

# 基于非线性尺度空间 SIFT 的 SAR 图像特征点提取

朱翔宇<sup>1,2,3</sup> 汪丙南<sup>1,2</sup> 向茂生<sup>1,2</sup>(1. 中国科学院电子学研究所 北京 100190; 2. 微波成像技术重点实验室 北京 100190;  
3. 中国科学院大学 北京 100049)

**摘要:**针对 SAR 图像特征提取中的相干斑问题,提出一类非线性尺度空间的构造方法,用于提取具有尺度不变特性的特征点。首先,利用 SAR 图像特有的频域多视处理,代替尺度空间中的空域降采样,构造多分辨率图像,提高了辐射分辨率,抑制了相干斑。其次,基于改进的增强 Lee 滤波,建立非线性尺度空间,在保留特征细节的同时,进一步抑制了相干斑。实验结果表明,该方法相比典型的高斯尺度空间和一般的非线性尺度空间,能更好的抑制相干斑噪声,提高了特征点提取数量和正确匹配点数量。

**关键词:**SAR 图像;特征提取;尺度空间;SIFT;多视处理;增强 Lee 滤波

中图分类号: TN957.52 文献标识码:A 国家标准学科分类代码: 510.70

## SAR image feature extraction based on nonlinear scale space SIFT

Zhu Xiangyu<sup>1,2,3</sup> Wang Bingnan<sup>1,2</sup> Xiang Maosheng<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Electronics, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China; 2. Science and Technology on Microwave Imaging Laboratory, Beijing 100190, China; 3. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)

**Abstract:** To address the problem caused by speckle noise in SAR image feature extraction, a method based on nonlinear scale space is proposed, to extract scale invariant feature points. First, instead of down sample in scale space construction, multi-look process is utilized to build multi-resolution images, which improves radiometric resolution and reduces speckle noise. Then, a nonlinear scale space is constructed based on a novel enhanced Lee filter, which preserves feature details as well as reducing speckle noise further. The experiment shows that the proposed method is not only perform better in speckle noise suppression, but also increase the amount of feature points and amount of correctly matched points.

**Keywords:** SAR image; feature extraction; scale space; SIFT; multi-look process; enhanced Lee filter

### 1 引言

SAR 图像特征点提取是图像配准中的关键技术之一,广泛应用于图像融合、变化检测、复合分析等领域中。SAR 图像存在着大量相干斑点噪声影响<sup>[1]</sup>,常规的特征点提取方法通常效果较差<sup>[2-3]</sup>,容易把斑点噪声误认为特征点,对后续的特征点匹配造成不利的影响。

SIFT(scale invariant feature transform)<sup>[4]</sup>是目前特征点提取的通用方法之一,基于高斯尺度空间 DOG,具有尺度不变性<sup>[5-6]</sup>,已经成功应用在 SAR 图像配准中<sup>[7]</sup>。SIFT 特征点提取高斯尺度空间通过高斯模糊,减少斑点噪声对影响。但是这种高斯模糊是无差别的,不仅模糊了

噪声,也模糊了图像细节<sup>[8]</sup>。

为改善特征点提取效果,KAZE<sup>[9]</sup>使用非线性扩散方程构造各向异性尺度空间;BFSIFT (bilateral filter SIFT)<sup>[10]</sup>采用双边滤波构造非线性尺度空间,在特征细节区域和均匀同质区域采用不同的高斯滤波系数,并应用于 SAR 图像特征点提取;这些方法在模糊图像的同时,尽可能保持了特征细节,提高了特征点提取的效果和数量。然而,SIFT 及以上改进方法并未针对 SAR 图像相干斑噪声进行优化,在构造尺度空间时,仅将其视为一般噪声处理,没有考虑相干斑的相干性及乘性模型,噪声可能会被提取为特征点,并影响后续匹配。

针对上述问题,本文提出了一种基于非线性尺度空间SIFT的SAR图像特征点提取方法。首先,将多视处理引入尺度空间的构造中,代替降采样。多视处理在降低分辨率的同时,抑制了相干斑噪声的影响,提高了信噪比和辐射分辨率<sup>[11]</sup>;其次,采用改进的增强Lee滤波针对乘性噪声模型,构造非线性尺度空间,以抑制SAR图像相干斑,提高特征点数量及正确匹配点数量。

## 2 SIFT 特征点提取及尺度空间理论

SIFT 提取特征点主要基于尺度空间原理和高斯拉普拉斯算子(LOG),分为两个步骤:1)建立高斯尺度空间及 DOG 金字塔;2)在 DOG 金字塔中寻找局部极值点。

首先建立尺度空间,SIFT 特征点之所以具有尺度不变性,就是因为其特征点是在尺度空间中提取的,尺度空间代表了图像的各种尺度。图像的尺度空间根据分辨率,分为若干阶(octave),相邻阶之间的尺寸相差 2 倍。每一阶中间又有若干层(interval),第一层由上一阶的图像二取一降采样得到,之后每一层由前一层图像迭代高斯模糊得到,如图 1 所示。高斯模糊表达式如式(1)、(2)所示:

$$L(x, y, \sigma) = G(x, y, \sigma) * I(x, y) \quad (1)$$

$$G(x, y, \sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-(x^2+y^2)/2\sigma^2} \quad (2)$$

式中:  $G(x, y, \sigma)$  是高斯卷积核,  $I(x, y)$  是二维图像,  $\sigma$  代表了尺度空间中每幅图像的尺度,同时也是高斯滤波的系数。

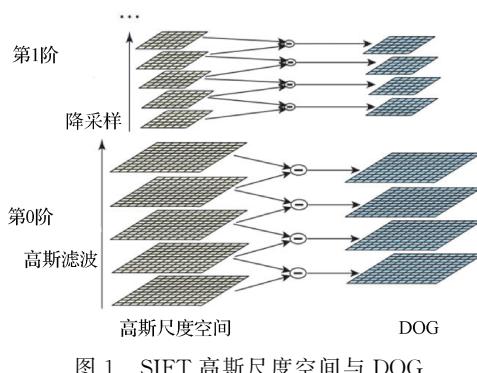


图 1 SIFT 高斯尺度空间与 DOG

其次对高斯尺度空间中相邻的两层做差,得到 DOG 金字塔,如式(3)所示:

$$D(x, y, \sigma) = (G(x, y, k\sigma) - G(x, y, \sigma)) \times I(x, y) \quad (3)$$

DOG 是高斯拉普拉斯(LOG)特征点检测算子的一种近似方法,相比于 LOG,大大减少了计算量。根据 Lowe<sup>[1]</sup>所述,DOG 和 LOG 具有如式(4)所示的约等关系:

$$G(x, y, k\sigma) - G(x, y, \sigma) \approx (k-1)\sigma^2 \nabla^2 G \quad (4)$$

最后,在 DOG 金字塔中,寻找空间极值点,极值点就是 SIFT 提取的候选特征点。当某个点在 DOG 金字塔中,比邻域的  $3 \times 3 \times 3$  都要大或者都要小时,将该点提取为候选特征点。

## 3 基于多视处理和改进 Lee 滤波的非线性尺度空间

SIFT 是为光学图像设计,光学图像信噪比较高,而且经过一定的高斯模糊后,噪声可以得到比较有效的抑制,对特征点提取影响较小。但是 SAR 图像信噪比较低,斑点噪声影响大于光学图像。斑点噪声可能会被误认为特征点,由于斑点噪声具有随机性,这类特征点数量巨大,但稳定性差,重复率低,不利于后续的特征点匹配。高斯模糊虽然可以大大减少斑点噪声被提取为特征点的情况,但是对后续的特征点匹配依然存在一定的影响,被模糊的斑点噪声会影响特征点邻域的分布,降低同名点的匹配率。因此,在尺度空间内抑制相干斑噪声对特征点提取及后续匹配非常重要。

本文采用多视处理和改进的增强 Lee 滤波来构造非线性尺度空间,减少相干斑对尺度空间的影响,保持细节特征,提高特征点数量,同 SIFT 高斯尺度空间的差别如图 2 所示。

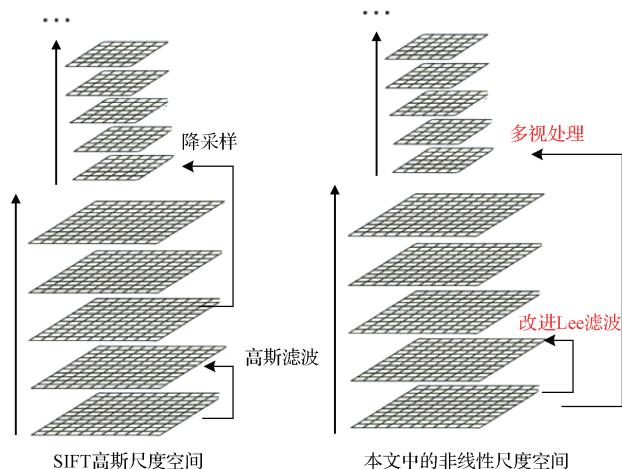


图 2 SIFT 尺度空间与本文中的非线性尺度空间

### 3.1 基于多视处理生成多分辨率图像

多视处理通常作为 SAR 图像预处理的步骤之一,是 SAR 图像常用的一类相干斑抑制方法。应用于预处理时,对 SAR 图像进行多视处理得到单幅多视图像,在单幅多视图像的基础上,进行后续的特征点提取。而本文多视处理并不应用于预处理中,而是应用于后续的特征点提取的步骤,生成多幅不同分辨率的多视图像,作为尺度空间中每一阶的第一层,是构造尺度空间的一种方法。

尺度空间中存在不同若干组尺寸的图像,相邻阶之间的尺寸为两倍的关系。SIFT 高斯尺度空间中,通过对相邻的低层阶层进行二取一降采样,构造高阶层第一层。降采样使得图像分辨率变为原来的一半,信噪比却没有提升,斑点噪声在降采样过程中没有得到抑制。不同于光学图像,SAR 图像具有相位信息,是复数图像,并且存在着空间分辨率和辐射分辨率及信噪比的转换关系,可以通过多视处理,对复数信息进行非相干叠加,降低空间分辨率,

提高信噪比,有效降低相干斑噪声的影响,

多视处理将信号的多普勒频谱划分为  $L$  部分子带,子带之间无重叠,每幅子带各自生成一幅子图像,将子图像进行非相干叠加,得到多视图像,如式(5)所示:

$$I = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L I_i \quad (5)$$

式中:  $I_i$  是各个子带生成的对应实图像,  $I$  是经非相干叠加得到的多视图像。经过多视处理后,SAR 图像分辨率降为原来的  $\frac{1}{L}$ ,信噪比 SNR 和辐射分辨率提高。

在本文中,分别在 SAR 图像的方位向和距离向上做两视处理。将 SAR 复图像做 FFT 变换为二维频域,平均分割为 4 个部分,分别做 IFFT,得到 4 幅复数子图像,对子图像取模值,进行非相干叠加,得到长宽均降为原图像一半的多视图像。利用多视处理的方式,可以代替尺度空间中的降采样,得到每阶中的第一层图像,这是 SAR 复图像特有的一种处理方法。

### 3.2 基于改进的增强 Lee 滤波建立尺度空间

在传统的 SIFT 算法中,尺度空间采用高斯卷积核构造,对不同分辨率的底层图像做迭代高斯滤波,得到一组尺度不同的图像。基于高斯尺度空间的 SIFT 方法,对特征细节和噪声进行无差别的高斯模糊,在抑制噪声的同时,也使得特征较难辨认,不利于在细节特征上提取特征点。并且高斯模糊不是针对乘性噪声设计的,存在着一定局限性。基于一般非线性尺度空间的 SIFT 算法中,采用非线性滤波器构造尺度空间,如 BFSIFT 的双边滤波器,基于双边滤波尺度空间的 BF-SIFT 算法对特征区域和均匀同质区域做了区分,在模糊噪声时,尽可能的保持细节特征。然而,一般的非线性尺度空间依然没有针对乘性相干斑噪声模型做优化。

本文采用增强 Lee 滤波,建立非线性尺度空间,并对其做了一定的改进,使之适合作为尺度空间的卷积核。基于本文方法的非线性尺度空间,不仅能有效保持细节特征,而且针对乘性噪声模型设计,适合用于 SAR 图像特征点提取。

Lee 滤波是一类空域滤波方法,用于抑制 SAR 图像的斑点噪声,是 SAR 图像处理中运用最为广泛的方法之一。Lee 滤波相比高斯滤波及双边滤波,基于完全发育的

斑点乘性噪声模型。SAR 图像的相干斑噪声就是一类乘性噪声,因此 Lee 滤波应用于 SAR 图像效果较好。Lee 滤波公式如下:

$$\bar{R} = \bar{I}(t) + W(t)(I(t) - \bar{I}(t)) \quad (6)$$

$$W(t) = 1 - \frac{C_u^2}{C_I^2(t)} \quad (7)$$

式中:  $\bar{I}(t)$  是经过中值滤波的图像,  $W(t)$  是权重系数,  $C_u$  是斑点的标准差,  $C_I$  是图像的标准差。

Lee 滤波可以有效滤除乘性噪声,但是对边缘特征细节的保持能力较差,为了尽可能保持特征细节,提高特征点提取的数量,选择增强 Lee 滤波作为尺度空间卷积核。增强 Lee 滤波是一类局部统计自适应滤波方法,考虑到了图像的不均匀性,在平滑噪声的同时,也能尽可能的保持边缘和细节特征。这一点与 BFSIFT 所采用的双边滤波器相同,针对图像不同的部分,采用不同滤波方案。相比于双边滤波的优势在于,该方法建立在乘性噪声的模型上,更适合于 SAR 图像滤波。增强 Lee 滤波的表达式如下:

$$\bar{R} = \begin{cases} \bar{I}, & C_I < C_{\min} \\ \bar{I}(t) + W(t)(I(t) - \bar{I}(t)), & C_{\min} \leqslant C_I \leqslant C_{\max} \\ I, & C_I > C_{\max} \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $C_{\min}$  和  $C_{\max}$  是设定的两个标准差阈值,其中  $C_I < C_{\min}$  为均匀同质区域,采用均值滤波方式,  $C_{\min} \leqslant C_I \leqslant C_{\max}$  为 Lee 滤波适合的乘性噪声区域,  $C_I > C_{\max}$  为边缘特征明显区域。

增强 Lee 滤波在 SAR 图像预处理中效果较好,但却不太适合作为尺度空间卷积核,直接构造尺度空间。图 3(a)和图 3(b)分别展示了高斯尺度空间、Lee 滤波尺度空间中的某一层。图中高斯尺度空间过于模糊,Lee 滤波尺度空间的特征较为清晰,但是在显著边缘附近过于突兀和尖锐,不符合自然场景下的图像,而且经过多次迭代 Lee 滤波后,突兀边缘依然存在,变化较小,不符合尺度空间中尺度渐变的要求。

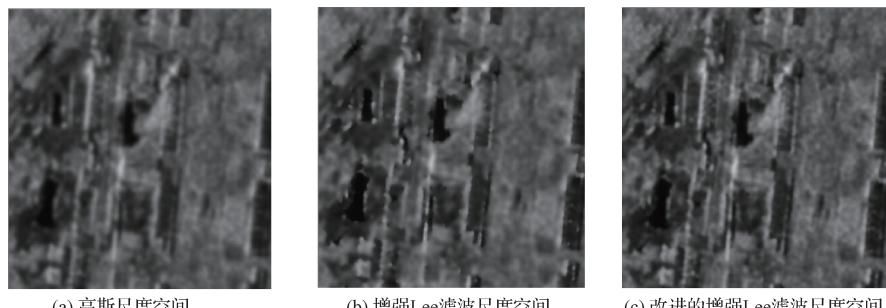


图 3 尺度空间图像对比

为了符合尺度空间的特性,对增强 Lee 滤波做了一定的改进,将  $C_l < C_{\min}$  时的均值滤波改为高斯滤波  $G_r$ ,系数为,  $C_l > C_{\max}$  时,将图像保持改为进行高斯滤波  $G_e$ ,系数为其中取的一半,改进的增强 Lee 滤波如式(9)所示:

$$\bar{R} = \begin{cases} I * G_r, & C_l < C_{\min} \\ I * G_r + W(t)(I(t) - I * G_r), & C_{\min} \leq C_l \leq C_{\max} \\ I * G_e, & C_l > C_{\max} \end{cases} \quad (9)$$

因为高斯模糊是尺度空间的唯一线性卷积核,符合人眼视觉变化特性,相比均值滤波更适合构造尺度空间。另外,高斯滤波系数  $\sigma$  是一个连续的数值,可以用来表示尺度,均值滤波则不具备这点。因此将原有的均值滤波替换为高斯滤波;同时,在细节保持上做了一定的调整,  $C_l > C_{\max}$  时表示该区域为显著的边缘,增强 Lee 滤波作为一般的预处理时,希望能完全保留显著边缘,因此直接取原图像数值,这造成了图 3(b) 中的突兀边缘。但对于尺度空间而言,在保持细节特征的前提下,必须符合尺度的变化特性,细节特征需要在一定程度上逐渐模糊,因此对于显著边缘区域,同样要进行高斯模糊,滤波系数小于均匀同质区域。这里借鉴了双边滤波的特点,对显著边缘区域采用模糊程度较小的高斯滤波,对均匀同质区域采用模糊程度较大的高斯滤波。图 3(c) 展示了改进增强 Lee 滤波尺度空间,相比高斯尺度空间,其有效保持了细节特征;相比增强 Lee 滤波尺度空间,不存在突兀的边缘,且经过多次迭代滤波后,边缘逐渐模糊,但模糊程度小于平坦区域,符合尺度空间中尺度渐变的要求。

## 4 实验结果与分析

### 4.1 多视处理抑制尺度空间噪声

本组实验数据源选取一幅大小为  $4096 \times 4096$  的机载 SAR 图像,分别采用原始 SIFT 方法和多视处理构造尺度空间,得到尺度空间内各阶的第一层图像。为评价引入多视处理对图像噪声带来的影响,采用等效视数(ENL)作为指标,衡量尺度空间的相干斑程度,其定义如下:

$$ENL = \frac{u_x^2}{\sigma_x^2} \quad (10)$$

式中:  $u_x$  为均值,  $\sigma_x^2$  为方差,对于均匀同质区域,等效视数越大,表示相干斑抑制效果越好。

分别采用降采样和多视处理生成尺度空间的第一层,取两幅图像相同部分的均匀同质区域,大小为。计算两幅图像的等效视数 ENL,结果如表 1 所示,ENL1 和 ENL2 为两块不同的均匀同质区域,从表中可以看到,采用多视处理代替降采样后,尺度空间第一层的等视系数提高。这是因为多视处理可以通过牺牲分辨率的方式,来提高信噪比,而降采样则不改变图像信噪比。因此,采用多视处理来构造尺度空间第一层,不仅提高了辐射分辨率,同时也抑制了相干斑,有利于后续的特征点提取与匹配。

表 1 降采样与多视处理构造尺度空间的等效视数对比

|      | 等效视数(ENL1) | 等效视数(ENL2) |
|------|------------|------------|
| 降采样  | 331.097 7  | 176.248 6  |
| 多视处理 | 356.534 4  | 184.832 1  |

### 4.2 SAR 图像特征点提取实验

本组实验分别从特征点提取和特征点匹配两个方面来衡量效果。首先选取一幅大小为,分辨率为  $0.2\text{ m}$  的机载 SAR 图像,图像来自四川某地。分别采用 SIFT 方法、BFSIFT 和本文采用的非线性尺度空间 SIFT(以下称为 Lee-SIFT),提取图像特征点。特征点提取效果如图 4 所示,特征点及其方向以箭头的形式表示。图中 SIFT 采用高斯尺度空间,提取的特征点较为稀疏,数量最少,呈现均匀分布状态;BFSIFT 采用双边滤波尺度空间,提取的特征点数量最多,但也呈现均匀分布状态,在不应该提取出特征点的均匀同质区域有大量特征点;本文所用 Lee-SIFT 方法如图 4(c) 所示,特征点数量较原始 SIFT 有所提升,且集中分布在特征明显的区域,在特征不明显的均匀同质区域几乎没有特征点。本文所采用的特征点提取方法优于 SIFT 和 BFSIFT,特征点数量提升,且代表着图中的显著特征。

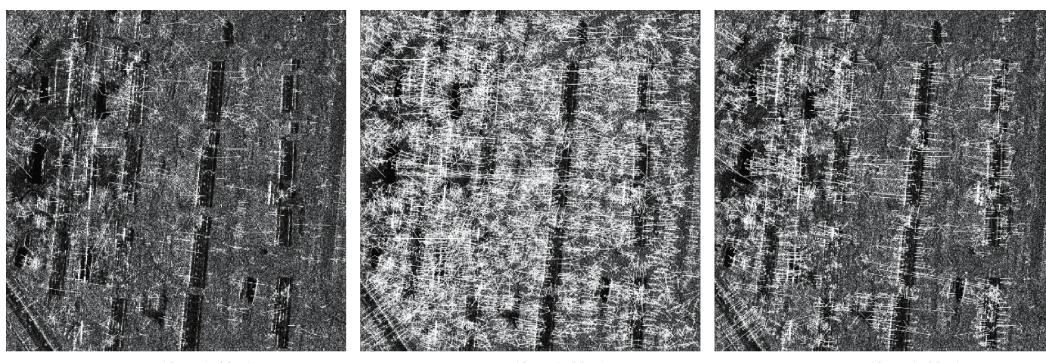


图 4 特征点提取示意

为衡量最终的特征点匹配效果,对两幅 SAR 图像进行特征点提取和同名点匹配,观察特征点数量和正确匹配点数量。数据源选取一组 SAR 图像,大小为和,两幅图像为不同时间得到的机载 SAR 图像,分辨率为 0.2 m。采用的方法分别为 SIFT, 基于多视处理和增强 Lee 滤波的 SIFT(以下称为 M1-SIFT), 以及本文采用的基于多视处理和改进 Lee 滤波的 SIFT(以下

称为 Lee-SIFT)。结果如图 5 和表 2 所示,从图中可以看出,相比 SIFT,本文采用的 Lee-SIFT 方法显著提高了特征匹配效果。对比 M1-SIFT 和 Lee-SIFT,可以发现,相比于增强 Lee 滤波,本文对增强 Lee 滤波改进后,显著提高了特征点的正确匹配率,因此,文章 3.2 所述的 Lee 滤波改进方法比原有的增强 Lee 滤波更适合构造非线性尺度空间。

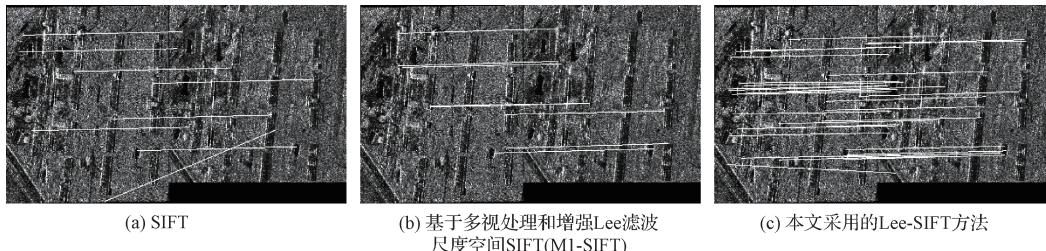


图 5 特征点匹配效果

表 2 3 种方法所提取的特征点数量及正确匹配点数量

|             | SIFT  | M1-SIFT | Lee-SIFT |
|-------------|-------|---------|----------|
| 正确匹配点 / 特征点 | 7/682 | 8/2 034 | 28/2 340 |

## 5 结 论

本文提出了一种基于多视处理和改进 Lee 滤波的非线性尺度空间的构建方法,用于提取具有尺度不变性的 SIFT 特征点。该方法有效地抑制了尺度空间中的相干斑噪声,同时尽量保留了特征的细节信息,极大提高了特征点的数量,使得提取出的特征点分布在显著特征附近。最终的特征点匹配结果表明,该方法能显著提高特征点的正确匹配率,有利于 SAR 图像特征点匹配。下一步的研究方向是如何调整改进 Lee 滤波的参数,使得特征点提取效果和匹配效果最佳。

## 参 考 文 献

- [1] 黄世奇, 刘代志. SAR 图像斑点噪声抑制方法与应用研究[J]. 测绘学报, 2006, 35(3): 246-249.
- [2] 尤红建, 胡岩峰. SAR 和光学图像精配准技术的研究[J]. 雷达学报, 2014, 3(1): 78-84.
- [3] 朱磊, 程冬. SAR 图像相干斑噪声的各向异性扩散滤波算法 [J]. 电子测量与仪器学报, 2011, 25(10): 857-863.
- [4] 许佳佳, 张叶, 张赫. 基于改进 Harris-SIFT 算子的快速图像配准算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(1): 48-54.
- [5] 鲁萌萌, 赵凤军, 李宁. 基于词包模型的高分辨率 SAR 图像特征提取[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(6): 62-69.
- [6] 杨世沛, 陈杰, 周莉, 等. 一种基于 SIFT 的图像特征匹配方法[J]. 电子测量技术, 2014, 37(6): 50-53.
- [7] LI Q, WANG G, LIU J, et al. Robust scale-invariant feature matching for remote sensing image registration[J]. Geoscience and Remote Sensing Letters, 2009, 6(2): 287-291.
- [8] WANG F, YOU H, FU X. Adapted anisotropic Gaussian SIFT matching strategy for SAR registration[J]. Geoscience and Remote Sensing Letters, 2015, 12(1): 160-164.
- [9] ALCANTARILLA P F, BARTOLI A, DAVISON A J. KAZE features [M]. Computer Vision-ECCV 2012. Springer Berlin Heidelberg, 2012: 214-227.
- [10] WANG S, YOU H, FU K. BFSIFT: A novel method to find feature matches for SAR image registration[J]. Geoscience and Remote Sensing Letters, 2012, 9(4): 649-653.
- [11] FAN J, WU Y, WANG F, et al. SAR image registration using phase congruency and nonlinear diffusion-based sift[J]. Geoscience and Remote Sensing Letters, 2015, 12(3): 562-566.

## 作 者 简 介

朱翔宇,1992 年 8 月出生,中国科学院电子学研究所,硕士研究生,主要研究方向为遥感图像处理与配准、景象匹配导航。

E-mail: ZhuxiangyuBIT@126.com