

基于图割及均值漂移的合成孔径雷达图像强散射目标分割

吕倩^{1,2,3*}, 高君^{1,2,3}, 高鑫^{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. 中国科学院大学, 北京 100049)

(*通信作者电子邮箱 lv_qianie@163.com)

摘要:针对合成孔径雷达(SAR)图像的特点及标准图割分割算法计算量较大等问题,提出了一种基于图割及均值漂移(Mean Shift)的高效的SAR图像强散射目标分割方法。该方法利用均值漂移算法对SAR图像进行预处理,将原图像表示为基于过分割区域的图结构;然后,以这些过分割图像区域为节点建立区域邻接图,运用图割分割算法得到SAR强散射目标的分割结果。与标准图割算法中以单像素为节点构建邻接图相比,参与图割算法的节点和边的数目减少了两个数量级,计算效率大幅提高。另外,根据SAR图像中目标的强散射特性,自动定义终端节点,减少了人工交互量。实验表明,该方法充分利用均值漂移及图割的优点,能够在背景杂波的干扰下有效地提取SAR强散射目标。

关键词:均值漂移;图割;合成孔径雷达图像;强散射目标分割

中图分类号: TP751 **文献标志码:** A

Strong scattering objects segmentation based on graph cut and Mean Shift algorithm from SAR images

LYU Qian^{1,2,3*}, GAO Jun^{1,2,3}, GAO Xin^{1,2}

(1. Key Laboratory of Spatial Information Processing and Application System Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Aiming at the characteristics of Synthetic Aperture Radar (SAR) images and the problem of the standard graph cut segmentation algorithm's high computational complexity, a method of strong scattering objects segmentation based on graph cut and Mean Shift algorithm was proposed. Firstly, the image was pre-processed with the Mean Shift algorithm to produce over-segmentation areas. Then, a graph was built with nodes responding to over-segmentation areas, and then the results of SAR strong scattering targets segmentation were obtained by using graph cut algorithm. Compared with nodes responding to pixels in the standard graph cut algorithm, the number of nodes and edges in the graph were reduced by two orders of magnitude and the computational efficiency was significantly improved. Furthermore, according to the strong scattering characteristics of the targets in SAR images, the "object" terminal and the "background" terminal were defined automatically to reduce human interaction. The experiments show that the proposed method combines the advantages of Mean Shift and graph cut effectively, and it can effectively extract SAR strong scattering targets from the background clutter.

Key words: Mean Shift; graph cut; Synthetic Aperture Radar (SAR) image; strong scattering targets segmentation

0 引言

图像分割将一幅图像分成不同区域,使每一区域的内部具有一定的相似性,而不同的区域存在较大不同。图像分割是图像分析的关键技术,其目的在于找到一个用于提取目标特征信息的区域,为目标检测识别提供必要条件。在图像分割中,颜色及灰度特征起着相当重要的作用,也是目前应用比较广泛的一种特征。本文主要研究合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)图像中强散射目标的分割,因而主要利用图像的灰度特征以及空间信息进行目标的分割。

合成孔径雷达是一种主动式的微波成像传感器, SAR 图

像的灰度是地物目标后向散射回波强度的表现^[1]。针对 SAR 图像的特点,本文提出了一种两阶段的 SAR 图像强散射目标分割方法。利用均值漂移(Mean Shift)算法^[2-3]对 SAR 图像进行预处理,滤除背景杂波的同时,将像素级的图像提炼成区域级的图结构,实现图像的粗粒度化,以提高后续算法的速度和精度。由于标准图割算法的计算复杂度很高^[4],本文构建的图像分割流程中图割算法中图的顶点不再是单一的像素点,而是经过 Mean Shift 聚类后的过分割图像区域块。与标准图割算法相比,本算法在保证分割效果的同时,大大提高了分割速度。另外,本文根据 SAR 图像的特点自动标定图割算法中的终端顶点,减少了人工交互量。为了验证本文方法

收稿日期:2014-01-20;修回日期:2014-03-03。

作者简介:吕倩(1989-),女,河北衡水人,硕士研究生,主要研究方向:合成孔径雷达图像处理;高君(1990-),男,四川南充人,硕士研究生,主要研究方向:模式识别与图像理解;高鑫(1966-),男,辽宁锦州人,研究员,博士生导师,博士,主要研究方向:遥感图像处理、优化计算、并行处理。

的可行性,将其应用于含有强散射目标的 SAR 图像,取得了较好的分割效果。

1 Mean Shift 预处理

Mean Shift 方法是一种非参数的核密度梯度估计的方法。该方法在处理过程中不需要假设数据符合特定的分布,而是通过定位密度函数的模式点来确定密度的局部最大值点。由于 SAR 遥感数据场景信息存在不确定性,缺乏先验知识,因此采用 Mean Shift 方法进行 SAR 图像数据的预处理。

设 $\{x_i\}_{i=1,2,\dots,n}$ 为 d 维欧氏空间 \mathbf{R}^d 中任意 n 个点的有限集合。基于集合 $\{x_i\}_{i=1,2,\dots,n}$, 在点 x 处带宽为 h 的核函数 $K(x)$ 的核密度估计^[5]可以写成:

$$\hat{f}_{h,k}(x) = \frac{1}{nh^d} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x-x_i}{h}\right) = \frac{c_{k,d}}{nh^d} \sum_{i=1}^n k\left(\left\|\frac{x-x_i}{h}\right\|^2\right); x \in \mathbf{R}^d \quad (1)$$

式中: x 表示特征空间中的 d 维的特征矢量, n 表示整个特征空间包含的点数。 $k(x) (x \geq 0)$ 称为核函数 $K(x)$ 的剖面函数,且 $K(x) = c_{k,d} k(\|x\|^2)$ 。 $c_{k,d}$ 是使 $K(x)$ 积分为 1 的归一化非负常数。通常核函数可选为 Epanechinov 核(以下简称 E 核),其剖面函数的形式如式(2)所示。E 核是通过最优核密度估计值与实际密度值的均方误差得到的一种核函数形式^[2,5]。

$$k_E(x) = \begin{cases} 1-x, & 0 \leq x \leq 1 \\ 0, & x > 1 \end{cases} \quad (2)$$

密度函数的模式点(即局部密度最大点)位于密度梯度函数的零值处($\nabla f(x) = 0$),则寻找密度的模式点转化为寻找密度梯度函数的零值点。定义函数 $g(x) = -k'(x)$, 其中 $k'(\cdot)$ 表示 $k(\cdot)$ 的导数,则核密度梯度估计表示为:

$$\nabla \hat{f}_{h,k}(x) = \frac{2c_{k,d}}{nh^{d+2}} \sum_{i=1}^n (x_i - x) g\left(\left\|\frac{x-x_i}{h}\right\|^2\right) =$$

$$\frac{2c_{k,d}}{nh^{d+2}} \left[\sum_{i=1}^n g\left(\left\|\frac{x-x_i}{h}\right\|^2\right) \left[\frac{\sum_{i=1}^n x_i g\left(\left\|\frac{x-x_i}{h}\right\|^2\right)}{\sum_{i=1}^n g\left(\left\|\frac{x-x_i}{h}\right\|^2\right)} - x \right] \right] \quad (3)$$

其中 $\left[\frac{\sum_{i=1}^n x_i g\left(\left\|\frac{x-x_i}{h}\right\|^2\right)}{\sum_{i=1}^n g\left(\left\|\frac{x-x_i}{h}\right\|^2\right)} - x \right]$ 就是 Mean Shift 矢量:

$$M_{h,g}(x) = \frac{\sum_{i=1}^n x_i g\left(\left\|\frac{x-x_i}{h}\right\|^2\right)}{\sum_{i=1}^n g\left(\left\|\frac{x-x_i}{h}\right\|^2\right)} - x; x \in \mathbf{R}^d \quad (4)$$

Mean Shift 矢量运动方向就是一个自适应的梯度上升方向,其收敛点就是局部密度的极大值点,也就是要找的密度的模式点,文献[2]给出了其收敛性的严格证明。

考虑到 SAR 图像的灰度特性,算法采用“空-值”联合特征空间^{[6]48-49}。我们假设一幅大小为 $N \times M$ 的图像,其对应的各像素点的联合特征数据记为 $\{x_i\}_{i=1,2,\dots,n}$, 其中 n 为图像的总像素数,即 $n = MN$; x_i 为一个三维矢量(即 $d = 3$),其各

分量分别代表横坐标、纵坐标和灰度值。 $y_{i,k}$ 为以 x_i 为初始窗口中心的第 k 次迭代的窗口的中心位置矢量点,其中 $y_{i,1} = x_i$, 则可以得到图像分割中的 Mean Shift 算法的迭代过程为:

$$y_{i,k+1} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i g\left(\left\|\frac{y_{i,k}^c - x_i^c}{h_c}\right\|^2\right) g\left(\left\|\frac{y_{i,k}^L - x_i^L}{h_L}\right\|^2\right)}{\sum_{i=1}^n g\left(\left\|\frac{y_{i,k}^c - x_i^c}{h_c}\right\|^2\right) g\left(\left\|\frac{y_{i,k}^L - x_i^L}{h_L}\right\|^2\right)} = y_{i,k} + M_{h,g}(y_{i,k}) \quad (5)$$

其中: $y_{i,k}^c$ 和 x_i^c 分别表示 $y_{i,k}$ 和 x_i 中的灰度值投影(为标量), $y_{i,k}^L$ 和 x_i^L 分别表示 $y_{i,k}$ 和 x_i 中的坐标投影,是空间域中的二维矢量。 h_L 与 h_c 分别表示灰度值和坐标值的核带宽, h_L 对应像素点邻域的大小,决定着对于 x 点处密度梯度的估计在多大范围内进行, h_c 决定灰度值在多大范围内的模式点聚为一类。另外,为了防止计算时溢出,需要对像素点的灰度值和坐标进行归一化,均映射规范到 $[0,1]$ 内,接口参数按原空间设置。

记 $\{z_i\}_{i=1,2,\dots,n}$ 为联合特征空间中 x_i 对应的密度模式点; $\{C_p\}_{p=1,2,\dots,m}$ 为模式点聚类后的集合; L_i 表示聚类后像素点的灰度值; f_c 为两个区域的空间欧氏距离(以像素为单位)的阈值, f_m 为独立区域的像素个数的阈值。本文在对 SAR 图像进行预处理时,空间坐标域和灰度值域都采用 E 核,则 Mean Shift 图像预处理算法描述如下:

1) 对于图像上的每个像素点,根据式(5)计算下一次迭代窗口的位置,直到 Mean Shift 矢量 $M_{h,g}(x) < \varepsilon$ (ε 表示一个较小的数),得到其模式点 z_i ;

2) 把模式点集合 $\{z_i\}_{i=1,2,\dots,n}$ 中,坐标空间的欧氏距离小于 h_L 且灰度差小于 h_c 的数据点聚为一类,标记所有的特征类集为 $\{C_p\}_{p=1,2,\dots,m}$;

3) 对图像像素灰度值重新赋值: $L_i = \{p \mid z_i \in C_p\}_{i=1,2,\dots,n}$;

4) 区域融合。消除空间欧氏距离小于 f_c 且元素个数小于 f_m 的类。

Mean Shift 预处理可以滤除 SAR 图像背景杂波,经过 Mean Shift 预处理得到的图像由若干个区域组成。在本文分割流程的图割算法中,将每个区域映射为一个节点,与将每个像素点映射为一个节点相比,节点数量大幅减少,计算速度将得到改善。

2 基于图割理论的图像分割

基于图割理论的图像分割是一种非常流行的分割算法。此类方法把图像分割问题与图的最小割问题相关联。如何将图像分割问题转化为求图的最小割呢? 首先设计适当的能量函数,使得能量函数最小时对应图像的最优分割,如何将图像分割表示为能量函数最小化,可参考文献[7-8]; 然后,可以对设定的能量函数定义一个图,让图的割集的代价正好等于能量函数;最后,可以通过求图的最小割,实现能量函数的最小化,从而实现图像的最优分割。因此,基于图割的图像分割步骤主要包括三步^[9]: 1) 能量函数的设计; 2) 图的构造; 3) 利用最大流原理求解图的最小割。

2.1 能量函数的设计

图像分割可以看成像素标记问题。设一幅图像的像素总数为 N , 其全部像素的集合表示为 P , 整幅图像的标签表示为 $L = \{l_1, l_2, \dots, l_N\}$ 。由于本文为二值分割,即只对强散射目标

和背景进行分割,故 $l_i (i = 1, 2, \dots, N)$ 取值为 0 (背景) 或者 1 (目标)。这样向量 \mathbf{L} 就对应着图的一个分割,融合图像的边缘和区域特性,图像的能量可以表示为:

$$E(\mathbf{L}) = \alpha R(\mathbf{L}) + B(\mathbf{L}) \quad (6)$$

式中: $R(\mathbf{L})$ 为区域项, $B(\mathbf{L})$ 为边界项, α 为区域项和边界项之间的因子,决定它们对能量的影响大小。

区域项可以表示为 $R(\mathbf{L}) = \sum_{p \in P} R_p(l_p)$, 其中 $R_p(l_p)$ 表示像素点 p 分配标签 l_p 的惩罚。其中

$$\begin{cases} R_p(0) = -\ln P_r(l_p | l_p = 0) \\ R_p(1) = -\ln P_r(l_p | l_p = 1) \end{cases} \quad (7)$$

式中 $P_r(l_p | l_p = 0)$ 和 $P_r(l_p | l_p = 1)$ 分别表示像素点 p 属于背景和目标的概率。

边界项 $B(\mathbf{L}) = \sum_{p \in P, q \in P} B_{(p,q)} \delta(l_p, l_q)$, 式中

$$\begin{cases} \delta(l_p, l_q) = \begin{cases} 0, & l_p = l_q \\ 1, & l_p \neq l_q \end{cases} \\ B_{(p,q)} = \exp\left(-\frac{(M_p - M_q)^2}{2\sigma^2}\right) \end{cases} \quad (8)$$

其中: p 和 q 为相邻像素点, l_p 和 l_q 分别表示像素点 p 和 q 的标签, M_p 和 M_q 分别代表像素点 p 和 q 的模式特征值 (如灰度值), σ 为所有邻接边权重的平均值。边界项 $B(\mathbf{L})$ 主要体现分割 \mathbf{L} 的边界属性, $B_{(p,q)}$ 可以解析为像素点 p 和 q 之间差异性的惩罚。

在满足一定的前提条件下,能量函数最小化可用最小割来求解。这个前提条件是:1) 图像采用二值标记;2) 构造的图中所有边的权重是非负的。详细介绍请参考文献[10]。

2.2 图的构造

首先用无向图 $G = (V, E)$ 表示要分割的图像,其中 V 表示节点的集合, E 表示边的集合。标准图割算法中每个像素点对应图中的一个普通节点,另外,该图还包括两个终端节点:源点 S 和汇点 T (以下称为 $S-T$ 图), S 和 T 分别表示目标和背景,由背景和目标的先验知识给出。因此 $S-T$ 图中有两种节点和两种边:一种是两个相邻普通节点之间的边 n -links,反映边界平滑性;另一种是普通节点与 S 和 T 的连接边 t -links,其权值指示每个标记的偏好程度,反映区域性。权值设置如表 1。表中 p, q 为相邻普通节点, S, T 为终端节点, λ 为常数, $\langle \cdot, \cdot \rangle$ 表示两节点之间的边。

表 1 $S-T$ 图各边权值的设置

边 (edge)	边的权值 (weight)
n -links $\langle p, q \rangle$	$B_{(p,q)}$
t -links $\langle p, S \rangle$	$\lambda R_p(0)$
t -links $\langle p, T \rangle$	$\lambda R_p(1)$

2.3 利用最大流原理求图的最小割

由表 1 可以看出,边 n -links 的权值由边界平滑能量项 $B_{(p,q)}$ 确定, t -links 的权值由区域能量项 $R_p(l_p)$ 决定。这样,按上述方法构造图后,可以证明图的割集的代价等价于给定能量函数,故求能量函数的最小值等价于求图的最小割^[10]。而图的最小割和图的最大流是等价的^[11],利用最大流原理求能量函数的最小值可以在较低多项式时间内完成^[12],但由于图像的像素是海量的,算法的计算量和存储空间仍然过大。若由图

像映射成的图的节点数量减少,其计算量将会大幅降低。

3 基于图割及均值漂移算法的图像分割

本文针对 SAR 图像的特点,提出了一种两阶段的图像分割方法,将图割理论与 Mean Shift 算法相结合。第一阶段采用 Mean Shift 算法进行预处理,滤除背景杂波,并将 SAR 图像表示为一定的过分割区域。第二阶段采用图割算法,将预处理得到的每一个区域作为节点构造图,相对于标准图割算法的以单个像素点为节点,节点数量大幅减少,由于后续图割分割算法的时间和计算空间由图的顶点和边的数目决定,因此处理速度得到改善。

设定 $S-T$ 图的权值时,我们首先需要确定一个合适的特征空间来定义两个相邻区域的相似性度量。考虑到 SAR 图像的特点,取每个区域所有像素的平均灰度值作为此区域的特征值。

至此,图像分割问题由像素标记问题转化为过分割区域的标记问题。假设预处理后的图像的区域数目为 p ,所有区域的集合表示为 $P = \{\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_p\}$,其中 $\sigma_i (i = 1, 2, \dots, p)$ 表示第 i 个区域。再设整幅图像的区域标签为 $\mathbf{L} = \{l_1, l_2, \dots, l_p\}$ 。其能量函数可以由式(6)表示。

图 1 给出了本文图割算法与标准图割算法的流程比较框图,其中虚线方框框出的部分是两种算法的核心差异。

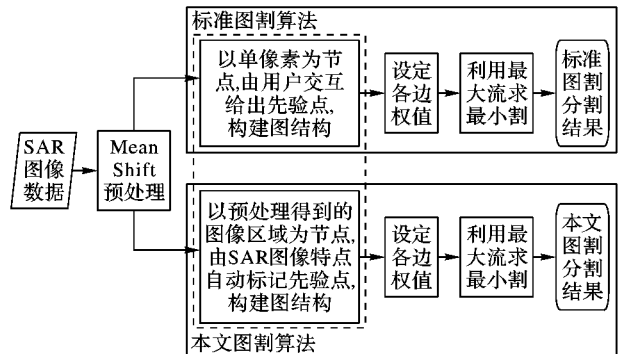


图 1 本文图割算法与标准图割算法的流程比较框图

本文的详细算法流程可以描述如下:

阶段一 Mean Shift 预处理。对输入 SAR 图像进行 Mean Shift 预处理,得到包含过分割区域的图像结构。由于 SAR 图像的数据量较大,且大部分为背景区,仅有少量的目标像素点。为提高处理效率,本文采用快速 Mean Shift 算法^{[6]49-50},在寻找模式点过程中,若窗口覆盖的像素点的灰度值与窗口中心点灰度值的差小于灰度带宽,则将这些像素打上标记,不再重复计算这些点的 Mean Shift 矢量,将这些像素点都赋以此窗口收敛到的模式点的灰度值。

阶段二 利用图割算法进行图像分割。该阶段将预处理得到的图像看作一个区域邻接图,图像中的每个区域看作图中的一个节点,根据设定的能量函数设置权值。最后采用最大流算法得到最终的目标分割结果。

第一步 能量函数的设计。对于能量函数 $E(\mathbf{L}) = \alpha R(\mathbf{L}) + B(\mathbf{L})$,其区域项和边界项设置如下:

1) 区域项的设置。 $R(\mathbf{L}) = \sum_{p \in P} R_p(l_p)$, $R_p(l_p)$ 的计算方法参照式(7)。由于 SAR 图像目标具有强散射特性,因此本文算法中节点 p 属于目标和背景概率的计算方法为:

$$\begin{cases} P_r(l_p | l_p = 0) = \frac{d_p^F}{d_p^B + d_p^F + 1} \\ P_r(l_p | l_p = 1) = \frac{d_p^B}{d_p^B + d_p^F + 1} \end{cases} \quad (9)$$

式中: d_p^F 为顶点 p 与强散射目标点模式特征值的差; d_p^B 为顶点 p 与背景点模式特征值的差, 即 $d_p^F = 255 - M_p$, $d_p^B = M_p - 0$ 。

2) 边界项的设置。具体计算方法参照式(8)。本文取对应区域的平均灰度值作为其特征值。

第二步 图的构造。以 Mean Shift 预处理得到的区域为节点构造图, 自动标记目标和背景的终端节点, 并根据设定的能量函数设置各边权值。

1) 构建图。以均值漂移预处理得到的图像区域为节点建立区域邻接图。两区域是否相邻的判别准则描述如下: 区域中若存在像素与另一区域的某像素满足 4-邻域关系, 则这两个区域对应的顶点是邻接关系, 以此原则构造区域邻接图。

2) 终端节点的自动标记。考虑到 SAR 图像目标具有强散射性的特点, 本文算法中将像素灰度值最接近 255 的强散射区域自动标记为目标终端节点 (S 点), 将像素值最接近 0 的暗性区域自动标记为背景终端节点 (T 点), 减少人工的交互量, 实现 SAR 图像强散射目标的自动分割。

3) 权值设置。按照表 1 设置区域邻接图各边的权值, 详细的参数设置规则参考文献[11] (本文中 $\lambda = 10$)。

第三步 运用最大流算法求解 S - T 图的最小割。对上述构造的 S - T 图运用最大流算法, 求出图的最小割, 从而求出能量函数取最小值时的分割结果, 即完成对 SAR 图像前景目标和背景的分割。

4 实验结果与分析

为了验证算法的可行性, 本文选取 Sandia 实验室 (Sandia National Laboratory) 的 MiniSAR 图像数据^[13], 距离分辨率和方位分辨率均为 0.1 m, 其中包含直升机目标的图像大小为 388×202 (以下简称直升机图像), 包含运输机目标的图像大小为 376×424 (以下简称运输机图像)。实验是在 i5-2400CPU 3.10 GHz, 四核 CPU 计算机, 2 GB 内存, Windows XP 操作系统上, 采用 VC 9.0 编码完成。图 2、图 3 为实验结果, 从(a)~(e)依次为原始图像、均值漂移预处理的结果、对预处理结果的边界标注、以单像素为图顶点的图割算法的分割结果、以及本文算法的分割结果, 以下图像均以原图像的 60% 显示。

实验从三个角度分析了算法的性能:

1) 分割效果方面。

a) 图 2(b)、3(b) 分别是对图 2(a)、3(a) 所示的原图像进行 Mean Shift 预处理的结果, 参数设置如下 $h_L = 6$, $h_C = 10$, $f_C = 10$, $f_M = 10$ 。由结果可以看出 Mean Shift 预处理能够有效地滤除 SAR 图像中的背景杂波信息, 而强散射目标的结构信息基本没有损失。

b) 图 2(c)、图 3(c) 分别是对图 2(b)、图 3(b) 的区域边界标注, 可以看出, 经过 Mean Shift 预处理后, 图像存在很多过分分割的小区域, 这些小区间会对有效目标的检测造成干扰。本文在后续算法中将这此小区间作为节点构成区域邻接图, 作为后续图割算法的输入。

c) 图 2(d)、图 3(d) 分别是对图 2(b)、图 3(b) 运用标准

图割的分割结果, 图 2(e)、图 3(e) 分别是对图 2(b)、图 3(b) 运用本文图割的分割结果。由结果可以看出, 通过后续的图割算法, 能比较清晰地分离出强散射目标, 结果目标的结构信息得到了较好的保留。

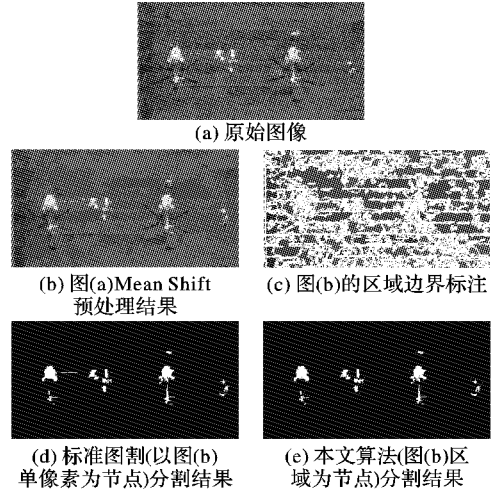


图 2 直升机图像算法结果对比

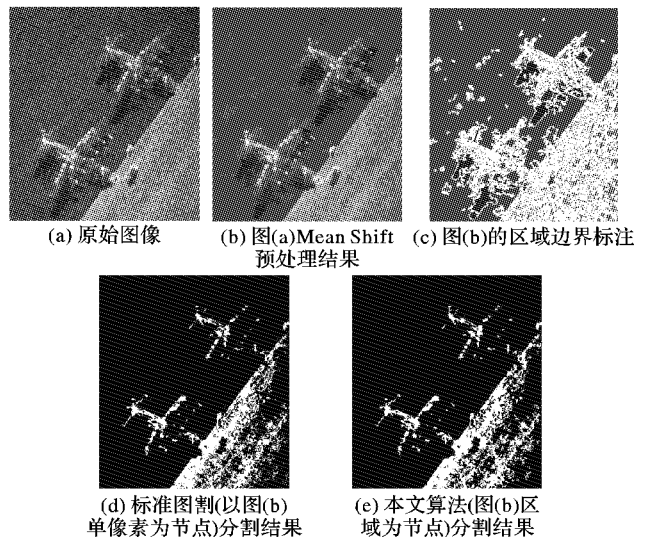


图 3 运输机图像算法结果对比

2) 计算效率方面。本文算法中 Mean Shift 预处理的时间与图像的大小和核带宽的设置有关系。对于直升机图像, Mean Shift 处理时间为 200 ms 左右; 对于运输机图像, Mean Shift 处理时间为 600 ms 左右。本文图割算法与标准图割算法的效率对比如表 2。从实验数据可以看出, 以区域为节点创建图结构, 使其节点数和边数大幅减少, 提高了算法的效率。

表 2 本文图割算法与标准图割算法性能比较

图像	算法	节点数	边数	耗时/ms
直升机	标准图割算法	78 376	312 914	74.33
	本文图割算法	1 122	4 048	4.82
运输机	标准图割算法	159 424	636 896	149.89
	本文图割算法	1 961	5 506	7.57

3) 另外, 本文充分考虑到 SAR 图像中目标的强散射特性, 自动定义 S - T 图的终端节点。由实验结果可以看出, 算法在保证分割效果的同时减少了人工的交互量。

综上, 本文算法可以有效地对 SAR 图像进行分割, 下一

步计划利用目标的阴影、结构等信息构建辨识算子,得到有效目标的最终切片图像。

5 结语

本文针对包含强散射目标的 SAR 图像,首先采用快速均值漂移算法对图像进行预处理,得到以过分割区域为组成元素的图像。以过分割区域为节点建立区域邻接图,与标准图割分割算法相比,计算效率大幅提高。利用 SAR 图像特点自动定义图的终端节点,减少人工交互量。最后采用图割理论进行分割,实验结果表明,本文方法能够有效地实现对 SAR 图像中强散射目标的分割。另外,对于 SAR 图像的分割,如何利用有效目标的阴影、结构等特征构建辨识算子得到整体目标的最终切片,是本文继续研究的方向。

参考文献:

- [1] YIN K. Study on SAR image pressing and ground target recognition technology[D]. Xi'an: Xidian University, 2011. (尹奎英. SAR 图像处理机地面目标识别技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011.)
- [2] COMANICIU D, MEER P. Mean Shift: a robust approach toward feature space analysis[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002, 24(5): 603-619.
- [3] CHENG Y. Mean Shift, mode seeking, and clustering[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1995, 17(8): 790-799.
- [4] LI Y, SUN J, TANG C, et al. Lazy snapping[J]. ACM Transactions on Graphics, 2004, 23(3): 303-308.
- [5] COMANICIU D, MEER P. Mean Shift analysis and application [C]// Proceedings of the 7th IEEE International Conference on Computer Vision. Piscataway: IEEE, 1999: 1197-1203.
- [6] PAN Z. Research on detection and automatic target recognition in SAR images[D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences Institute of Electronics, 2008: 48-51. (潘卓. SAR 目标检测与自动识别相关技术研究[D]. 北京: 中国科学院电子学研究所, 2008: 48-51.)
- [7] GEMANS S, GEMANS D. Stochastic relaxation, Gibbs distributions and the Bayesian restoration of images[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1984, 6(6): 721-741.
- [8] BESAG J. Spatial interaction and the statistical analysis of lattice system[J]. Journal of the Royal Statistical Society, Series B: Methodological, 1974, 36(2): 192-236.
- [9] LIU S, YIN F. The basic principle and its new advances of image segmentation methods based on graph cuts[J]. Acta Automatica Sinica, 2012, 38(6): 911-922. (刘松涛, 殷福亮. 基于图割的图像分割方法及其新进展[J]. 自动化学报, 2012, 38(6): 911-922.)
- [10] KOLMOGOROV V, ZABIN R. What energy functions can be minimized via graph cuts?[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2004, 26(2): 147-159.
- [11] BOYKOV Y, JOLLY M. Interactive graph cuts for optimal boundary and region segmentation of objects in N-D images[C]// Proceedings of the 8th IEEE International Conference on Computer Vision. Piscataway: IEEE, 2001: 105-112.
- [12] ZHENG J, CHEN Z. Connectivity constrained graph-cut for fast interactive image segmentation[J]. Journal of Computer-Aided Design and Computer Graphics, 2011, 23(3): 399-401. (郑加明, 陈昭炯. 带连通性约束的快速交互 Graph-Cut 算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2011, 23(3): 399-401.)
- [13] Sandia National Laboratory. A portfolio of fine resolution Ka-band SAR images: part I[EB/OL]. [2013-06-20]. <http://www.sandia.gov/radar/minisar.html>.
- [5] WANG J, LIN L. Improved median filter using minmax algorithm for image processing[J]. Electronics Letters, 1997, 33(16): 1362-1363.
- [6] SUN S, WANG S. Algorithm of improved extremum and median value filter[J]. Computer Science, 2009, 36(6): 165-166. (孙树亮, 王守觉. 一种基于改进的极值中值滤波算法[J]. 计算机科学, 2009, 36(6): 165-166.)
- [7] LI S, ZHANG Y, SUN G, et al. Improved filtering algorithm for removing salt and pepper noise[J]. Computer Engineering, 2008, 34(10): 171-172. (李双全, 张宇, 孙广明, 等. 消除椒盐噪声的改进滤波算法[J]. 计算机工程, 2008, 34(10): 171-172.)
- [8] WANG H, LI Y, ZHANG K. An improved image filtering method for salt and pepper noise[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2008, 19(1): 107-110. (王红梅, 李言俊, 张科. 一种改进的图像中脉冲噪声滤波方法[J]. 光电子 · 激光, 2008, 19(1): 107-110.)
- [9] ZENG X, HUANG Z, ZHOU J, et al. An adaptive extremum and median filtering algorithm for salt and pepper noise[J]. Computer and Modernization, 2012(11): 70-73. (曾宪佑, 黄佐华, 周进朝, 等. 一种去除椒盐噪声的自适应极值中值滤波算法[J]. 计算机与现代化, 2012(11): 70-73.)
- [10] FENG H, HE Y, LIU C. Adaptive median filter based on neighborhood correlation [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2013, 32(3): 547-550. (冯焕飞, 何友全, 刘冲. 基于邻域相关的自适应中值滤波算法[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2013, 32(3): 547-550.)
- [11] DONG Y, XU S. A new directional weighted median filter for removal of random-valued impulse noise [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2007, 14(3): 193-196.
- [12] ZHANG X, LIU Y, GAO X. Research on auto-adapted voting fast median filtering algorithm [J]. Computer Engineering and Applications, 2010, 46(6): 148-150. (张欣, 刘英, 高秀艳. 自适应投票快速中值滤波算法研究[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(6): 148-150.)
- [13] ZHANG H, CAO Z. Image median filter method based on local mean and variance [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2013, 44(2): 381-384. (张航, 曹瞻. 基于局部均值与方差的图像中值滤波方法[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2013, 44(2): 381-384.)
- [14] SONG Y, LI M, SUN L. Image salt and pepper noise self-adaptive suppression algorithm based on similarity function [J]. Acta Automatica Sinica, 2007, 33(5): 474-479. (宋宇, 李满天, 孙立宁. 基于相似度函数的图像椒盐噪声自适应滤除算法[J]. 自动化学报, 2007, 33(5): 474-479.)
- [15] TOPRAK A, GULER I. Suppression of impulse noise in medical images with the use of fuzzy adaptive median filter[J]. Journal of Medical Systems, 2006, 30(6): 465-471.

(上接第 2013 页)