

基于改进 Markov 随机场的高分辨率 SAR 图像建筑物分割算法

傅兴玉^{1,2,3}, 尤红建^{1,2}, 付 琨^{1,2}

(1. 中国科学院空间信息处理与应用系统技术重点实验室, 北京 100190;
2. 中国科学院电子学研究所, 北京 100190; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要: 提出了一种基于改进 Markov 随机场模型的高分辨率 SAR (Synthetic Aperture Radar, 合成孔径雷达) 图像建筑物分割算法. 针对高分辨率 SAR 图像信噪比低和建筑物复杂纹理特性的特点, 采用多尺度 Markov 随机场模型的最大似然准则方法获取图像的初始分割, 并在传统 Markov 邻域能量模型基础之上提出一种新的基于 Gabor 纹理相似度的邻域势函数模型, 采用 ICM (Iterative Conditional Model, 迭代条件模型) 算法进行建筑物分割. 多组实际高分辨率 SAR 图像的实验结果表明, 与传统 MRF 算法等方法相比, 本文方法具有更高的分割正确率, 同时建筑物边界更为清晰平滑, 分割效果较好.

关键词: 高分辨率 SAR 图像; 建筑物分割; 多尺度 Markov 随机场; Gabor 特征

中图分类号: TP753; TN959.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2012)06-1141-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2012.06.012

Building Segmentation from High-Resolution SAR Images Based on Improved Markov Random Field

FU Xing-yu^{1,2,3}, YOU Hong-jian^{1,2}, FU Kun^{1,2}

(1. Key Laboratory of Technology in Geo-spatial Information Processing and Application System, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: An approach was proposed for building segmentation from high resolution SAR (Synthetic Aperture Radar) images based on an improved Markov random field (MRF) model. Aiming at the property of low SNR (Signal to Noise Ratio) of SAR images and the complexity of building textures, we obtained the initial segmentation using the maximum likelihood (ML) algorithm based on the multi-scale MRF model and involved the Gabor similarity between pixels based on the traditional MRF potential function, and employed the ICM (Iterative Conditional Model) algorithm to implement the segmentation. The experimental results on several real SAR images show that the proposed approach performs better than traditional methods in the segmentation accuracy, and building boundaries are clearly obtained by the proposed approach.

Key words: high-resolution SAR image; building segmentation; multi-scale Markov model; Gabor feature

1 引言

利用遥感手段进行建筑物的自动检测和提取一直以来都是研究的热点内容. 近年来, 随着机载合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar, SAR) 技术的不断成熟, 获取 SAR 图像分辨率得到了很大提高, 目前国外机载 SAR 图像分辨率已经达到 0.1m (如美国 miniSAR、法国 RAMSES), 我国机载 SAR 的分辨率也已经达到了很高的水平. 在高分辨率条件下, SAR 图像中建筑物表现出来的

空间几何结构和纹理信息更加明显, 为提取和重构建筑物提供了重要的数据源.

以前 SAR 图像分辨率较低, 利用 SAR 图像难以确定建筑物大小、形状和准确位置等信息, 极大地限制了 SAR 图像在建筑物提取上的应用. 一般情况下, 利用 SAR 图像进行建筑物提取多采用多种数据源融合的方法进行. Tupin^[1]、Sportouche 等^[2]通过融合 SAR 图像和高分辨率光学影像进行建筑物提取. 近年来, 随着 SAR 图像分辨率的不断提高, 单栋建筑物在图像上表现“叠

掩”,二面角反射和阴影等几何结构特征越来越明显,使得基于高分辨率 SAR 图像进行建筑物提取和三维重建成为可能. Thiele 等^[3]融合垂直方向的高分辨率 SAR 图像进行建筑物提取的实验,不同方向下建筑物的 L 型结构反映不同,因此组合多个方向的 L 型结构可以较好地确定建筑物位置. Brunner 等^[4]以建筑物为例对城区高分辨率 SAR 图像中人造地物的电磁散射模型和典型的几何结构特征进行了分析,并给出了一种可以较为精确描述高分辨率 SAR 图像中建筑物典型几何结构的 SAR 图像仿真方法,Michaelsen 等^[5]给出了利用建筑物典型几何特征的分组和决策方法从高分辨率 SAR 图像中提取建筑物的轮廓区域的方法. 赵等^[6]利用恒虚警率检测和方向相关分析相结合的方法得到建筑物梯度图像,然后作分水岭变换得到建筑物边界轮廓.

建筑物分割是利用高分辨率 SAR 图像进行建筑物检测和提取的重要步骤,分割效果的好坏直接影响到了后续精度. 马尔可夫随机场(Markov Random Field, MRF)模型方法融合分类先验分布模型和像素的局部邻域结构,利用传统贝叶斯估计实现图像分割,在 SAR 图像分割中获得了越来越广泛的应用^[7-10]. 侯等^[9]在传统 MRF 的邻域基团势函数基础上,引入了邻域中像素的强度差值以及像素之间的距离因子. 上述基于 MRF 的 SAR 图像分割算法在中低分辨率的 SAR 图像上获得了较好的应用,但在高分辨率 SAR 图像建筑物区域分割的效果并不理想. 首先,没有考虑 SAR 图像斑点噪声的特点,直接使用原始图像进行最大似然分割,初始分割效果较差. 其次,高分辨率 SAR 图像建筑物表现出明显的亮斑纹理结构,传统势函数模型已不能描述建筑物复杂的纹理结构. 针对上述特点,本文对传统 Markov 随机场模型方法进行如下改进:(1)构建 SAR 图像多尺度序列,采用基于多尺度 MRF 模型的似然函数值改善图像的初始分割.(2)提出一种基于像素 Gabor 纹理相似度的邻域势函数模型.

2 Markov 随机场图像分割

Markov 随机场模型将大小为 $M \times N$ 的图像看成二维网格点集 $S = \{s = (x, y) | 1 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq N\}$, 其中 M 和 N 分别表示图像的宽度和高度. 分类标签 $X = \{X_1, X_2, \dots, X_m\}$ 为二维网格 S 所对应的随机场. 在二维网格内定义邻域系统 $\eta = \{\eta_{ij} : (i, j) \in S, \eta_{ij} \in S\}$, 然后通过类别的先验分布和空间关系对随机场进行最大后验概率估计,确定像素点最可能的分类.

根据贝叶斯理论,给定观测图像 Y , 分类标签 X 的后验分布为:

$$P(X|Y) = \frac{P(Y|X)P(X)}{P(Y)} \quad (1)$$

其中, $P(Y|X)$ 是在给定分类标签 X 时,观测图像 Y 的条件概率, $P(X)$ 表示分类先验概率, $P(Y)$ 表示观测图像的概率,一般为常数,可由观测图像统计得出. 于是,分割的目的就是在给定观测图像 Y 的条件下,求的使后验分布 $P(Y|X)$ 最大的 X 的估计.

$$\hat{X}_{\text{MAP}} = \arg \max_x P(X|Y) \quad (2)$$

由 Hamersley-Clifford 定理可知, MRF 与 GRF (Gibbs Random Field, 吉布斯随机场)具有一致性,可以通过能量函数确定 MRF 的条件概率^[10]. MRF 条件分布概率可以采用 Gibbs 组合分布形式来表示

$$P(X = x | Y = y) = Z^{-1} \exp^{-U(x|y)} \quad (3)$$

其中 U 代表能量函数, Z 代表归一化系数. 能量函数与像元本身和邻域基团有关,其形式可分解为:

$$U(x|y) = - \sum_s \ln p(y_s | x_s) + \sum_{c \in V_c} V_c(x) \quad (4)$$

其中 S 表示图像对应的二维网格点集, V_s 表示所有基团组成的集合.

上式中第一项是似然能量项,表述像元本身对能量的贡献,一般采用图像的先验分布模型计算得到;第二项是邻域能量项,对分割起到规则化作用,一般形式如下

$$V_c(x) = \beta(1 - \delta(x_i, x_j)) \quad (5)$$

其中 β 为分类参数,为大于零的常数,用来调整似然能量和邻域能量的权重. δ 是二元吉布斯函数,

$$\delta(x_i, x_j) = \begin{cases} 1, & \text{if } (x_i = x_j) \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

不同结构类型的基团反应了像元邻域的局部结构特征,对分类起到规则化的作用. 理论上,通过求解使得式(2)取得全局能量最小的分类结果即可实现图像的最优分割. 然而,实际应用中,在整幅图像内寻找取得全局能量最小的分类结果存在很大的困难,通常使用图像累加的局部最优解代替全局最优解,通过单个像素及其邻域的简单交互获得复杂的全局行为. ICM (Iterative Conditional Model, 迭代条件模型)是最常见的求解算法,它利用像素幅度值和邻域标签来计算在单个像素点的能量值,以取得最小能量值的分类标签作为像素点的分类结果,通过迭代求解直至全局能量稳定.

3 建筑物 SAR 图像分布模型

建筑物在高分辨率 SAR 图像上表现出明显的“叠掩”,二次散射和阴影等几何结构特征. 依据高分辨率 SAR 图像中建筑物的成像几何结构和散射特性,本文将 SAR 图像建筑物场景分成以下三类

(1)建筑物区域,包括“叠掩”区域、二次散射等区域. 表现出较强的后向散射特性,区域亮度较高,内部

存在较多的强散射亮斑结构,表现出复杂的纹理特性.

(2)阴影区域,由于 SAR 侧视工作,在建筑物背侧存在明显的阴影区域由于无 SAR 回波数据,表现为暗色斑块结构,一般与建筑物成对出现.

(3)背景区域,将场景内的其他地物归入背景类,主要包括后向散射较低的道路、树木和裸露地面等.这些区域后向散射低于建筑物,像素变化相对较为缓和.

对于城区建筑物区域高分辨率 SAR 图像,电磁波的散射非常复杂,一般采用统计分布模型描述图像像素值的分布. Tison 等^[8]使用 Fisher 分布描述高分辨率 SAR 图像建筑物像素分布模型,较好地拟合了高分辨率 SAR 图像中建筑物分布模型. Fisher 分布的概率分布密度函数如下

$$p_{\text{Fisher}}(u) = \frac{\Gamma(L+M)}{\Gamma(L)\Gamma(M)} \frac{L}{M\mu} \left(\frac{L}{M\mu}u\right)^{L-1} \frac{1}{\left(1 + \frac{L}{M\mu}u\right)^{L+M}}, L > 0; M > 0 \quad (7)$$

其中 L, M 是分布形状参数, μ 是权重参数. 对于高分辨率 SAR 图像中建筑物、阴影和背景等三种类型的区域,人工在图像上选择监督区域,利用参数估计方法计算三个类别的分布参数^[8].

4 改进 Markov 随机场模型的 SAR 图像分割

高分辨率 SAR 图像由于受斑点噪声的影响,图像值发生剧烈变化,表现为同质区域内,有些像素点呈现亮点,有些则呈现为暗点;同时建筑物内部出现较多的强散射亮斑结构,场景内存在多路径效应,纹理特性复杂. 针对上述特点,本文对传统 MRF 分割算法进行如下改进:第一,采用基于多尺度 MRF 模型的似然函数求解方法,改善 SAR 图像初始分割;第二,对于邻域能量项,增加与像素点 Gabor 纹理相似度成反比的权重系数,增强算法对建筑物区域纹理特征的分割能力.

4.1 多尺度最大似然分割

Markov 随机场图像初始分割一般采用极大似然准则获得,然而高分辨率 SAR 图像受乘性斑点噪声影响严重,在原始尺度下很难做到较好的分割结果,直接影响了分割效率和分割结果. 本文采用基于多尺度 MRF 模型的似然函数模型改善 SAR 图像初始分割. 多尺度 MRF 模型由一系列从精尺度到粗尺度的图像随机场组成,其中每层场仅依赖于前一尺度(较精尺度)的随机场,因此随机场之间形成

了一个马尔可夫链^[10]. 图 1 是多尺度 MRF 图像金字塔模型示意图,其中最下面的尺度对应了原始 SAR 图像,尺度精

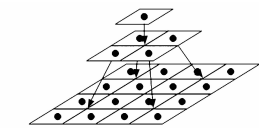


图1 多尺度MRF图像金字塔模型示意图

度最高,其余每层均由前一尺度的随机场通过降采样方式获得.

计算 SAR 图像像素点在每个尺度下的对数似然值,以取得加权似然函数值(Weighted Maximum Likelihood Estimation, WMLE)最大的类别作为像素点的初始分类. 改进后似然值的求解形式如下

$$\hat{x}_{\text{WMLE}} = \arg \max_x \sum_n [\lambda_n \ln p_n(y|x)] \quad (8)$$

其中, λ_n 和 p_n 分别表示在尺度 n 下的像素的分布密度函数和尺度加权系数.

尺度层数和加权系数都是影响分割结果的重要因素. 通过实验发现,随着尺度层数的增加,分类正确率趋于稳定,过多层数不会提高分割精度,反而影响计算效率,一般选择 2~3 个尺度较为合适. 较精尺度的随机场局部相关系数较小,对细节结构描述能力好,对似然函数贡献大;粗尺度在较好拟合分布模型的情况下,对斑点噪声的抑制能力好,但容易忽略图像的细节结构信息,对似然函数值贡献小. 因此,加权系数选择随尺度增大而减小的递减函数.

4.2 融合 Gabor 纹理特征邻域能量模型

传统 MRF 邻域能量模型通过判断当前像素与邻域基团的分类标签是否相等确定基团势能量,对图像局部结构具有一定的描述能力,但不足以表达建筑物复杂多变的纹理结构;同时由于使用固定分类参数,分割结果容易陷入局部稳定,造成分割结果出现较多错误斑块. Gabor 纹理特征具有较好的尺度和方向选择性,已经成功地应用于图像分割、目标检测和识别领域中^[11~13]. 本文融合多方向多尺度 Gabor 纹理特征,引进一种新的基于 Gabor 纹理相似度的邻域势函数来增强对建筑物纹理区域表述能力. 2 维 Gabor 基函数通常表示为被复正弦函数调制的高斯函数,其一般形式如下^[12],

$$g(x, y; \sigma, \lambda, \theta_k) = \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{(x-\mu_x)^2}{\lambda\sigma^2} + \frac{(y-\mu_y)^2}{\lambda\sigma^2}\right]\right\} \cdot \exp\left[\frac{2\pi(x\cos(\theta_k) + y\sin(\theta_k))}{\lambda}\right] \quad (9)$$

其中, λ 表示尺度参数, μ_x 和 μ_y 表示高斯函数均值(描述了 Gabor 函数的中心位置), σ^2 表示高斯函数方差(描述了函数主瓣的大小), θ_k 表示波动方向.

对原始高分辨率 SAR 图像,采用不同方向不同尺度的 Gabor 基函数进行滤波,得到建筑物的纹理特征矢量 V . 定义中心像素和邻域基团的 Gabor 纹理相似度如下

$$D = \sum_v \|g(x, y; \sigma, \lambda, \theta_k) - g'(x, y; \sigma, \lambda, \theta_k)\| \quad (10)$$

其中 $g(x, y; \sigma, \lambda, \theta_k)$ 和 $g'(x, y; \sigma, \lambda, \theta_k)$ 分别表示中

心像素和邻域基团的不同尺度不同方向的 Gabor 滤波器响应值. D 是中心像素同邻域基团之间的 Gabor 纹理相似度距离, D 值为大于零的实数, $D = 0$ 说明两者纹理结构完全相同; D 值越大, 说明两者纹理越不相似. 改进后的邻域基团势函数的形式如下

$$V_c(x_i, x_j) = \begin{cases} 0, & x_i = x_j \\ (1 - e^{-\alpha D})\beta, & x_i \neq x_j \end{cases} \quad (11)$$

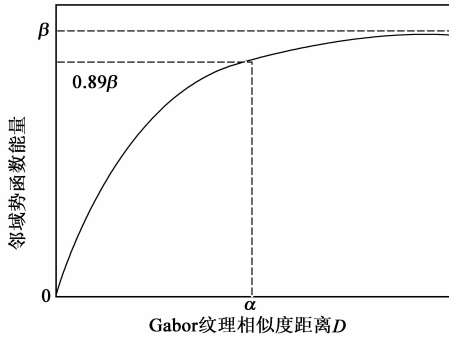


图2 邻域势函数能量随相似度距离 D 变化的函数曲线

其中 β 为大于零的常数, 用来控制先验能量和邻域能量的比重. 当 $x_i = x_j$ 时, 即像元和邻域基团具有相同的分类标签, 能量势函数值为零. 当 $x_i \neq x_j$ 时, 如果两者

间的 Gabor 相似度距离 D 越接近零, 说明两者纹理特征越相似, 归入一类的可能性越大, 相应势函数值越接近零. 反之, 如果 D 值越大, 两者具有相同分类标签的可能性越小, 能量值就越接近 β . 参数 α 为大于零的常数, 用来控制曲线形状, 其值越大, 相似度距离较大的像素被归入一类的可能性就越大. 图 2 给出了在邻域势函数能量随相似度距离 D 变化的函数曲线图.

5 实验结果与分析

本文选择了中科院电子所提供的机载高分辨率 SAR 图像进行建筑物分割实验. 原始高分辨率 SAR 图像如图 3(a) 所示, 距离向和方位向的地面分辨率均约为 0.5m, 图像大小为 270px \times 359px. 图 3(b) 是采用传统最大似然准则方法得到的 SAR 图像初始分割的结果, 其中白色像素对应建筑物区域, 黑色对应阴影区域, 灰色对应背景区域. 图 3(c) 和图 3(d) 是分别采用尺度加权系数 $\lambda_n = (n^2 + 1)^{-1}/Z$ 和 $\lambda_n = (n + 1)^{-1}/Z$ (Z 表示归一化系数) 三个尺度进行加权得到的初始分割结果, 使用到了原始尺度, 尺度 1 和尺度 2 (尺度 1 的 1/2) 共三个尺度的图像.

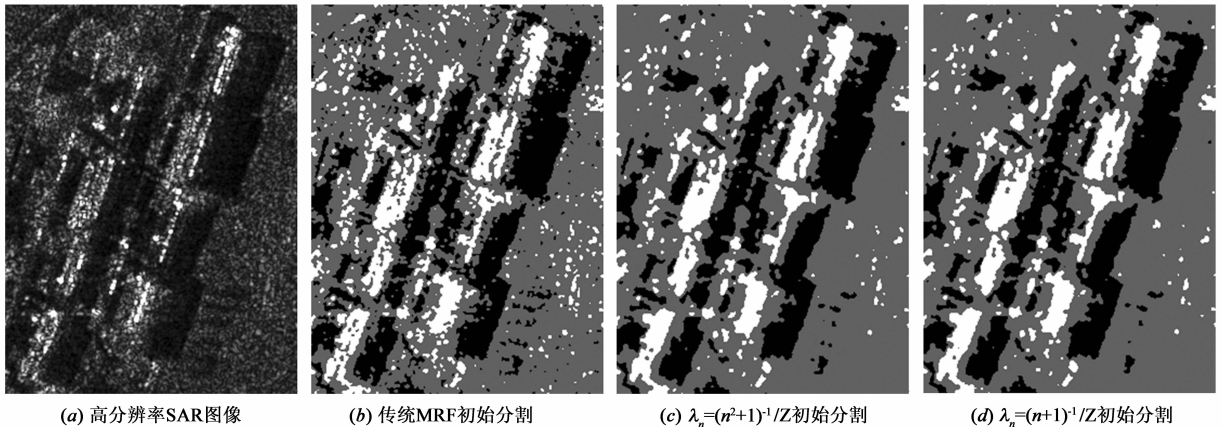


图3 高分辨率SAR图像初始分割实验结果

从上述初始分割结果不难看出, 图 3(c) 和 3(d) 的分割结果要明显优于图 3(b), 分割结果较为清晰平滑, 孤立像素较少. 图 4 给出了分别从上述初始分割结果出发, 使用 ICM 算法迭代求解过程中建筑物和阴影类别的像素数目变化曲线图. 通过比较可以发现, 采用基于多尺度似然函数值后, 初始分割像元数目更接近稳定方向. 同时后续迭代收敛较快, 改进后迭代次数明显减少.

对建筑物原始高分辨率 SAR 图像, 分别在 3 个尺度 (5×5 , 7×7 和 9×9) 和 4 个方向 (0 , $\pi/4$, $\pi/2$ 和 $3\pi/4$) 进行 Gabor 滤波, 共得到 12 组滤波图像. 相当于对于高分辨率 SAR 图像构造了其 12 维的 Gabor 纹理特征向量, 图 5 给出了建筑物 SAR 图像部分区域的多尺度多

方向滤波结果. 从图中结果不难看出, 在较小滤波尺度下, 建筑物 Gabor 特征表现出明显的方向线, 随着滤波尺度的变大, 建筑物内部的纹理特性逐渐趋于一致.

从图 3(d) 的初始分割结果出发, 分别采用传统邻域势函数模型、文献[9]势函数模型和本文邻域模型, 使用 ICM 算法对高分辨率 SAR 图像中的建筑物区域进行分割, 结果图像分别如图 6(a)、(b) 和 (c) 所示, 图 6(d) 是人工分割的结果图像. 不难看出, 传统 MRF 算法和文献[9]中的方法得到的结果存在较多的误分割斑块, 同时建筑物边缘存在裂缝和孔洞, 分割效果不理想. 本文方法得到的分割结果, 只有较少错分斑块, 同时建筑物边缘轮廓清晰, 内部孔洞被消除, 目视效果较好.

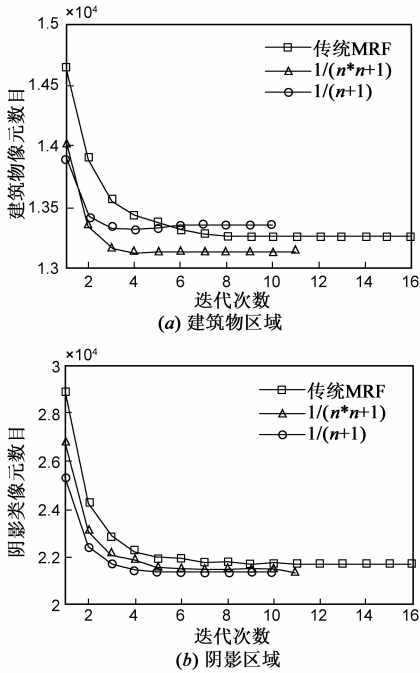


图4 迭代过程中建筑物和阴影区域像素数目变化曲线图

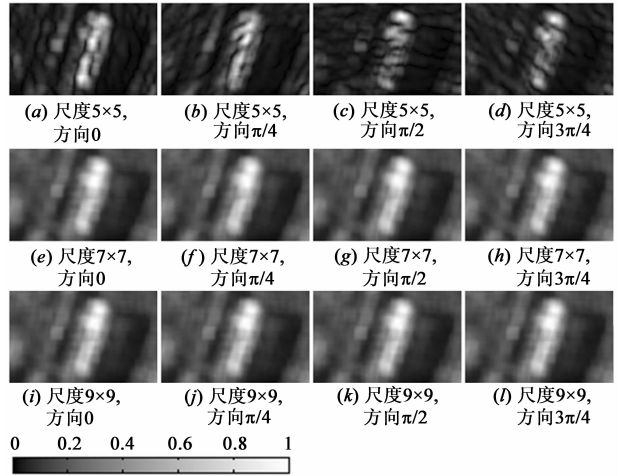


图5 不同尺度不同方向Gabor滤波结果

表 1 给出了上述三种分割方法的性能和分割结果对比表.从表中可以看出,本文方法得到的分割结果正确性上优于传统 MRF 和文献[9]中的方法.在时间上,本文方法虽然单次迭代过程耗时较长,但是迭代收敛较快,总的运算时间与传统方法相差不多.

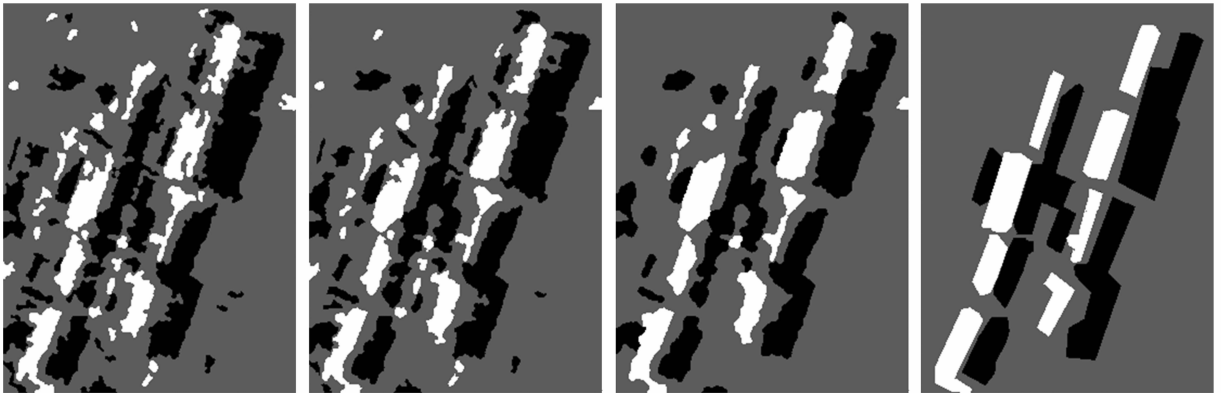


图6 高分辨率SAR图像建筑物分割结果

表 1 三种分割方法性能对比表

分割算法	分类正确率(建筑物/阴影)	迭代次数	时间(s)
传统 MRF	72.66%/81.91%	14	32
文献[9]方法	77.06%/83.99%	18	46
本文方法	80.04%/86.31%	13	34

实验 2 和实验 3 分别选取建筑物相对分散和分布密集区域的实测高分辨率 SAR 图像进行建筑物区域分割试验,原始高分辨率 SAR 图像分别如图 7(a)和图 8(a)所示.从图中可以看出,建筑物存在大量强散射斑块结构,同时存在严重的多路径散射效应.同时,从图 8

(a)可以看出,图像中的建筑物距离较近,阴影被相邻建筑物“叠掩”结构截断,图像非常复杂.图 7 和图 8 的 (b)、(c)和 (d)分别是采用传统 MRF 算法、文献[9]算法和本文算法进行建筑物分割的结果图像.其中,图像的初始分割采用 $\lambda_n = (n + 1)^{-1}/Z$ 系数融合原始尺度、尺度 1 和尺度 2 的似然函数值得到的,改进邻域能量模型采用了与实验 1 相同的 12 维 Gabor 纹理特征.对比分割结果图像不难看出,本文方法通过融合多方向多尺度 Gabor 纹理特征不仅可以有效地分割出建筑物区域,而且分割得到的建筑物边界清晰平滑,毛刺和裂缝较少,同时较好地避免将其他强散射体形成的孤立亮斑结构分割成建筑物区域.

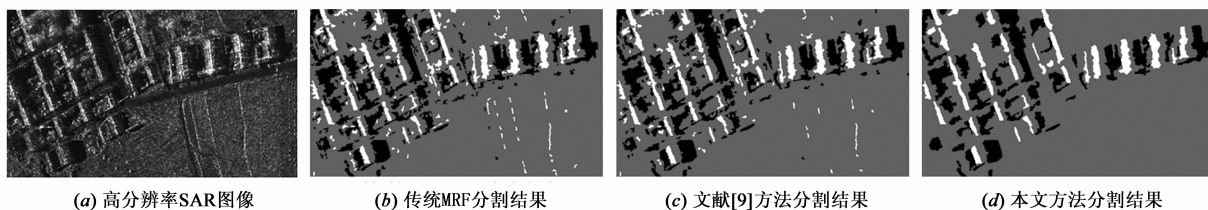


图7 高分辨率SAR图像建筑物区域分割实验2

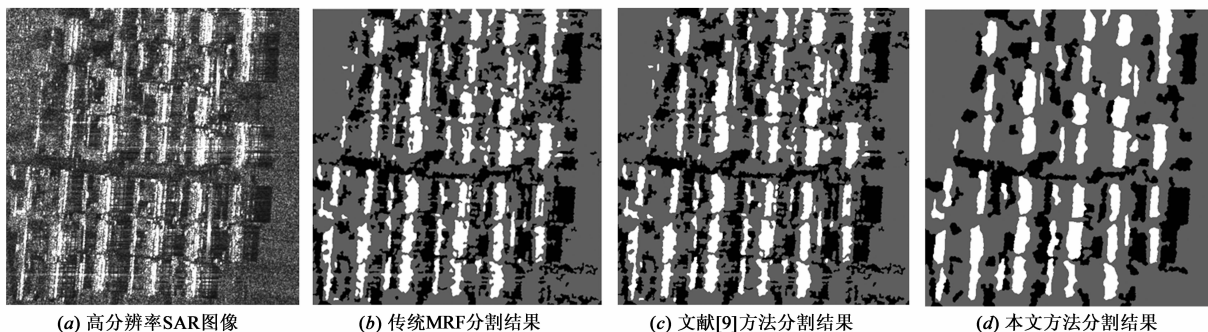


图8 高分辨率SAR图像建筑物区域分割实验3

6 结束语

机载高分辨率 SAR 图像可以提供建筑物更为清晰的几何结构和纹理特征等信息,但是 SAR 图像斑点噪声严重,同时建筑物区域纹理结构非常复杂,为建筑物分割带来较大的困难.本文提出了一种基于改进 Markov 随机场的高分辨率 SAR 图像建筑物分割算法,一方面采用基于多尺度 MRF 模型的加权似然函数值获得 SAR 图像的初始分割,另一方面提出一种基于 Gabor 纹理相似度距离的邻域势函数模型,来增强对建筑物纹理的表述能力,提高分割的准确度.多组真实机载高分辨率 SAR 图像实验结果表明,与其他算法相比,由于充分考虑了高分辨率 SAR 图像信噪比低和建筑物复杂的纹理特性的特点,本文方法具有更高的分割正确率,同时建筑物边界更为清晰平滑,内部孔洞较少,错分斑块较少,分割结果较为理想.

参考文献

- [1] Tupin F, Roux M. Detection of building outlines based on the fusion of SAR and optical features [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2003, 58: 71 – 82.
- [2] Sportouche H, Tupin F, Denise L. Building extraction and 3D reconstruction in urban areas from high-resolution optical and SAR imagery [A]. *Joint Urban Remote Sensing Event [C]*. Shanghai: IEEE, 2009. 1 – 11.
- [3] Thiele A, Cadario E, Schulz K, et al. Building recognition from multi-aspect high-resolution InSAR data in urban areas [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007,

45(11):3583 – 3593.

- [4] Brunner D, Lemoine G, Greidanus H, et al. Radar imaging simulation for urban structures [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2011, 8(1): 68 – 72.
- [5] Michaelsen E, Stilla U, Soergel U, et al. Extraction of building polygons from SAR images: Grouping and decision-level in the GESTALT system [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2010, 31: 1071 – 1076.
- [6] 赵凌君, 匡纲要. 基于分水岭变换的高分辨率机载城区 SAR 图像建筑物自动检测方法 [J]. *电子与信息学报*, 2008, 30(10): 2326 – 2329.
ZHAO Ling-jun, KUANG Gang-yao. A watershed-based automatic building detection in high-resolution airborne urban SAR images [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, 30(10): 2326 – 2329. (in Chinese)
- [7] 吴永辉, 计科峰, 李禹, 等. 基于 Wishart 分布和 MRF 的多视全极化 SAR 图像分割 [J]. *电子学报*, 2007, 35(12): 2303 – 2307.
WU Yong-hui, JI Ke-feng, LI Yu, et al. Segmentation of multi-look fully polarimetric SAR images based on Wishart distribution and MRF [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2007, 35(12): 2303 – 2307. (in Chinese)
- [8] Tison C, Jean-Marie N, Tupin F, et al. A new statistical model for Markovian classification of urban areas in high-resolution SAR images [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(10): 2046 – 2057.
- [9] 侯一民, 郭雷. 一种基于马尔可夫随机场的 SAR 图像分

割新方法[J].电子与信息学报,2007,29(5):1070-1074.

HOU Yi-min, GUO Lei. A novel SAR image segmentation method based on Markov random field [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2007, 29(5): 1070 - 1074. (in Chinese)

- [10] 焦李成,张向荣,侯彪,等.智能 SAR 图像处理与解译[M].北京:科学出版社,2008.462-465.

JIAO Li-cheng, ZHANG Xiang-rong, HOU Biao, et al. Intelligent SAR Image Processing and Interpretation [M]. Beijing: Science Press, 2008. 462 - 465. (in Chinese)

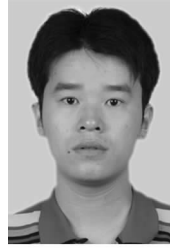
- [11] 雷琳,王壮,粟毅.基于多尺度 Gabor 滤波器组的不变特征点提取新方法[J].电子学报,2009,37(10):2315-2320

LEI Lin, WANG Zhuang, SU Yi. A new invariant feature detector based on multi-scale Gabor filter bank [J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(10): 2315 - 2320. (in Chinese)

- [12] Andrysiak T, Choras M. Image retrieval based on hierarchical Gabor filters [J]. International Journal Applied Computer Science, 2005, 15(4): 471 - 480.

- [13] Bau T C, Sarkar S and Healey G. Hyperspectral region classification using a three-dimensional Gabor filterbank [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(9): 3457 - 3464.

作者简介



傅兴玉 男,1984年1月出生于山东菏泽,2007年获中国海洋大学学士学位,2007年至今在中国科学院电子学研究所攻读博士学位.主要研究方向包括高分辨率 SAR 图像建筑物三维重构和地理空间信息处理与应用.

E-mail: iecasfy@163.com



尤红建 男,1969年11月出生于江苏如皋,研究员,博士生导师.1992年获武汉测绘科技大学(现属武汉大学)学士学位,1995年获清华大学硕士学位,2001年获中国科学院遥感应用研究所博士学位.承担过 863、国家自然科学基金等国家级项目,已经出版专著两部.目前主要从事遥感图像处理和应用领域研究.

E-mail: hjyou@mail.ie.ac.cn



付琨 男,1974年月6月出生于湖北天门,博士后,研究员.1995年和2002年在国防科技大学分别获得学士学位和博士学位.2002年进入中国科学院电子学研究所博士后流动站,2005年出站留所工作至今.现任中国科学院空间信息处理与应用技术重点实验室主任.目前主要从事遥感卫星地面处理和地理空间信息应用技术领域的研究. E-mail: fukun@mail.ie.ac.cn