

高分辨率 SAR 图像道路提取综述

周岳勇¹ 程江华¹ 刘通¹ 王洋¹ 陈明辉²

1 国防科技大学电子科学学院 长沙 410073

2 火箭军驻长沙地区军事代表室 长沙 410073

(zhouyueyong17@nudt.edu.cn)



摘要 在遥感领域,SAR(Synthetic Aperture Radar,SAR)图像道路提取具有很高的研究意义和应用价值,特别是随着 SAR 成像技术的不断发展、SAR 图像分辨率的逐步提高,该课题的研究更加备受关注。然而,从目前的情况看,高分辨率 SAR 图像的道路提取研究还不够完善,许多低分辨率 SAR 图像的道路提取方法在处理高分辨图像时并不适用,因此文中归纳总结了高分辨率 SAR 图像道路提取的一般流程,列举了一些具体的方法,同时有针对性地分析其优缺点和适用范围,指出该研究课题目前存在的主要问题,并展望其发展趋势。

关键词:合成孔径雷达图像;高分辨率;SAR 图像边缘检测;SAR 图像分割;道路提取

中图法分类号 TP751

Review of Road Extraction for High-resolution SAR Images

ZHOU Yue-yong¹, CHENG Jiang-hua¹, LIU Tong¹, WANG Yang¹ and CHEN Ming-hui²

1 College of Electronics Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China

2 Rocket Force in Changsha Area Military Representative Department, Changsha 410073, China

Abstract In the field of remote sensing, road extraction for Synthetic Aperture Radar (SAR) images has high research significance and application values. Especially with the continuous development of SAR imaging technology and the gradual improvement of SAR image resolution, the researches on this subject attract much attention. However, from the current situation, the researches on road extraction for high-resolution SAR images are not systematic enough. Many road extraction methods for low-resolution SAR images are not suitable for high-resolution. Therefore, the general flow of road extraction for high-resolution SAR images was summarized, some specific methods were enumerated. At the same time, the advantages and disadvantages and application scopes were analyzed in a targeted manner, the main problems existing in the research topic were pointed out, and the development trends were forecasted.

Keywords SAR images, High-resolution, SAR image edge detection, SAR image segmentation, Road extraction

1 引言

作为遥感领域中重要的地物目标,道路的提取是一项非常热门的研究课题,应用十分广泛。自合成孔径雷达(SAR)^[1]问世以来,其全天时、全天候的工作特点弥补了光学图像易受天气、光照影响的不足,在遥感领域发挥了不可替代的作用。

过去几十年里,由于技术局限,SAR 图像空间分辨率较低,分辨单元基本都在 10 m 以上,大多研究也只是针对低分辨率 SAR 图像开展;随着 SAR 技术的不断发展,空间分辨率越来越高,现在的分辨单元基本都能达到 1~5 m,甚至 1 m 以内^[2]。空间分辨率的提高使得 SAR 图像在细节表现上有明显的变化,以道路为例,以往低分辨率 SAR 图像中道路大多

呈现线状,如图 1 所示;高分辨率 SAR 图像中道路则不再呈现线状特征,而是由亮的双边缘包裹的暗色狭长区域,如图 2 所示。



图 1 低分辨率 SAR 图像例图

Fig. 1 Low-resolution SAR image example

收稿日期:2019-01-05 返修日期:2019-05-16 本文已加入开放科学计划(OSID),请扫描上方二维码获取补充信息。

基金项目:湖南省自然科学基金(2017JJ2337)

This work was supported by Hunan Provincial Natural Science Fund (2017JJ2337).

通信作者:程江华(hankson@126.com)



图2 高分辨率 SAR 图像例图

Fig.2 High-resolution SAR image example

分辨率的提高使得 SAR 图像的细节更加清晰,但同时也将各种干扰和噪声放大,给 SAR 图像的解译带来了困难^[3]。

(1)分辨率的提高虽然使得细节更加清晰,但噪声对于图像的影响也更加严重。这些固有噪声影响程度的提升使得道路的低灰度特征变得不明显,道路边缘模糊化。

(2)低分辨率图像中道路两侧的树木、护栏等建筑物的遮

挡对道路虽有影响但并不明显;而高分辨率图像中这些地物对道路的影响十分明显,使道路的边缘特征表现不佳,出现单边边缘或没有边缘的现象。

(3)低分辨率图像中道路上的车辆、行人、天桥等无法呈现出来;而高分辨率图像中车辆、天桥等金属物体的强反射会对道路区域产生亮白色干扰,从而导致道路灰度不均匀、不连续,甚至出现断裂。

这些影响^[4-5]使得在提取高分辨率 SAR 图像时不能完全按照低分辨率 SAR 图像的方法和步骤,一些适用于低分辨率图像的方法在高分辨率图像上不一定适用,高分辨率 SAR 图像的道路提取过程更加复杂,因此研究高分辨率 SAR 图像非常具有现实意义。

2 研究现状

高分辨率 SAR 图像的道路提取依托于高空间分辨率的星载或机载 SAR 雷达,随着微波成像理论和电子信息技术的快速发展,SAR 雷达的空间分辨率也在不断提升^[6-9]。表 1 列出了主要国家和地区正在服役的一些 SAR 卫星。

表 1 近年来主要国家和地区的 SAR 卫星

Table 1 SAR satellites in major countries and regions in recent years

国家和地区	SAR 卫星	发射时间	空间分辨率/m
美国	Lacrosse 5	2005 年 4 月	SpotLight=0.3;StripMap=1;ScanSAR=3
美国	FIA(1,2,3,4)	2010 年 9 月-2016 年 2 月	SpotLight 为 0.3 或 0.1
日本	ALOS-2	2014 年 5 月	SpotLight=1×3;StripMap 为 3~10;ScanSAR 为 60~100
日本	IGS 9A(雷达预备机)	2015 年 2 月	SpotLight≤1
日本	雷达 5 号机	2017 年 3 月	SpotLight≤0.5
日本	ASNARO-2	2018 年 1 月	SpotLight=1;StripMap=2;ScanSAR=16
日本	雷达 6 号机	2018 年 6 月	SpotLight≤0.5
ESA	Sentinel-1A	2014 年 4 月	SpotLight=5×20
ESA	Sentinel-1B	2016 年 4 月	SpotLight=5;StripMap=5;ScanSAR=40
德国	TerraSAR-X	2007 年 6 月	SpotLight 为 1 或 0.5;StripMap=3;ScanSAR 为 18 或 38
德国	TanDEM-X	2010 年 6 月	1~15
德国	TanDEM-L	2010 年 6 月	1~15
德国	TerraSAR-NG	预计 2019 年	SpotLight=0.25
加拿大	RadarSAT-2	2007 年 3 月	3~100
中国	尖兵 5 号	2006 年 4 月	SpotLight=5
中国	尖兵 7 号	2007 年 11 月	SpotLight≤5
中国	尖兵 8 号	2008 年 12 月	SpotLight=0.5
中国	HJ 1-C	2012 年 11 月	5~20
中国	GF-3	2016 年 8 月	1~500
中国	深圳 1 号	预计 2019 年	SpotLight=0.5

星载 SAR 的空间分辨率在近几年有了快速的提升,最高达到了 1 m 以内,且未来星载 SAR 的空间分辨率将达到 0.1 m。相比于星载 SAR,机载 SAR 由于距离近、分辨率更高,其空间分辨率基本在 0.1 m 左右,如美国的“全球鹰”的 MP-RTIP 系统、“捕食者”系列的 Lynx 及 LynxII 系统、中国的 D3000 系列等^[10]。

自 1990 年 Samadani 等提出先局部边缘检测后全局道路连接的方法^[4]后,人们对于 SAR 图像道路提取的研究基本以此为基础,并不断提出了一些新方法及其改进算法,重点在精度、速度以及普适性方面进行了创新。按照道路全局连接的方式可以将提取方法分为自动提取和半自动提取两大类^[4-5],其大致流程如图 3 所示。

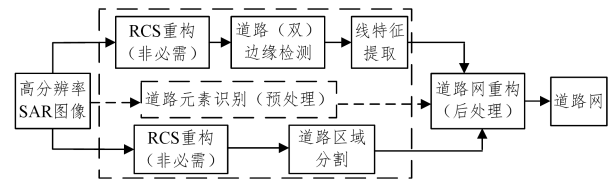


图 3 高分辨率 SAR 图像道路提取的一般流程

Fig.3 General flow of road extraction for high-resolution SAR images

从图中可以看出,道路网的提取可分为两步:道路元素的识别以及道路网的重构^[11],具体工作是将道路当作狭长区域来处理,结合道路的双平行线(包括平行直线、平行曲线)特性、区域形状特征、方向特征、纹理特征、灰度特征等提出边缘

检测、特征融合、区域分割等一系列方法。

3 相关算法

3.1 SAR 图像 RCS 重构

我们通常所说的 SAR 图像雷达散射截面积 (Radar Cross Section, RCS) 重构指的是成像后的滤波过程,其目的是在消除图像中相干斑噪声的同时尽可能地保留原有图像中的边缘、纹理等结构信息,但 RCS 重构在一定程度上会使边缘厚度和边缘定位精度降低,导致后续的图像处理产生偏差,因此有时可以不进行 RCS 重构而直接进行下一步的图像处理。由于 SAR 图像的相干斑噪声属于乘性噪声,因此光学图像中均值滤波、中值滤波等传统滤波方式不再适用,需要采用其他的滤波方式,主要有基于统计特性的局部自适应空域滤波、变换域滤波、偏微分方程滤波、非局部均值滤波、基于深度学习的滤波等。

3.1.1 基于统计特性的局部自适应空域滤波

这类算法是建立在精确的 SAR 图像场景模型分布和噪声模型分布的基础上的,主要考虑了噪声的统计特性,利用局部统计信息对去除相干斑噪声后的数据进行估计,典型算法有 Lee 滤波、Kuan 滤波、Frost 滤波、最大后验概率 (Maximum A Posteriori Probability, MAP) 滤波,以及各自对应的增强滤波,其最大不足在于仅仅考虑了局部邻域特征而忽略了图像结构信息。目前在运用局部自适应滤波器时通常将其与非自适应传统滤波器相结合,这样在滤波的同时能够较好地保留边缘等细节。如文献[12]指出:增强 Lee 滤波器在均匀区域和异质区域中都能够很好地降低散斑噪声,但不能在抑制 SAR 图像噪声的同时有效地保留图像边缘和细节,而中值滤波器在降低脉冲噪声方面表现良好,因此将两者相结合可使其在保留边缘和细节方面具有良好的性能。

3.1.2 变换域滤波

(1) 小波 (Wavelet) 变换滤波

小波变换^[13]是一种时间频率的局部变换,与傅里叶变换相比能更“稀疏”地表示一维分段光滑或者有界变差 (Bounded Variation, BV) 函数,可以从不同的分辨空间描述图像的局部特征,使得图像信息和斑点噪声在小波变换域中具有不同的奇异性,通俗地讲就是斑点噪声散布在高频分量各层次的小系数中,而图像的细节信息集中在高频分量的少数大系数中,从而很容易地区分图像信息与斑点噪声。其滤波步骤大致是:首先将图像进行小波变换,从而得到小波系数;然后对小波系数进行噪声阈值估计,以阈值为界,对高于阈值的系数不做处理,将低于阈值的系数噪声置零;最后用处理后的小波系数进行小波反变换,从而得到原图像的去斑结果。小波变换滤波的主要优点是损失的信息相对较少,抑制噪声的效果和保留的边缘信息都较好。如文献[14]将散斑作为对数空间中的加性高斯模型,提出了一种基于小波的去斑方法,它使边缘分量在小波域中被隔离,有效地保留了 SAR 图像的锐利特征和细节。

(2) 多尺度几何分析 (多尺度多方向变换或超小波变换) 滤波

由于一维小波张成的可分离小波通常只具有有限的方向,不能“最优”地表示含线或面奇异的高维函数,即在一维时

所具有的优异特性并不能简单地推广到高维 (即便是二维小波,也只能提取图像边缘上的不连续性,却不能有效表示边缘的平滑性和方向信息),而图像中的更多信息 (边缘、纹理等) 一般存在于高维空间。因此,学者在小波变换的基础上提出了多尺度几何分析^[15]的方法,主要包括脊波 (Ridgelet) 变换、曲波 (Curvelet) 变换、轮廓波 (Contourlet) 变换、条带波 (Bandlet) 变换、楔波 (Wedgelet) 变换、小线 (Beamlet) 变换等。

3.1.3 偏微分方程滤波

偏微分方程 (Partial Differential Equation, PDE) 滤波的基本思想是把图像看作连续的函数,令图像按照特定的 PDE 模型进行变化,滤波结果即 PDE 的解。该方法具有很强的局部自适应性、高度的灵活性和变通性。其典型算法是 Perona-Malik (P-M) 扩散^[16],它将图像看作热量场,每个像素看作热流,根据当前像素的梯度信息设计合适的扩散函数,并确定是否向周围扩散。该方法具有各向异性扩散能力,能在去除噪声的同时保留图像细节特征。设图像为 $I(x, y, t)$,其 P-M 扩散方程为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial I}{\partial t} &= \text{div}(f(\|\nabla I\|)) \cdot \nabla I \\ &= \nabla f \cdot \nabla I + f(\|\nabla I\|) \cdot \Delta I \end{aligned} \quad (1)$$

其中, ∇ 是梯度算子; Δ 是 Laplacian 算子; div 是散度;

$f(\|\nabla I\|) = \frac{1}{e^{\left(\frac{\|\nabla I\|}{k}\right)^2}}$ 或 $\frac{1}{1 + \left(\frac{\|\nabla I\|}{k}\right)^2}$ 是扩散函数 (边缘

阈值 $k > 0$, 用来判断边缘区域和平坦区域), 用于控制平滑的力度。可以看出: 当 $\|\nabla I\| \ll k$ 时, 扩散函数 $f(\|\nabla I\|) \rightarrow 1$, 滤去噪声; 当 $\|\nabla I\| \gg k$ 时, 扩散函数 $f(\|\nabla I\|) \rightarrow 0$, 保持边缘。P-M 扩散滤波算法对于高斯噪声具有很好的滤波效果, 但对于椒盐噪声 (即脉冲噪声) 的滤波效果并不理想, 无法将噪声与边缘区分开来, 需要对扩散函数进行改进, 通常的做法有将传统 P-M 算子中的固定边缘阈值 k 改为随梯度模 $\|\nabla I\|$ 变化的自适应阈值, 而文献[17]提出了一种将均值-中值混合滤波与散斑减少各向异性扩散 (Speckle Reducing Anisotropic Diffusion, SRAD) 滤波相结合的方法, 其几乎能够在所有情况下实现理想的滤波效果。

3.1.4 非局域均值滤波

非局域均值滤波由 Baudes 等^[18]提出, 其认为采用图像的区域或块相似性代替传统的单像素点相似性来构造权重, 能更好地保护边缘和纹理等特征。文献[19]提出了一种基于局部线性最小均方差小波收缩的非局域 SAR 图像去噪算法。文献[20-21]认为非局域均值方法考虑了成像场景的物理特征, 是一种基于电磁散射机制的新的去斑技术, 能提供最有效的去斑性能。文献[22]首先针对 SAR 图像中的传统斑块相似性测量定义了一个新变量, 以获得更精确的斑块相似性测量结果, 然后修改用于计算比率距离的概率密度函数, 以使像素之间的片相似性更准确, 结果表明该方法的视觉质量和评价指标均优于传统方法。

3.1.5 基于深度学习的滤波

深度学习^[23]是近年来发展最迅猛、应用最广泛的一项技术, 其在处理图像时如人的眼睛一般。对于人眼来说, SAR 图像处理并不比光学图像难, SAR 图像中的相干斑噪声对于人眼而言可以被很好地过滤掉。文献[24]就是一种基于深度

学习的方法,称为图像去斑卷积神经网络(Image Despeckle-Convolutional Neural Network, ID-CNN),其核心思想是将原始图像与去斑后的图像一一对应形成映射,通过网络学习从输入 SAR 图像到去斑后图像的映射。该文献采用了分离残差的方法,通过网络迫使卷积层在训练过程中学习估计到的散斑分量,通过简单地从输入图像中分离估计到的散斑来获得去斑点图像。但是,由于深度学习需要大量的训练样本,而在实际情况往往缺少足够的样本,导致仅应用 CNN 去除噪声会产生欠拟合的问题,因此文献[25]采用静态小波变换(Static Wavelet Transform, SWT)作为预处理,而后利用所得到的子带图像,通过训练 CNN 将相似子带图像构造成原始图像。

除了上述方法外,还有双阈值滤波[26]、方向性滤波[27]、数学形态学[28]、稀疏表示[29]等方法。由于各种相干斑抑制算法都有优缺点,对不同的场景应根据实际需要进行选择,通常需要在去除斑点噪声和保持纹理、边缘等细节信息之间进行折中。

3.2 SAR 图像边缘检测

由于相干斑噪声会模糊相邻区域之间的对比度,隐藏 SAR 图像的纹理,并降低空间分辨率,因此诸如 Canny 算子等用于光学图像边缘检测的方法不适用于 SAR 图像边缘检测,并且 SAR 图像经过边缘检测之后,还需要通过相位编组、Hough 变换、Radon 变换等方法提取线特征,才能进行下一步完整的道路提取。

边缘检测最常见的方法是单边边缘检测和多边缘检测。单边边缘检测的典型算法是均值比(Ratio Of Average, ROA)检测和广义似然比(Generalized Likelihood Ratio, GLR)检测[30],均属于恒虚警率(Constant False Alarm Rate, CFAR)检测。文献[31]认为 ROA 检测方法对边缘定位不够准确,可以融合 Canny 算子和 ROA 算子提取边缘点,并对图像边缘的信息进行补偿,然后使用平行线滤波滤除相关地物对道路检测的影响,最后利用 Hough 变换提取线特征。由于单边边缘检测时默认窗口内存在单条边缘,而如果窗口选得太小,会导致虚警的增加,为了得到可靠的结果,往往采用较大的窗口,而大窗口很可能包含多条边缘,这就与单条边缘的假设相矛盾。为此, Fjortoft 等[32-33]设计了多边缘检测的方法,其中最典型的是指数加权均值比(Ratio of Exponentially Weighted Averages, ROEWA)算法,其边缘定位准确、虚假边缘少、抗断裂性好,非常适用于检测 SAR 图像中的线性目标的边缘,不足之处在于只能得到边缘强度,无法正确确定边缘方向。文献[34-35]指出 Gabor 滤波器和 Radon 变换具有优秀的方向选择性,将其与 ROEWA 算法相结合可以提高边缘检测的方向性。文献[36]指出在 ROEWA 检测之后可以通过提取平行线基元来提高检测精度。

除这些较常见的算法外,还有多分辨率检测(也称多窗口或多尺度检测)、信息融合检测、特征变换检测等。

3.2.1 多分辨率检测

为了解决单边边缘检测中存在的问题,除了采用多边缘检测的方法外,还可以采用多分辨率检测方法,其本质是通过采用不同尺度的窗口来弱化边缘假设的限制。小尺度窗口的优点是边缘比较精细,缺点是易受噪声干扰,会产生虚假检测;

而大尺度窗口受噪声干扰小,可信度较高,但易遗漏目标,使边缘出现断裂。将不同尺度的检测结果相结合,能够提高边缘检测的完整性,降低误检率。常见的方法有:

(1)多分辨率 GLR[37]。根据给定的虚警率,采用不同尺寸的窗口和相应的阈值检测边缘,用大窗口检测出大区域的弱边缘,然后用小窗口检测出小区域的强边缘,融合不同尺度的检测结果以实现边缘检测。

(2)基于小波分析的方法。小波分析天然地具有多尺度特性,本质上就是一种多分辨率的方法,可以实现边缘的多分辨率检测,通过结合不同尺度下边缘图像的结果,最终可将真正的边缘检测出来,如文献[38]通过采用基于小波变换的算法来提取道路网的线性特征。

3.2.2 信息融合检测

道路具有众多的特征,如双平行特征、灰度特征等,这些特征对于道路的提取都起着十分重要的作用,在检测过程中可以将这些特征融合起来综合考虑,以提高检测精度。如文献[5]首先获取最小灰度图、最小灰度的方向图以及相应的对比度特征图,然后分别计算灰度特征、角度特征、对比度特征的二值图,再将这 3 种二值图进行“与”融合,最后对形成的融合图进行后续处理,从而检测出道路边缘。又如文献[39]的方法首先采用模糊理论的粗糙集方法,将 SAR 图像像素分为不同的类别(包括强后向散射区域、弱后向散射区域和边缘区域),然后根据 3 个不同图像区域的回波成像特征构建散斑抑制滤波器;由于 SAR 图像边缘通常看上去是不确定的且弱对比区域可能存在一些边缘细节,因此利用隶属度和模糊熵函数将灰度图像映射到模糊域进行非线性模糊增强;与非边缘区域不同,边缘区域的灰度强度分布是有序、方向性和结构化的,因此将这 3 种基于模糊熵的特征信息度量提取出来用于图像模糊空间中的多重信息融合;最后,通过非最大值抑制方法减小边缘区域,利用相关图像区域的统计特征来自动预测最终的边缘像素。

3.2.3 特征变换检测

SAR 图像因为散斑噪声影响,处理起来比较麻烦,如果将图像或图像中的某些特征作为变换,就会使检测更加简单。

(1)基于相位拉伸变换(Phase Stretch Transform, PST)的方法。文献[40]采用物理启发的数字图像变换,模拟电磁波通过具有扭曲色散(频率相关)特性的衍射介质的传播,由于更高的相位量表征更高的频率特征,而图像边缘包含更高频率的特征,因此通过 PST 可以强调图像中的边缘信息,证明变换的相位有助于检测图像中的边缘和锐利过渡的特性。而文献[41]将文献[40]的方法用于 SAR 图像的边缘检测,首先利用本地化内核平滑图像;然后对平滑后的图像进行去噪,减少不需要的斑点噪声;接着进行相位拉伸变换,返回相位图;最后进行阈值处理和形态学滤波得到 SAR 图像的边缘。

(2)基于支持值变换(Support Value Transform, SVT)的方法。普通光学图像的边缘检测方法较多,且算法比较成熟,但不能很好地用于 SAR 图像的边缘检测,于是有学者将 SAR 图像尽可能好地转化为普通的光学图像,这样就可以利用经典的光学图像边缘提取方法。文献[42]即采用这种思想:首先构建多尺度支持值过滤器(Multi-scale Support Value Filter, MSVF);然后使用 MSVF 过滤给定的 SAR 图像,从而

得到低频分量图像和一系列支持值图像,通常这些支持值图像中唯一有用的就是低频图像,它包含缓慢变化的信息或 SAR 图像中的轮廓信息;接着用低频滤波器对 SAR 图像中的斑点噪声进行滤波;最后通过应用一些经典的微分算子来检测滤波图像的边缘。

(3) Zernike 矩方法。Zernike 矩^[43]是一组正交复数矩,具有旋转、平移和尺度不变性,通常将 Zernike 矩的模式作为特征来描述物体的形状。当计算图像的 Zernike 矩时,以该图像中目标的形心为原点,把像素坐标映射到单位圆内。目标对象的形状特征可以用一组很小的 Zernike 矩特征向量很好地表示,低阶矩特征向量描述的是目标的整体形状,高阶矩特征向量描述的是目标的细节。文献[44]提出了一种基于 Zernike 矩的图像亚像素边缘检测方法,计算从 Zernike 矩的 0 阶到 2 阶的正交复数多项式和 Zernike 矩掩模值,并将其应用到某些标准面部识别,具有很高的检测精度。而文献[45]则将 Zernike 矩与 OTSU 算法(即最大类间方差法或大津法)相结合,进一步提高了边缘检测性能,减少了假边缘的存在。Zernike 矩主要用来描述图像目标的几何形状信息,且具有较强的抗噪声性能,对于手势识别、形状识别、图像分类等几何形状明显的特征物较适用但对于纹理信息丰富的物体识别能力不强。

3.2.4 其他检测方法

边缘检测领域涉及的内容较广,方法步骤也不是一成不变的,许多其他领域的方法也可以被借鉴。

(1) 混合遗传算法。遗传算法是建立在达尔文自然选择和孟德尔遗传变异理论的基础上的一种随机搜索方法。文献[46]指出单纯的遗传算法虽然具有很强的全局搜索能力,但其局部搜索能力相对较差,特别是在解空间非常庞大的图像边缘检测问题中,于是文献[46]将局部爬山算法和遗传算法结合成一种混合遗传算法来提高检测速度。

(2) 基于仿生学的方法。人的眼睛可以过滤一些与图像内容无关的干扰物,如色盲检测中正常人能从五彩斑斓的图像中找出正确答案。对于 SAR 图像也是如此,虽然 SAR 图像有着不可避免的相干斑噪声,但是人眼可以很轻松地识别出各种目标,当然也能够完美地实现边缘检测。于是有人通过模仿人的眼睛来对图像的边缘进行检测。文献[47]借鉴人类视觉系统中初级视皮层(V1)神经细胞的感受野特性及该区域带有非经典感受野的细胞对同质区域纹理和噪声的环绕抑制机制,提出了一种仿视皮层信息处理机制的 SAR 图像边缘检测方法,一定程度上抑制了 SAR 图像同质区域的大部分纹理,弱化了斑点噪声,保留了感兴趣的边缘信息。

(3) 基于神经网络、深度学习的方法。神经网络、深度学习都是通过训练大量的数据集来学习得到目标的特征,从而能够对人们感兴趣的目标进行精确的分类检测。文献[48]利用人工神经网络学习 SAR 图像的统计模型参数,从而提高了边缘检测器的性能。

3.3 SAR 图像区域分割

由于高分辨率 SAR 图像中的道路呈狭长区域状,因此可分割出候选道路的大致形状,为道路网的全局连接做准备。

3.3.1 基于阈值的分割

这类方法对图像灰度信息进行阈值化处理,用一个或几

个阈值将图像灰度直方图进行分类,将灰度值在同一个灰度类内的像素归为同一个物体。利用图像中目标与背景在灰度特性上的差异,选取合适的灰度阈值对图像进行分割。其实现简单、速度快、实用性强,但是当图像灰度差异不明显或各物体的灰度范围值有大部分重叠时,难以得到准确的分割结果;且该方法在多阈值分割时受相干斑噪声影响严重,特别是在道路区域较小的情况下分割效果较差。典型算法有固定阈值分割、直方图双峰法、分水岭法、OTSU 法等。

3.3.2 基于聚类的分割

由于分割得到的对象的像素点之间在某一或某些特征上具有相似性,因此图像分割问题可以看作对图像像素进行分类的问题。典型算法有 k-means 算法、模糊 C 均值(Fuzzy c-means, FCM)算法等。其中, k-means 算法简单、快速,聚类过程中不需要人工干预,适合于自动分割,其主要缺点是需要指定聚类数目,对初始聚类中心依赖性较大,对噪声和孤立点较敏感,这导致 k-means 算法的分割结果不够细致。文献[49]对该 k-means 聚类分割算法进行了改进,提出将 k-means 算法和 OTSU 法相结合来进行分割以获得理想的效果。而 FCM 算法是一种基于目标函数的模糊聚类算法,相比于 k-means 算法能够保留更多的图像信息,其缺点是只考虑了最小化聚类内部的距离和,没有考虑聚类之间的距离(即没有利用像素间的空间信息),容易出现局部最优解问题且对噪声和孤立点也很敏感。文献[50]同时考虑了抗噪性和边缘细节保持,提出了一种基于贝叶斯非局部空间信息的鲁棒 FCM 算法。

3.3.3 基于像素特性的分割

这类方法的典型算法是马尔可夫随机场(Markov Random Field, MRF)分割,即图像像素点的特性更可能受周围邻域像素点的影响,与它距离越远,对它的影响就越小。MRF 利用像素间的局部相关性有效抑制了相干斑噪声的影响,但因为计算量较大不能做到实时快速分割。文献[51]首先通过简化沿法线方向和切线方向的系数来修改 P-M 非线性扩散模型,用这种改进的 P-M 模型对原始 SAR 图像进行滤波,然后使用 MRF 模型对滤波后的图像进行分割,最终得到较好的分割效果。文献[52]将偏置场和 MRF 特征与 FCM 相结合(图像的 MRF 特征包括图像的空间信息),并引入偏置场估计来处理 SAR 图像中的灰度强度不均匀性,分割效果较好。文献[53]利用基于交叉视觉皮质模型(Intersecting Cortical Model, ICM)的 MRF 分割出道路的主要路段,然后结合数学形态学方法提高道路提取的精度。

3.3.4 基于统计特性的分割

由于 SAR 图像存在散斑,使得对于 SAR 图像的处理并不容易,于是有研究者利用 SAR 图像的统计特性进行分割,这类方法一般直接计算噪声和信号的统计分布,不进行噪声的预处理。例如经典的 CFAR 技术虽然通常被用于 SAR 图像处理中的目标检测,但针对单个像素的假设检验问题,可将其用于图像的分割。文献[54]通过采用对数累积法对由 G_0^c 和 G_0^a 分布建模的 SAR 数据进行粗糙度参数估计来实现 SAR 图像分割,而不是直接处理斑点图像。文献[55]利用 G_0^a 分布模型导出能量函数,结合水平集框架对 SAR 图像进行分割。文献[56]首先组合区域信息和边缘信息,定义基于

G^0 分布的能量函数,然后使用模糊隶属函数来表示区域,通过采用快速迭代的方案来解决最小化问题,结果表明该方法能够适应较多的场景。

3.3.5 基于核映射的分割

基于核映射的方法就是用线性解决非线性问题,即把非线性数据映射到一个线性空间,典型算法是核图切割(Kernel Graph Cut, KGC)法^[57]。文献[58]将核图割法与主成分分析法相结合,通过在低维子空间中选择主成分来实现 KGC,与现有的 KGC 算法相比,该算法不仅在类完备性上有优势,而且在边界识别上也有优势。文献[59]认为 KGC 不仅受到不同类型噪声的影响,还受到正则化参数设置的影响,从而提出将主成分分析和 KGC 相结合来研究图像分割。基于核映射的分割方法最大的特点就是不需要先验知识和人机交互^[60]。

3.3.6 基于区域的分割

基于区域的分割主要有区域生长法^[61-62]和区域分裂合并法^[63]。区域生长法是将具有相似性质的像素集合起来构成区域,首先在需要分割的区域内找到一个种子像素作为初始生长点(即种子点),然后按照某种事先约定好的“生长”准则比较该种子点和其相邻像素点,将符合相似规定的邻接像素与种子点视为同一区域并合并,最后将邻接像素作为新的种子点继续比较其邻接像素并进行生长合并。这样,相似特性的像素和区域不断增长,直到再没有满足条件的像素可以被吸收合并,就形成了生长后的区域。该算法的优点是计算简单,对像素灰度值分布均匀的目标区域有较好的识别和提取效果;其缺点是对初始生长点、生长准则、终止准则的依赖性较大、对噪声比较敏感,易出现空洞或过分割现象。文献[64]就是通过统计区域生长和分层合并进行 SAR 图像分割。而文献[62]首先用加权比线性检测器来提取道路特征,然后利用合并比率和方向信息自动提取道路种子,最后采用区域生长法构建道路网。区域分裂合并算法首先将图像分裂成很多子区域,然后按照某种事先约定好的一致性准则判断不同内部像素的相似度,将相似度低的子区域进一步分裂,直到每个子区域都满足一致性准则,最后利用区域合并的方法将相似的子区域尽可能地合并成较大的区域。如文献[65]首先将图像转化为超像素图像,然后用基于认知科学研究的格式塔框架下的规则提取图像纹理边缘、空间信息等特征,接着用四叉树分解法分裂图像,再分两步合并,最后分割出图像。与区域生长法相比,区域分裂合并法具有较强的抗噪性,而且可以有效抑制过分割现象,但是该算法的运算量较大,所需内存空间较多,而且区域分裂的过程中边界有可能被破坏。

3.3.7 基于图论的分割

该类方法将图像映射为带权值的无向图,其中 V 是顶点的集合, E 是边的集合,每个像素对应图中的一个顶点,像素之间的相邻关系对应图的边,像素特征之间的相似性或差异性表示边的权值。该类方法将图像分割问题转换成图的划分问题,通过对目标函数的最优化求解,使得能量函数最小化。典型算法有 Graph Cut 分割及其改进版 Grab Cut 分割,两者的区别在于 Graph Cut 的能量最小化(分割)是一次达到的,而 Grab Cut 是一个不断进行分割估计和模型参数学习的交互迭代过程。文献[66]就是利用 Graph Cut 算法进行图像分割,通过核函数隐式地变换图像数据,利用图像数据的核映射

来研究多区域图像切割方法,实验表明这种方法对于 SAR 图像的分割同样适用。另外还有一种将图论与聚类相结合的算法——谱聚类法,它能够识别任意形状的样本空间且收敛于全局最优解,其基本思想是对利用样本数据的相似矩阵(拉普拉斯矩阵)进行特征分解后得到的特征向量进行聚类。如文献[67]提出将对约束与谱聚类相结合用于 SAR 图像分割,首先用成对约束来学习距离度量,通过学习后的高斯函数获得关联矩阵;然后对关联矩阵进行谱分解,从而得到数据点的谱特征;最后用受约束的 k-means 进行谱特征聚类,得到图像分割结果。而文献[68]认为谱聚类方法中每对像素之间的相似度计算需要很长时间,为了降低谱聚类计算的复杂度、缩短计算时间,先将区域生长法应用于 SAR 图像,把基于像素的图像转换为基于区域的图像,再使用谱聚类技术完成分割。

3.3.8 基于水平集的分割

图像的分割就是通过一系列曲线将需要分割出来的部分包围起来。我们可以通过在需要分割的目标内部初始化某一(或某些)曲线,利用曲线的单位法矢量和曲率等参数来推演曲线随时间的变化,最终使得曲线与目标边界重合,即分割出目标。水平集(Level Set)方法就是曲线演化的实现方法,它能够自然地处理曲线演化过程中的拓扑变化。水平集函数是关于演化曲面的函数,而不是演化曲线的函数。假设水平集函数 $z = f(x, y)$,那么当 $z = 0$,即 $level = 0$ 时,水平集函数变成一条曲线 $f(x, y) = 0$,也称为零水平集。我们只要得到每一时刻 t 的水平集函数 $z = f(x, y, t)$,再求出 $f(x, y, t) = 0$ 即可得到零水平集,即图像分割的边界。而 $z = f(x, y, t)$ 的演变依赖于水平集方法构建的能量函数(一般包括一个内部力量项、外部力量项和一个正则项):当极小化该能量函数时,水平集函数的零水平集也就收缩到目标边界(这是因为零水平集受到内力和外力作用,当与目标重合时,内外力平衡,能量极小化)。文献[69]提出了一种基于边缘和区域信息的变分水平集 SAR 图像分割方法,首先定义一种由无边模型的活动轮廓和 SAR 图像的边缘信息组成的能量函数,通过最小化能量函数得到曲线演化的微分方程,然后采用变分水平集方法求解偏微分方程的解,从而实现图像分割。文献[70]提出了一种新的水平集演化方法,它可以在没有初始轮廓的情况下获得全局最小值,从而自动处理复杂图像。文献[71]认为单独使用图像信息通常会导致分割不良,于是将 SAR 目标的形状引入活动轮廓,且为了避免水平集演化的不规则性,引入了一种新的潜在函数来规范水平集函数,灰度的能量有助于定位目标,同时目标形状的能量使目标的轮廓正常化。

3.3.9 基于深度学习的分割

随着计算机视觉的不断发展,以卷积神经网络为代表的深度学习已深入到图像处理的各个领域,它能够逐层地提取样本特征,通过低层特征的组合,在高层提取更加抽象丰富的特征,从而提取出数据的本质特征。因此,通过设计多层网络结构自动学习特征,能更有效地描述图像的本质、表达高语义的特征,为实现图像处理提供了新的途径。文献[72]认为传统的 SAR 分割方法的共同之处在于要么缺少阴影分割,要么由于边界区域强度与背景强度相似导致目标难以分割;而卷积神经网络在单一模型优化中具有良好的分层结构化特征提

取能力和良好的分类能力,于是可以根据图像所属的片段对图像中的每个像素进行分类。文献[73]采用完全卷积神经网络(FCNN)对 SAR 图像道路进行分割,通过添加空间容差规则,成功地提取了测试数据集中的大部分道路。相比于传统的方法,利用深度学习对 SAR 图像进行分割的精度较高、鲁棒性较好,能够实现图像的语义分割,但是深度学习需要大量的训练样本,以尽可能地学到足够多的样本特征,因此,该方法虽然精度较高,但比较费时,实时性较差。

除此之外,还有基于数学形态学分割^[74-76]、基于模糊连接理论分割^[77-78]等方法。

3.4 SAR 图像道路网重构

经过 SAR 图像的道路元素识别之后,由于阴影,树木遮挡,路上汽车、行人等影响,导致识别出来的道路元素并不连续,呈现断裂现象,且存在一些虚假、冗余的道路元素,于是需要排除这些冗余元素并连接不连续的道路元素,从而形成完整的道路网,这就是 SAR 图像的道路网重构,其重点是对道路进行全局连接。而道路全局连接方法主要分为自动和半自动两大类。自动连接方法需要结合具体图像道路的先验知识,处理结果需要后期人工检验和调整,普适性不强。就目前的图像处理及模式识别技术水平,实现高分辨率 SAR 图像道路的自动连接仍然十分困难;而半自动连接方法能够将机器的快速计算和人的解译技巧进行有效结合,其主要缺点是人机交互次数多、效率低。半自动连接方法是针对当前计算机智能处理技术远未达到能够解决复杂干扰下道路自动连接的一种折中方法,是目前人工智能水平还未达到要求的过渡手段。

3.4.1 自动道路连接

常见的自动道路连接方法有:MRF 模型^[79]、遗传算法(Genetic Algorithm, GA)、链码优化、动态规划等。

(1)GA

GA 通过 N 代的遗传、变异、交叉、复制,进化出问题的最优解(问题的可行解相当于“染色体”,而可行解的各个元素相当于“染色体”上的“基因”)。其主要优点是:直接对结构对象进行操作,不存在求导和函数连续性的限定;具有内在的隐并行性和更好的全局寻优能力;采用概率化的寻优方法,不需要确定的规则就能自动获取和指导优化搜索空间,自适应地调整搜索方向^[80-81],连接效果较好。但其最大的缺点是需要设置的参数过多,且参数选择依赖于经验值,后期仍需要进一步的处理,适用性不广。

(2)链码优化

链码优化主要由 3 部分组成:链码基元的定义、链码能量图的定义、链码能量图的优化^[82]。通常在道路初步分割之后,一些道路基元还含有小的交叉。因此,将含有多个交叉的基元按照连通性规则断开,去掉较小的基元,得到每条线段只含有两个端点的线基元,将这些基元按照一定顺序依次编号来构成有序的链码基元序列。定义完链码基元后,还需要将这些基元连接起来,建立链码能量网络,最后通过优化链码能量(得到最小的能量)得到理想的道路网。链码优化的不足在于:对于曲率较大的道路较难连接,容易出现断裂,而如果道路曲率越小、长度越长,连接效果就会越理想。另外,不同的链码计算方法对于结果和效率的影响都很大,在采用链码优

化时需要尽可能地降低计算量。

(3)动态规划

动态规划是一种比较直观的全局连接方法,它的基本原理^[83]如图 4 所示。

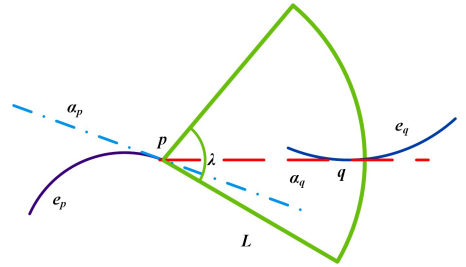


图 4 动态规划原理图

Fig. 4 Dynamic planning schematic

图 4 中, L 是距离门限, λ 是角度门限, l_p 是线段 e_p 沿 p 点方向的延长线。假定 q 是落于搜索空间内的另一条边缘线段 e_q 上的点, l_{pq} 是连接 p 和 q 的线段, l_q 是线段 e_q 在 q 点的切线, α_p 是 l_p 和 l_{pq} 的夹角, α_q 是 l_q 和 l_{pq} 的夹角。代价函数 $E(q) = |\alpha_p| + |\alpha_q|$,如果 q 点能产生最小的代价 $E_{\min}(q)$ 且 $E_{\min}(q) < Threshold$,那么将 p 与 q 连接起来形成道路网。利用动态规划进行连接时,道路基元之间不能超过距离门限,因此该方法对于基元间隔较大的情形是不适用的。

(4)模糊连接

在模糊连接理论中存在局部模糊亲和关系和全局模糊连接关系^[84]。在进行道路连接时使用的全局模糊连接关系,其隶属度函数可表示为:

$$\mu(c, d) = \max_{\rho(c, d) \in P(c, d)} \left\{ \min \begin{bmatrix} \mu_k(c_1, c_2) \\ \mu_k(c_2, c_3) \\ \dots \\ \mu_k(c_{m-1}, c_m) \end{bmatrix} \right\} \quad (2)$$

其中, $\rho(c, d)$ 表示从 c 到 d 的路径, $P(c, d)$ 表示从 c 到 d 所有路径的集合,路径上的各点用 $c_1 = c, c_2, c_3, \dots, c_m = d$ 表示, $\mu_k(c_i, c_j)$ 是 c_i 和 c_j 间的局部模糊亲和关系,是元素相邻关系、图像特征以及像素空间位置的函数。传统的模糊连接算法需要人工选取种子点,这大大降低了效率和可行性,文献[85]将传统的模糊连接算法与小波模数最大值算法相结合,提出了一种改进的模糊连接方法,利用小波模数最大值图像边缘检测算法解决传统模糊连接理论中自动选择种子点的问题。

(5)生成对抗网络

对高分辨率 SAR 图像进行道路提取,本质上就是将含有复杂信息的遥感图像转换成仅包含道路信息的图像的过程,也就是道路图像的生成过程^[11],这样就用到了深度学习中的生成对抗网络(Generative Adversarial Networks, GAN)^[86]。GAN 无须样本标签,属于无监督学习范畴,不仅可以提取道路元素,还可以用于道路网重构。

如图 5 所示,GAN 包含一个生成器和一个判别器:生成器 G 通过分析学习真实样本数据来生成类似于真实样本的随机样本(即虚假样本);判别器 D 则是一个分类器,用于判别输入的样本数据是来自于真实的样本数据还是来源于生成的虚假样本数据,如果判别器 D 判断正确,就调整优化生成

器 G 的参数,使它生成的虚假样本更接近真实样本,如果判断错误,则调整优化判别器 D 的参数,使它的判断能力更强。这样生成器与判别器不断地进行学习和优化,逐步提高各自的生成能力和判别能力,最终判别器 D 无法判断输入样本的真实性,从而达到纳什均衡。

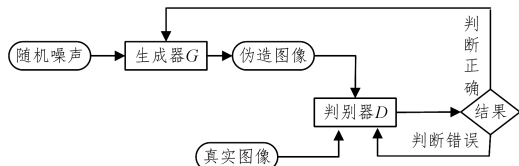


图 5 GAN 原理图

Fig. 5 GAN schematic

按照文献[11]所述:训练样本是原始 SAR 图像 X 和道路图像 Y 组成的图像对 $\{x, y\}$;由生成器 G 完成原始 SAR 图像至生成道路图像的映射 $G: x \rightarrow y$;训练生成器 G 使判别器 D 无法分辨出是真实图像对 $\{x, y\}$ 还是生成图像对 $\{x, G(x)\}$;然后建立目标函数,解出最理想的目标生成器 G^* 。

目前虽然利用 GAN 进行 SAR 图像道路提取还不成熟,但是 GAN 种类繁多、应用广泛,相信该领域会有很好的发展前景,是一个很好的研究方向。

3.4.2 半自动道路连接

半自动连接方法一般分为局部道路特征提取和全局道路跟踪两个步骤。局部道路特征信息主要有局部道路区域的方向、宽度和中心点坐标等;全局道路跟踪是根据局部道路特征提取计算获得的方向、宽度和中心点坐标等信息来估计下一个道路中心点,并将获得的中心点连成道路网络。常用的方法有 Snakes 模型、模板匹配、扩展 Kalman 滤波(Extended Kalman Filter, EKF)、粒子滤波等。

(1) Snakes 模型

Snakes 模型是一种在内外约束力作用下可以活动变形的轮廓线,它的内部能量函数可以保证提取光滑曲线,而在外部能量中加入一些符合待提取特征的约束条件,可使 Snakes 轮廓很好地收敛到待提取的目标上,对曲线轮廓具有较好的拟合效果。文献[87]首先利用提取的多特征(最小辐射、对比度和最小辐射方向)融合来检测候选的道路区域,然后丢弃检测到的错误候选道路并在道路区域上运用形态学以细化道路段,最后利用提取的种子点形成道路网。文献[88]首先利用 FCM 聚类分割法从 SAR 图像中提取道路类,然后对道路类进行张量投票获得每一点的曲线显著性值,接着以曲线显著性值的负值作为 Snakes 模型的外部能量,采用一种边内插边优化的策略最小化 Snakes 模型能量,从而获得较准确的道路。文献[89]提出了一种允许可控的改进梯度矢量流(Gradient Vector Flow, GVF)Snake 模型,该模型利用了两种外部约束力,一种可以固定蛇上的指定点并确定蛇的基本形状,另一种可以避免在曲线演变期间产生耳朵,这种模型可以在变形期间固定连接点并提供平滑的连接曲线而不是直线,且不会沿错误的方向生长。

(2) 模板匹配

模板匹配就是在图像中寻找与模板图像最匹配(相似)的部分。它不仅可以在一个图像场景中定位一个特定的物体,还可以在图像序列中追踪某些特定模式,因此可以用来对道

路进行跟踪和连接。它的基本原理如下:在待搜寻的图像中,移动模板图像,在每一个位置测量待搜寻图像的子图像和模板图像的差值,当相似度达到最大时,记录其相应的位置。如文献[90]提出了一种基于圆形模板匹配的半自动道路中心线提取方法,首先通过给定的两个输入点计算圆形模板和道路方向,接着沿道路方向用模板与图像匹配来搜索中心点,最后通过二次曲线拟合将提取的中心点连接起来。这种方法也有其局限性,即应该如何选取合适的距离测量方法,当灰度或对比度等改变时应该如何处理,匹配的阈值如何选择,等。这些问题都需要根据实用情况加以考虑。

(3) 粒子滤波

粒子滤波(Particle Filter, PF)算法源自蒙特卡洛思想,即以某事件出现的频率代替该事件的概率,也就是用已知的一些数据预测未来的数据。其核心思想是“随机采样+重要性重采样”;既然不知道目标在哪里,就随机地撒粒子,撒完粒子后根据特征相似度计算每个粒子的重要性,然后在重要的地方多撒粒子、在不重要的地方少撒粒子。其过程大致可以分为:初始化、预测、决策(或校正)、重采样、滤波 5 个阶段。如文献[91]引入了多分段多线模型,以提供更准确的道路描述,并确保道路曲线在模型水平上的平滑度,然后采用粒子滤波算法来跟踪道路。文献[92]通过粒子获得道路中心线,建立道路损伤模型,最后获得道路损伤信息。文献[93]认为获取道路交叉口信息有助于提高道路网络的提取质量,其通过先确定道路交叉口再并行运行粒子滤波跟踪道路中心线来提取出道路网。粒子滤波与 Kalman 滤波的不同之处在于不局限于高斯噪声,可以驾驭所有的非线性、非高斯系统;但其同样存在着严重依赖于对初始状态的估计、粒子的多样性丧失、可能很快收敛或者很快发散等缺点。另外,根据重采样方式或重要性密度函数等的不同,又衍生出正则粒子滤波、辅助粒子滤波、高斯粒子滤波、边缘化粒子滤波等。

(4) 扩展 Kalman 滤波

与 PF 类似,先利用前期和预测模型获得先验概率密度函数,再通过测量和计算获得后验概率密度函数,将两种函数结合得到道路的最优估计状态。因为 Kalman 滤波(KF)需要假设系统为线性,而实际情况并非如此,许多系统不能被认为是线性的,于是就出现了扩展 Kalman 滤波。它的基本思路是进行 Taylor 展开,将非线性系统线性化(通常取一阶扩展 Kalman,忽略高阶的成份);另外 Kalman 滤波的噪声一般认为服从高斯分布,因此局限性较大。文献[94]提出了一种基于改进轮廓匹配和 EKF 的半自动道路提取方法,通过 EKF 更新得到最优估计值。文献[95]同时使用 EKF 和 PF 对道路进行跟踪,结果表明, EKF 在具有中等噪声的道路上具有更好的性能, PF 在具有高噪声的道路上具有更好的性能。

(5) Bresenham 算法

Bresenham 算法主要用于直线的绘制,它是在数字差分分析(Digital Differential Analyzer, DDA)算法的基础上改进而来的,其核心思想就是步进。文献[96]在提取河流时先对图像进行骨架化,提取与河流的各个部分相关联的中心轴,再利用边缘检测和 Bresenham 算法来连接断开的河流。

(6) 数学形态学

数学形态学骨架算子[97]可以对图像目标的主体轮廓中

心进行提取,因此也可以用于提取道路中心线。通常经过骨架算子提取出的道路中心线会产生断裂,需要在提取之后进行连接操作。文献[98]认为道路的断裂间隙不会太长,如果满足方向一致性或相邻性,则对其断裂段进行直线填充不会对道路本身的形状造成太大的影响。文献[99]则通过形态细化和毛刺修剪来提取道路中心线。

4 存在的问题与不足

虽然对于高分辨率 SAR 图像的道路提取的研究已越来越广泛,所提出的方法越来越多,取得的效果也越来越好,但是仍存在着许多不足。

(1)精度度不高。如道路与河流,难以区分,因为某些情况下河流完全可以被当作道路,这就导致在道路识别提取中出现了偏差。

(2)普适性不强。如文献[5]提及了很多方法,且大都比较成熟,但这些方法并不适用于所有的场景,许多方法只能应用于某一或某些场景。道路是比较复杂而又无法枚举的事物,地面上的道路形态多种多样,环境也错综复杂,提出的方法在实际应用中不可能对所有的场景都适应。这就导致我们需要具体问题具体分析,不同的道路场景需要用不同的方法,从而使方法的实用性大大降低。

(3)实时性不强。不管是自动提取还是半自动提取,在应用中实时性都不是很理想,在应对时效性要求较高的场景时显得不那么有用,特别是半自动提取还需要人工干预,这就进一步降低了道路提取的实时性。目前来看,解决实时性比较可行的方法就是软硬件结合,即将自动提取算法与高性能硬件相结合。GPU 加速^[79,93]等技术的发展在一定程度上提高了道路提取的实时性,但是自动提取的算法目前还不是很完善,在未来很长一段时间内还不能很好地取代半自动提取。

(4)虽然以深度学习为代表的人工智能在计算机视觉领域取得了巨大的发展,但是目前绝大部分还只是停留在光学图像领域,在 SAR 图像方面还远远不够,如大部分的深度学习算法仅用于去噪声、特征检测提取以及分类分割等,而在道路网重构等处理上还未见应用。如文献[100]考虑到高分辨率 SAR 图像中道路区域的丰富结构信息,提出用 CNN 模型来提取道路区域特征并检测道路候选。虽然 CNN 模型有助于提高特征级别的道路候选检测的准确性,但在最后的道路网重构等环节仍使用改进的 Radon 变换和 MRF 来完成道路网络提取,并没有用到深度学习。

5 发展趋势

针对当前高分辨率 SAR 图像道路提取研究中存在的不足,本文给出未来该领域的发展方向。

(1)多信息融合技术。在对 SAR 图像道路进行提取的过程中,不管是图像的滤波,或者边缘检测、区域分割,还是后面的道路重构,从某种程度上来说都需要一定的先验知识。例如,利用粒子滤波对道路进行连接时,如果用到的先验知识更多,信息更全面、更准确,那么得到的结果更令人满意。因此,如果在道路提取过程中能够融合更多的信息,利用多信息指导道路提取,结果将更加准确。

(2)人工智能技术。传统的道路提取方法虽然比较成熟,

但在精准度、普适性、鲁棒性等方面存在着一些难以解决的问题,而人工智能技术能较好地解决图像处理过程中精准度不高、普适性差等问题。目前在 SAR 图像道路提取中人工智能的应用还远远不够,若将其进一步融入 SAR 图像道路提取中,可使提取结果更接近于实际。

(3)并行加速处理技术。SAR 图像道路提取对于实时性的需求提高,特别是对并行处理能力的要求更高,从而迫使计算机硬件不断更新发展。目前 GPU 加速已有了不错的应用,但仍达不到实时性的要求,现有的并行处理技术主要是通过挖掘计算机的 GPU 并行计算能力,计算机硬件架构并没有本质上的改变,这就很难从根本上实现道路提取的实时性,我们更需要的是一场计算机硬件的革命,如用量子计算机^[101]取代现有的计算机,使并行处理发挥更大的作用。

结束语 高分辨率 SAR 图像道路提取的课题研究已取得了很大的进展,但由于受到技术的局限,实用性方面仍需要进一步提高。本文结合目前该领域的研究成果,总结了高分辨率 SAR 图像道路提取的方法和步骤,提出了存在的问题,展望了未来的发展趋势。相信随着雷达理论的不断发展和 SAR 图像成像技术和遥感图像解译技术的进一步提高,以及计算机技术和人工智能技术的快速推进,高分辨率 SAR 图像道路提取的研究必将迎来崭新的一页。

参考文献

- [1] CURLANDER J C, MCDONOUGH R N. Synthetic Aperture Radar: Systems and Signal Processing 合成孔径雷达——系统与信号处理[M]. 韩传钊,等,译. 北京:电子工业出版社,2014:1-40.
- [2] SOUYRIS J, MASSONNET D. 合成孔径雷达成像 Imaging with synthetic aperture radar[M]. 邓云凯,等,译. 北京:电子工业出版社,2015:95-104.
- [3] SAATI M, AMINI J, MABOUDI M. A Method for Automatic Road Extraction of High Resolution SAR Imagery[J]. Journal of the Indian Society of Remote Sensing. 2015,43(4):697-707.
- [4] CHENG J H, GAO G, KU X S, et al. Review of road network extraction from SAR images[J]. Journal of Image and Graphics, 2013,18(1):11-23.
- [5] CHENG J H. Road Extraction in High-Resolution SAR Images [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2013.
- [6] WANG Z L, ZHONG H. The nowadays development and application of oversea advanced spaceborne SAR[J]. National Defense Science & Technology, 2016,37(1):19-24.
- [7] LI C S, WANG W J, WANG P B, et al. Current Situation and Development Trends of Spaceborne SAR Technology[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2016,38(1):229-240.
- [8] XU H, LIU A F, WANG F. Discussion on Development of Spaceborne Light-SAR[C]// The 4th High Resolution Earth Observation Academic Conference. Modern Radar, 2017:1-6.
- [9] ZHANG Q J, HAN X L, LIU J. Technology Progress and Development Trend of Spaceborne Synthetic Aperture Radar Remote Sensing[J]. Spacecraft Engineering, 2017,26(6):1-8.
- [10] WANG Y F, LIU C, ZHAN X L, et al. Technology and Applications of UAV Synthetic Aperture Radar System[J]. Journal of

- Radars, 2016, 5(4): 333-349.
- [11] WU X. Research on Land Cover Classification and Road Networks Extraction of SAR Imagery Based on Deep Learning[D]. Hefei: Anhui University, 2018.
- [12] ZHU J L, WEN J G, ZHANG Y F. A new algorithm for SAR image despeckling using an enhanced Lee filter and median filter [C]// 2013 6th International Congress on Image and Signal Processing (CISP). IEEE, 2013: 224-228.
- [13] WU L B. SAR image processing and target recognition[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2013: 32-33.
- [14] MMROOMI S, KALAIYARASI D, GABHAINAYA J, et al. Edge Preserving SAR Image Despeckling[C]// 2011 Third National Conference on Computer Vision, Pattern Recognition, Image Processing and Graphics. IEEE, 2011: 130-133.
- [15] SONG B B. Multi-scale and multi-directional transformation of images and its application[D]. Xi'an: Xidian University, 2008.
- [16] PERONA P, MALIK J. Scale-space and edge detection using anisotropic diffusion[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1990, 12(7): 629-639.
- [17] MASUME R, MEHRAN Y. A new hybrid algorithm for speckle noise reduction of SAR images based on mean-median filter and SRAD method[C]// International Conference on Pattern Recognition and Image Analysis. IEEE, 2015: 1-6.
- [18] BUADES A, COLL B, MOREL J M. A non-local algorithm for image denoising[C]// IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2005 (CVPR 2005). 2005: 60-65.
- [19] PARRILLI, SARA, PODERICO, et al. A Nonlocal SAR Image Denoising Algorithm Based on LLMMSE Wavelet Shrinkage [J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2012, 50(2): 606-616.
- [20] MARTINO G, SIMONE A, IODICE A, et al. Scattering-Based Nonlocal Means SAR Despeckling[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2016, 54(6): 3574-3588.
- [21] MARTINO G, SIMONE A, IODICE A, et al. Non-Local Means SAR Despeckling Based on Scattering[C]// Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE, 2015: 3172-3174.
- [22] ZHAO H Y, WANG Q, WU W W, et al. SAR image despeckling based on improved non-local means algorithm[C]// International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications. IEEE, 2014: 844-847.
- [23] LECUN Y, BENGIO Y, HINTON G. Deep learning[J]. Nature, 2015, 521(7553): 436.
- [24] WANG P Y, ZHANG H, PATEL V. SAR Image Despeckling Using a Convolutional [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2017, PP(99): 1.
- [25] KIM M, LEE J, JEONG J. A despeckling method using stationary wavelet transform and convolutional neural network[C]// 2018 International Workshop on Advanced Image Technology (IWAIT). IEEE, 2018: 1-4.
- [26] CHEN W R, WANG C, ZHANG H. Road network extraction in high resolution SAR images [C] // IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium. IEEE, 2004.
- [27] CHANUSSOT J, ISSA I, LAMBERT P. Adaptive directional order filters and mathematical morphology for road network extraction on sar images[C]// European Signal Processing Conference. IEEE, 2015: 1-4.
- [28] SGHAIER M, FOUCHER S, LEPAGE R. River Extraction From High-Resolution SAR Images Combining a Structural Feature Set and Mathematical Morphology[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing, 2016, PP(99): 1-14.
- [29] PANG Z C, ZHAO G H, SHI G M, et al. SAR image despeckling with adaptive sparse representation[C]// IEEE International Conference on Spatial Data Mining and Geographical Knowledge Services. IEEE, 2015: 188-189.
- [30] ZHAO L J, JIA C L, KUANG G Y. Overview of Edge Detection in SAR Images [J]. Journal of Image and Graphics, 2018, 12(12): 2042-2049.
- [31] FU K C, ZHANG Z X, QU Y. Canny-ROA operator and Hough transform based road detection according to SAR image [J]. Modern Electronics Technique, 2016, 39(23): 1-4.
- [32] FJORTOFT R, LOPES A, MARTON P, et al. Different approaches to multiedge detection in SAR images[C]// Geoscience and Remote Sensing, 1997 (IGARSS '97). Remote Sensing-A Scientific Vision for Sustainable Development. , 1997 IEEE International. IEEE, 1997: 2060-2062.
- [33] FJORTOFT R, MARTON P, LOPES A, et al. Multiedge detection in SAR images[C]// IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. IEEE Computer Society, 1997: 2761.
- [34] KONG Y Y, ZHOU J J, ZHANG Y. A new edge detection method for SAR image based on ROEWA and gabor filter[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2010(8): 1257-1263.
- [35] AN C J, XIN Y L, CHEN Z P. Edge detection algorithm for SAR image based Oil improved ROEWA [J]. Journal of Image and Graphics, 2011, 16(8): 1483-1488.
- [36] ZHU C S, GUAN J, ZHOU W, et al. Parallel Feature Extraction for SAR Images Based on Edge Detector [J]. Opto-Electronic Engineering, 2010, 37(9): 44-50.
- [37] LOPÉS A, FJØRTOFT R, DUCROT D, et al. Edge Detection and Segmentation of SAR Images in Homogeneous Regions [M]. Information Processing For Remote Sensing, World Scientific, 1999: 139-166.
- [38] SALARI E, ZHU Y. A road extraction method using beamlet transform[C]// IEEE International Conference on Electro/Information Technology. IEEE, 2012: 1-4.
- [39] CHENG Y S, LING X Q, GENG J, et al. SAR image edge detection based on fuzzy theory and information fusion[C]// IET International Radar Conference 2015. IET, 2016: 6.
- [40] ASGHARI M H, JALALI B. Edge detection in digital images using dispersive phase stretch transform [M]. International Journal of Biomedical Imaging, Hindawi Publishing Corporation, 2015, 2015: 1-6.
- [41] ILIOUDIS C, CLEMENTE C, ASGHARI M, et al. Edge detection in SAR images using phase stretch transform[C]// IET International Conference on Intelligent Signal Processing. IET, 2016.
- [42] ZHANG L, ZHOU W D, WANG B J. Filtering SAR imagery for edge detection using support value transform[C]// International Joint Conference on Neural Networks. IEEE, 2015: 1-8.
- [43] MU H L, ZHANG Y, LI H B, et al. Road extraction base on Zernike algorithm on SAR image[C]// Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE, 2016: 1274-1277.

- [44] JIANG M, MA N. Sub-pixel edge detection method based on Zernike moment[C]// Control & Decision Conference. IEEE, 2015; 3692-3693.
- [45] YU W B, MA Y H, WU X, et al. Research of improved subpixel edge detection algorithm using Zernike moments[C]// Chinese Automation Congress. IEEE, 2016; 712-716.
- [46] YANG S Y, WANG M, JIAO L C. A Genetic Algorithm-based Edge Detection Method for SAR Image[J]. Infrared Technology, 2005, 27(1): 57-60.
- [47] XIN P, XU Y L, MA S P, et al. A Method of SAR Image Edge Detection by Modeling the Properties of V1 in Cortex[J]. Journal of Airforce Engineering University (Natural Science Edition), 2017, 18(2): 49-53.
- [48] NAUMENKO A, LUKIN V, EGI AZARIAN K. SAR-image edge detection using artificial neural network[C]// 2012 International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory. IEEE, 2012; 508-512.
- [49] NIHARIKA E, ADEEBA H, KRISHNA A, et al. K-means based noisy SAR image segmentation using median filtering and otsu method[C]// International Conference on Iot & Application. IEEE, 2017; 1-4.
- [50] WAN L, ZHANG T, XIANG Y M, et al. A Robust Fuzzy C-Means Algorithm Based on Bayesian Nonlocal Spatial Information for SAR Image Segmentation[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing, 2018, 11(3): 896-906.
- [51] DONG G G, WANG N, HU C B, et al. SAR image segmentation combining the PM diffusion model and MRF model[C]// Geoscience & Remote Sensing Symposium. IEEE, 2012; 4307-4310.
- [52] XU H L, SUN ING, CHEN J, et al. SAR image segmentation based on BMFCM[C]// Geoscience & Remote Sensing Symposium. IEEE, 2017.
- [53] CHEN L, WEN J, XIAO H, et al. Road extraction algorithm for high resolution SAR image by fusion of MRF segmentation and mathematical morphology[J]. Chinese Space Science & Technology, 2015, 35(2): 17-24.
- [54] RODRIGUES F, NETO J, MARQUES R, et al. SAR Image Segmentation Using the Roughness Information[J]. IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters, 2016, 13(2): 132-136.
- [55] MARQUES R, MEDEIROS F, NOBRE J. SAR Image Segmentation Based on Level Set Approach and G* A Model[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2012, 34(10): 2046-2057.
- [56] FENG J, CAO Z J, PI Y M. Multiphase SAR Image Segmentation With G*-Statistical-Model-Based Active Contours[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2013, 51(7): 4190-4199.
- [57] SALAH M, MITICHE A, AYED I. Image partitioning with kernel mapping and graph cuts[C]// IEEE International Conference on Image Processing. IEEE, 2010; 245-248.
- [58] YANG D D, FEI R, WANG L, et al. SAR image segmentation by selected principal components and kernel graph cuts ensembles[C]// IEEE International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD). 2015; 1976-1980.
- [59] YANG D D, YU C Q, LV L T, et al. SAR Image Segmentation by Selected Principal Components and Kernel Graph Cuts Ensembles[J]. International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2016, 31(12): 573-584.
- [60] RAMYA R, JAYANTHI K. Automatic image segmentation by graph cuts for bio-medical applications[C]// International Conference on Advances in Engineering, Science and Management. IEEE, 2012; 392-395.
- [61] KAMDI A, KRISHNA R K. Image Segmentation and Region Growing Algorithm[J]. Journal of Computer Technology & Electronics Engineering, 2012, 1(2).
- [62] LU P P, DU K N, YU W D, et al. A New Region Growing-Based Method for Road Network Extraction and Its Application on Different Resolution SAR Images[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing, 2015, 7(12): 4772-4783.
- [63] ANEJA K, LAGUZET F, LACASSAGNE L, et al. Video-rate image segmentation by means of region splitting and merging [C]// IEEE International Conference on Signal and Image Processing Applications. IEEE, 2009; 437-442.
- [64] CARVALHO E A, USHIZIMA D M, MEDEIROS F, et al. SAR imagery segmentation by statistical region growing and hierarchical merging[J]. Digital Signal Processing, 2010, 20(5): 1365-1378.
- [65] SHALINI M V, SUBBULAKSHMI M P. A region splitting and hierarchical unequal merging algorithm for segmentation of sar images[J]. IJAICT, 2014, 1(1): 53-58.
- [66] MOHAMED B, AMAR M, ISMAIL B. Multiregion image segmentation by parametric kernel graph cuts[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2011, 20(2): 545-557.
- [67] ZOU H S, ZHOU W D, LI Z, et al. A new constrained spectral clustering for SAR image segmentation[C]// Asian-pacific Conference on Synthetic Aperture Radar. IEEE, 2010.
- [68] BAGHI A, KARAMI A. SAR image segmentation using region growing and spectral cluster[C]// International Conference on Pattern Recognition and Image Analysis. IEEE, 2017; 229-232.
- [69] YAN L, FENG D Z. Level set SAR image segmentation method combined with ratio edge information[J]. Journal of Xidian University, 2010, 37(3): 492-495.
- [70] SUN S, ZHANG J, ZOU B, et al. A level set method for very high resolution airborne sar image segmentation [C] // 2013 IEEE International Conference on Image Processing. IEEE, 2013; 4039-4043.
- [71] HAN Y, LI Y X, YU W X. SAR target segmentation based on shape prior[C]// Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE, 2014; 3738-3741.
- [72] MALMGREN-HANSEN D, NOBEL-JORGENSEN M. Convolutional neural networks for SAR image segmentation [C] // IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology. IEEE, 2016; 231-236.
- [73] HENRY C, AZIMI S, MERKLE N. Road Segmentation in SAR Satellite Images with Deep Fully-Convolutional Neural Networks[J]. IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters, 2018, PP(99): 1-5.
- [74] LI Y, WU J L, ZHU L, et al. Road Network Extraction from Dsm by Mathematical Morphology and Reasoning[J]. ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2016, XLI-B2: 715-720.
- [75] VARGAS-VAZQUEZ D, RODRIGUEZ-RESENDIZ J, JIMENEZ-SANCHEZ A R, et al. Face segmentation using mathemati-

- cal morphology on single faces[C]//Ingenieria. IEEE,2016:1-4.
- [76] POODANCHI M, AKBARIZADEH G, SOBHANIFAR E, et al. SAR image segmentation using morphological thresholding [C]//Information and Knowledge Technology. IEEE, 2015: 33-36.
- [77] CIESIELSKI K, HERMAN G, KONG T. General Theory of Fuzzy Connectedness Segmentations[J]. Journal of Mathematical Imaging & Vision, 2016, 55(3): 1-39.
- [78] HERMAN G, KONG T, CIESIELSKI K. Fuzzy Connectedness Segmentation: A Brief Presentation of the Literature[M]. Combinatorial Image Analysis, Springer International Publishing, 2015: 21-30.
- [79] CHENG J H, DING W X, ZHU X W, et al. GPU-accelerated main road extraction in Polarimetric SAR images based on MRF [C]//Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. IEEE, 2016: 928-932.
- [80] XIAO Z Q, BAO G S, JIANG X Q. Road network extraction in classified SAR images using genetic algorithm[J]. Journal of Central South University of Technology, 2004, 11(2): 180-184.
- [81] JIA C L, ZHAO L J, WU Q C, et al. Automatic Road Extraction from SAR Imagery Based on Genetic Algorithm[J]. Journal of Image and Graphics, 2008, 13(6): 1134-1142.
- [82] ZHANG G W, ZHANG Y H. Extraction of urban road network from SAR images based on chain code optimization[J]. Journal of Remote Sensing, 2008, 12(4): 620-625.
- [83] JIA C L, KUANG G Y. Automatic Extraction of Roads from Low Resolution SAR Images[J]. Journal of Image and Graphics, 2005, 10(10): 1218-1223.
- [84] FU X Y, ZHANG F L, WANG G J, et al. Automatic road extraction from high resolution SAR images based on fuzzy connectedness[J]. Journal of Computer Applications, 2015, 35(2): 523-527.
- [85] ZHENG J, LIU S, SUN W. An improved fuzzy connectedness method to recognize automatically the road network information from remote sensing image[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2016, 38(2): 413-417.
- [86] GOODFELLOW I, POUGET-ABADIE J, MIRZA M, et al. Generative Adversarial Nets [C] // International Conference on Neural Information Processing Systems. MIT Press, 2014: 2672-2680.
- [87] SAATI M, AMINI J. Road Network Extraction from High-Resolution SAR Imagery Based on the Network Snake Model[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2017, 83(3): 207-215.
- [88] FU X Y, ZHANG F L, WANG G J, et al. Road extraction from SAR images using tensor voting and Snakes model[J]. Journal of Image and Graphics, 2015, 20(10): 1403-1411.
- [89] DENG X P, HE C, SUN H. An improved GVF snake model and its application to linear feature extraction from SAR images [C]//IEEE International Conference on Signal Processing. IEEE, 2010: 2063-2066.
- [90] CHENG J H, GUAN Y F, KU X S, et al. Semi-automatic road centerline extraction in high-resolution SAR images based on circular template matching[C]//International Conference on Electric Information and Control Engineering. IEEE, 2011: 1688-1691.
- [91] CHEN Y L, YANG Q, GU Y T, et al. Detection of Roads in SAR Images using Particle Filter[C]//International Conference on Image Processing. IEEE, 2007: 2337-2340.
- [92] CHEN Y, FU C R, LU Y C, et al. Road damage information extraction based on high-resolution SAR imagery[J]. Journal of University of Electronic Science & Technology of China, 2016, 45(4): 551-556.
- [93] CHENG J H, GAO G. Parallel particle filter for tracking road centrelines from high-resolution SAR images using detected road junctions as initial seed points[J]. International Journal of Remote Sensing, 2016, 37(20): 4979-5000.
- [94] ZHAO J Q, YANG J, LI P X, et al. Semi-automatic Road Extraction from SAR Images Using an Improved Profile Matching and EKF[J]. Geomatics & Information Science of Wuhan University, 2017, 42(8): 1144-1150.
- [95] ZHAO J Q, YANG J, LI P X, et al. Semi-automatic Road Extraction from SAR images using EKF and PF[J]. ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2015, XL-7/W4: 227-230.
- [96] SGHAIER M, FOUCHER S, LEPAGE R. River Extraction From High-Resolution SAR Images Combining a Structural Feature Set and Mathematical Morphology[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing, 2016, PP(99): 1-14.
- [97] JOSEPH L, GEORGE L, SHABNA G, et al. Teeth feature extraction and matching for human identification using morphological skeleton transform[C]//International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability. IEEE, 2016: 802-807.
- [98] XIAO H G, WEN J, CHEN L F, et al. New road extraction algorithm of high resolution SAR image[J]. Computer Engineering & Applications, 2016, 52(15): 198-202.
- [99] XU T F, ZHANG Y S. A research of road centerline extraction algorithm from high resolution remote sensing images[C]//Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers. Proceedings of the SPIE, 2017: 11.
- [100] LI Y, ZHANG R, WU Y. Road network extraction in high-resolution SAR images based CNN features[C]//2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). IEEE, 2017: 1664-1667.
- [101] BRAO K. Computer systems architecture vs quantum computer [C]//2017 International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS). IEEE, 2017: 1018-1023.



ZHOU Yue-yong, born in 1986, post-graduate. His main research interests include computer vision and intelligent information processing.



CHENG Jiang-hua, born in 1979, Ph.D., associate professor. His main research interests include computer vision and intelligent information processing.