从第二组试验能看出虽然其对比度要 比前两种方法要好,但图像还是有点暗,说明此方法 不能很好的提取出 MS 图像的光谱信息;基于文献 [13]所得的融合图像(f),虽然取得不错的融合效果, 但细节信息还是不够充分,不能高效地实现图像融 合;由本文方法得到的图像(g)保存原 PAN 图像的轮 廓、纹理细节更加清晰、丰富,并且色彩更接近原 MS 图像,具有较好的主观视觉效果。

3.2 客观评价

MS 图像与 PAN 图像融合的目的是尽可能的保 留 PAN 图像的空间信息和 MS 图像的光谱信息。 因此,本文主要采用信息熵(IE)^[16]、交叉熵 (D)^[16]、互信息(MI)^[16]和运行时间(Time)4种客 观评价指标定量地对融合结果进行分析和比较。其 中信息熵的值越大,其包含的信息量越多,融合效果 越好;交叉熵能够直接表示两幅图像(融合图像和 原 MS 图像)对应像素间的差异大小,其值越小,差 异越小,融合效果越好;互信息能够反映两幅图像 (融合图像和原 PAN 图像)的相关性,其值越大,融 合效果越好。两组 MS 图像与 PAN 图像采用不同 融合算法得到的融合结果客观评价指标值见表1和 表2。

表1 第一组图像的客观评价结果 Tab. 1 Objective evaluation results

ot	the	first	group	images
----	-----	-------	-------	--------

	band	IE	D	MI	Time/s
	R	7.5112	0.0835	2.2514	91.24
NCOL	G	7.4583	0.0693	1.9733	
NSCI	В	7. 3985	0.0413	1.9530	
	avg	7.456	0.0647	2.0592	
	R	7. 5558	0. 0968	2. 2377	2. 56
NCCE	G	7. 5038	0. 0879	1. 9896	
11551	В	7.4157	0.0435	2.0130	
	avg	7.4918	0.0761	2.0801	
	R	7.4856	0.0794	2.4196	108. 70
NSCT DONN	G	7.4327	0.0682	2.0814	
NSCI-FUNIN	В	7.3826	0.0417	1.9901	
	avg	7.4336	0.0631	2.1637	
	R	7.4631	0.0384	4.3274	1092. 95
· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	G	7.4319	0. 0355	2.8764	
又瞅[15]	В	7.4321	0.0234	2.0513	
	avg	7.4424	0.0324	3.0850	
	R	7. 5721	0.0129	2.9913	559. 46
Duan and mathed	G	7. 5411	0.0248	2.4043	
r roposed method	В	7.4982	0.0143	1.9845	
	avg	7.5371	0.0173	2.4600	

表2 第二组图像的客观评价结果

Tab. 1 Objective evaluation results

of the second group images

	band	IE	D	MI	Time/s
	R	7.4030	0. 6755	2.3914	90. 83
NECT	G	7.3179	0. 7098	2.7636	
NSCI	В	7.0494	0. 7283	1.7231	
	avg	7.2568	0. 7045	2. 2927	
	R	7.4467	0.6735	2.3268	3. 45
NCCT	G	7.4139	0.6675	2. 5444	
11551	В	7.0846	0. 8232	1.6666	
	avg	7.3151	0.7214	2.1793	
	R	7.3762	0.6770	2.4767	104. 16
NSCT DONN	G	7.2498	0.7401	2.9766	
NSCI-FUNI	В	7.0446	0.6641	1.7224	
	avg	7.2235	0. 6937	2.3919	
	R	7.5346	0.0842	4. 3756	1102.09
☆ホャ「13]	G	7.3059	0.0511	5.9366	
又瞅[13]	В	7.5530	0.2200	2.2075	
	avg	7.4645	0.1184	4. 1732	
	R	7.6781	0. 0561	3.6207	556. 58
Duan acad mathed	G	7.4224	0.0465	4. 6463	
r roposed method	В	7.4968	0. 1219	2.3719	
	avg	7.5324	0.0748	3. 5463	

由表1可以看出,在第一组实验中,本文方法 的信息熵和交叉熵两个客观评价指标在 R、G、B 波段及平均值上都是最优的,而互信息在 R、G 波 段上是次优的,略低于文献[13]。由表2可以看 出,在第二组实验中,本文方法的信息熵和交叉熵 在 R、G、B 波段上都是最优的, 互信息在 B 波段上 是最优的,在 R、G 波段上是次优的,略低于最优 值。从而表明,本文方法在空间信息的提高与光 谱信息的增强上是整体最优的。在时间性能方 面,由于本文方法使用了 NSST 变换,有针对性减 小了计算量,其运行时间与文献[13]相比有了较 大的改善,但由于引入了 PCNN 和多特征,所以运 行时间方面要比传统的简单方法要长,但是与得 到的效果相比,时间上的牺牲是值得的。因此,本 文方法能够较好地适用于真实环境,具有较高的 实践应用价值。

4 结 论

本文在 NSST 变换的多方向性和时频局部化 等优良特性的基础上,结合 PCNN 和多特征的优 点,提出了一种基于 NSST 和自适应 PCNN 的多特 征遥感图像融合方法。对于低频子带,提出了一 种基于自适应的 PCNN 融合规则;对于高频子带, 采用了基于多特征的融合规则。通过两组 MS 与 PAN 图像融合实验表明,该方法可以有效提高图 像融合质量,并且在视觉效果和客观指标上都有 良好的表现。

参考文献:

- Liu J, HuangJ Y, Li H L, et al. Human visual system consistent quality assessment for remote sensing image fusion
 [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2015, 105:79 90.
- [2] Ghassemian H. A review of remote sensing image fusion methods[J]. Information Fusion, 2016, 32(PA):75-89.
- [3] XIN Yanan, DENG Lei. An improved remote sensing image fusion method based on wavelet transform [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(2):133 - 138. (in Chinese)

辛亚楠,邓磊.基于小波变换的遥感图像融合方法研 究[J].激光与光电子学进展,2013,50(2):133-138.

- [4] Alejaily AM, Rube I A M, Mangoud M A. Fusion of remote sensing images using Contourlet transform [J]. Innovations and Advanced Techniques in Systems, Computing Sciences and Software Engineering, 2008, 27 (2): 213-218.
- [5] Dong L, Yang Q, Wu H, et al. High quality multi-spectral and panchromatic image fusion technologies based on Curvelet transform [J]. Neurocomputing, 2015, 159 (C): 268 – 274.
- [6] ZHOU Shenglong, ZHANG Tao, KUAI Duojie, et al. Non-subsampled contourlet image fusion algorithm based on directional region [J]. Laser & Infrared, 2013, 43 (2): 204 207. (in Chinese)
 周生龙,张涛, 蒯多杰,等. 基于方向区域的 NSCT 图像融合算法[J]. 激光与红外, 2013, 43(2): 204 207.
- [7] Easley G, Labate D, Lim W Q. Sparse directional image representations using the discrete shearlet transform [J]. Applied & Computational Harmonic Analysis, 2008, 25 (1):25-46.
- [8] Labate D, Kutyniok G. Sparse multidimensional representation using shearlets [J]. 2005, 39(1):298 - 318.
- [9] Eckhorn R, Reitboeck H J, Arndt M. Feature linking via synchronization among distributed assemblies: simulations of results from cat visual cortex [J]. Neurocomputing, 1990,2(3):293-307.
- [10] Ikuta C, Zhang S, Uwate Y, et al. A novel fusion algorithm for visible and infrared image using non-subsampled cont-

ourlet transform and pulse-coupled neural network [C]//International Conference on Computer Vision Theory and Applications. IEEE, 2015:160 – 164.

- [11] LI Wenjing, WEN Wenpeng, WANG Qinghe. A study of remote sesing image fusion method based on Contourlet transform[J]. Remote Sensing For Land & Resources, 2015,27(2):44-50. (in Chinese)
 李文静,温文鵬,王清和. 基于 Contourlet 变换的遥感 图像融合方法研究[J]. 国土资源遥感,2015,27(2):44-50.
- [12] Wu Y H, Yan D and Ma M X, et al. An improved compressive sensing image fusion algorithm based on NSCT transform [J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 433-435:306-309.
- [13] WANG Feng, CHENG Yongmei, LI Song. et. al. Remote sensing image fusion algorithm based on multi-feature
 [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2015,33(3):489-494. (in Chinese)

王峰,程咏梅,李松,等.基于多特征的遥感图像融合 算法[J].西北工业大学学报,2015,33(3):489-494.

- [14] JIANG Ping, ZHANG Qiang, LI Jing, et al. Fusion algorithm for infrared and visible image based on NSST and adaptive PCNN[J]. Laser & Infrared, 2014, 44(1):108 113. (in Chinese)
 江平,张强,李静,等. 基于 NSST 和自适应 PCNN 的图 像融合算法[J]. 激光与红外, 2014, 44(1):108 113.
- [15] Xiang T, Yan L, Gao R. A fusion algorithm for infrared and visible images based on adaptive dual-channel unitlinking PCNN in NSCT domain [J]. Infrared Physics & Technology, 2015, 69:53-61.
- [16] YANG Fanglin, GUO Hongyang, YANG Fengbao. Study of evaluation methods on effect of pixel-level image fusion
 [J]. Journal of Test and Measurement Technolongy, 2002,16(4):276-279. (in Chinese)
 阳方林,郭红阳,杨风暴. 像素级图像融合效果的评价 方法研究[J]. 测绘技术学报,2002,16(4):276-279.