

改进三维最大类间方差的SAR图像海陆分割算法

李雨轩, 刘 峥, 冉 磊

(西安电子科技大学雷达信号处理全国重点实验室, 陕西西安 710071)

摘要: 合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)是一种在气象条件较差的条件下工作的高分辨率成像雷达。无论在民用还是军事领域,用合成孔径雷达进行海上舰船图像目标检测都能起到关键作用。海陆分割作为一种SAR图像预处理的手段,可以为后续的目标检测、识别与跟踪技术研究奠定良好的基础。本文对包含较复杂岛岸背景的SAR图像的海陆分割算法进行研究,在传统三维最大类间方差算法的基础上提出一种改进的SAR图像海陆分割算法,将原有算法第三维度邻域中值改为Prewitt算子的梯度运算,Prewitt算子适合处理灰度渐变复杂的图像,SAR图像能够更好地进行图像分割。考虑到维度上增加一维会使得算法效率降低,运用分解的思想,将三维最大类间方差拆分成3个一维最大类间方差算法。通过两组SAR图像进行实验,结果表明本文提出的改进三维最大类间方差算法具有可行性,并且在海陆分割效果方面优于一维、二维最大类间方差算法,在运算复杂度方面优于传统的三维最大类间方差算法。

关键词: 合成孔径雷达; 海陆分割; 最大类间方差; 阈值选取

中图分类号: TN957.51

文献标志码: A

文章编号: 1672-2337(2024)04-0416-11

引用格式: 李雨轩, 刘峥, 冉磊. 改进三维最大类间方差的SAR图像海陆分割算法[J]. 雷达科学与技术, 2024, 22(4): 416-426.

LI Yuxuan, LIU Zheng, RAN Lei. An Improved Algorithm for SAR Image Sea-Land Segmentation Based on 3D Maximum Between-Class Variance[J]. Radar Science and Technology, 2024, 22(4): 416-426.

An Improved Algorithm for SAR Image Sea-Land Segmentation Based on 3D Maximum Between-Class Variance

LI Yuxuan, LIU Zheng, RAN Lei

(National Key Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: Synthetic aperture radar (SAR) is a type of high-resolution imaging radar that operates in poor meteorological conditions. Whether in the civilian or military field, the use of SAR for image target detection of ships at sea can play a key role. As a means of SAR image preprocessing, sea-land segmentation can lay a good foundation for the subsequent research on target detection, recognition and tracking technology. In this paper, an improved sea-land segmentation algorithm for SAR images with complicated island and shore backgrounds is proposed on the basis of the traditional three-dimensional maximum between-class variance algorithm, which changes the median value of the third-dimensional neighborhood of the original algorithm to the gradient operation of the Prewitt operator, which is suitable for processing images with complicated grayscale gradients, and can better segment SAR images. Considering that adding one dimension to the dimension can reduce the efficiency of the algorithm, the idea of decomposition is used to split the three-dimensional maximum between-class variance into three one-dimensional maximum between-class variance algorithms. Through experiments with two sets of SAR images, the results show that the improved three-dimensional maximum between-class variance algorithm proposed in this paper is feasible, and it is better than the one-dimensional and two-dimensional maximum between-class variance algorithms in terms of sea-land segmentation effect, and better than the traditional three-dimensional maximum between-class variance algorithm in terms of computational complexity.

Key words: synthetic aperture radar (SAR); sea-land segmentation; maximum between-class variance; threshold selection

0 引言

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)能够无间断全天24小时工作,并且在恶劣天气情况下也能提供高分辨率的SAR图像,因此通过SAR图像进行目标检测在民用的海上监测^[1]和军事的信息获取^[2]等方面都有重要作用。SAR图像舰船目标检测的对象是海上的目标,理想条件下获取到的SAR图像中不含有较多干扰,海面散射系数较低,表现为暗的区域,实际上获取到的SAR图像一般都含有海岸、小岛等强散射区域,陆地中包含一些金属材质的设备等具有较强的后向散射系数,同时受海面风浪的影响,海面回波信号有时候强于陆地回波信号,这些都会极大地干扰目标检测结果,对目标检测产生影响,使得检测率降低,虚警率提高,所以在SAR图像目标检测前需要进行海陆分离的预处理操作,将海面和陆地分隔开,除去陆地对检测的影响,同时确定目标检测的范围,再从海面区域进行舰船检测,从而减小检测过程中产生的虚警率,提高检测率。SAR图像的海陆分割通过有无先验信息可以分为两大类:有先验信息的方法需要预知相关地理信息^[3],虽然速度快但是有较大的局限性;没有先验地理信息的方法主要依据图像中灰度^[4]、纹理^[5]、海岸线^[6]、活动轮廓^[7]等特征差异来进行海陆分割,其中最大类间方差是最常用的一种灰度阈值分割算法,该算法原理简单易于实现,运算量相对较低,但是对噪声较敏感,容易受较复杂背景的干扰。此外,SAR图像在成像中会产生相干斑噪声,使得SAR图像中海面和陆地对比度降低,边缘轮廓细节模糊,海陆分割难度增加。由此在岛岸背景条件下采用改进的三维最大类间方差的海陆分割方法。

1 算法理论基础

最大类间方差算法(Maximum Between Class Variance, Otsu)最早在1979年被提出,它是一种经典的自适应阈值分割算法^[8]。算法以类间方差作为分割效果的判定标准,当类间方差为最大值时分割效果最好^[9]。

1) 一维Otsu算法

假设SAR图像一共有 $M \times M$ 个像素,像素灰

度 i 在0~255范围内取值,假定 n_i 为各级灰度值出现的次数,可以计算出灰度值为 i 的像素在总像素点中所占的比例为

$$p_i = n_i / (M \times M) \quad (1)$$

p_i 满足如下关系式:

$$\sum p_i = 1, p_i \geq 0 \quad (2)$$

SAR图像根据假定的最佳阈值 T 可分为前景和背景两大类,用 C_0 表示前景类的像素, $C_0 \in \{0, 1, \dots, T-1\}$,其灰度值均小于最佳阈值;用 C_1 表示背景类的像素,其灰度值均大于等于最佳阈值, $C_1 \in \{T, \dots, 255\}$ 。

前景和背景像素出现概率的计算公式分别为

$$p_0 = \sum_{i=0}^{T-1} p(i) \quad (3)$$

$$p_1 = \sum_{i=T}^{255} p(i) = 1 - p_0 \quad (4)$$

前景和背景对应的像素平均灰度值计算公式分别为

$$\mu_0 = \sum_{i=0}^{T-1} ip_i / \sum_{j=0}^{T-1} p_j = \sum_{i=0}^{T-1} ip_i / p_0 \quad (5)$$

$$\mu_1 = \sum_{i=T}^{255} ip_i / \sum_{j=T}^{255} p_j = \sum_{i=T}^{255} ip_i / p_1 \quad (6)$$

整幅SAR图像的平均灰度值为

$$\mu = \sum_{i=0}^{255} ip_i \quad (7)$$

类间方差的计算公式为

$$\sigma = p_0(\mu_0 - \mu)^2 + p_1(\mu_1 - \mu)^2 \quad (8)$$

当类间方差取最大值时,海陆分割的最佳阈值 T 如下:

$$T = \arg \max(\sigma^2) \quad (9)$$

在计算分割阈值时,一维Otsu算法以类间方差作为评估标准。SAR图像中的所有像素灰度级别都可被视为分类阈值,每个级别分别对应其类间方差。随后,根据类间方差的计算公式,对类间方差矢量中的所有结果进行比较,当类间方差达到最大值时,前景类和背景类的分类效果最好。此时的分割最佳阈值使得前景类与背景类离图像中心最远^[10]。一维Otsu算法基于图像的一维灰度,通常适用目标和背景灰度特性差异较大的SAR图像。然而在真实获取的SAR图像中,前景和背景的灰度特性可能区别不大,这种情况下一维直方图可能表现不佳。

2) 二维 Otsu 算法

二维最大类间方差算法^[4]在一维最大类间方差算法的原有基础上,增加像素的平均灰度值这一维度,更好地平滑了 SAR 图像包含的相干斑噪声。通过 SAR 图像的空间信息对原始 SAR 图像进行均值计算,综合考虑像素的灰度值和平均灰度值两个维度,二维直方图区域划分如图 1 所示。由于像素的邻域平均值和像素值之间存在显著的相关性,因此通过统计二维直方图可以比一维直方图更好地区分目标和背景,最佳阈值可根据两个维度的准则来确定。

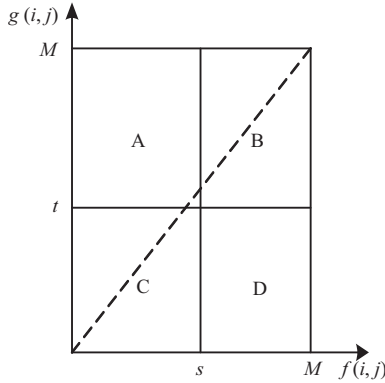


图 1 二维灰度直方图的具体区域划分

$f(i,j)$ 定义为原始 SAR 图像中 (i,j) 点的像素值, $g(i,j)$ 定义为平滑后 SAR 图像中 (i,j) 点的像素值, 计算原始 SAR 图像 (i,j) 范围内像素平均值可得到 $g(i,j)$ 。 $f(i,j)$ 和 $g(i,j)$ 的灰度值范围都在 0~255 之间, 所以 $g(i,j)$ 的定义如下:

$$g(i,j) = \frac{1}{9} \sum_{\Delta i=-1}^1 \sum_{\Delta j=-1}^1 f(i + \Delta i, j + \Delta j) \quad (10)$$

假设 SAR 图像的大小为 $M \times M$, 其中每个像素值为 x , 平滑后的 SAR 图像中像素值为 y , 像素点 x 和 y 出现的频次为 $n_{x,y}$, 则 $n_{x,y}$ 出现的概率为

$$p_{x,y} = n_{x,y} / (M \times M), \sum_{x=0}^{255} \sum_{y=0}^{255} p_{x,y} = 1 \quad (11)$$

在图 1 中, $f(i,j)$ 和 $g(i,j)$ 是二维直方图的横轴和纵轴, 分别表示原始 SAR 图像和平滑 SAR 图像的像素值。根据二维直方图区域划分可观察到: A 区域中 $f(i,j) < g(i,j)$, 表示图像的像素值比平滑图像相同位置的像素值小很多, 所以此类像素点被判定为边缘像素点; 相反在 D 区域中, $f(i,j) > g(i,j)$ 表示原始图像的像素比平滑图像相同位置

的像素值大很多, 所以此类像素点被判定为噪声点, 需要被剔除掉。B 和 C 区域分别代表背景和前景类别。在利用二维阈值进行 SAR 图像分割时, 假设 A、D 区域内没有像素, 忽略 A、D 区域内的噪声点和边缘点带来的影响, 得到 $p_A = 0, p_D = 0$, 所以前景类别出现的概率为

$$w_0 = \sum_{x=0}^{s-1} \sum_{y=0}^{t-1} p_{x,y} \quad (12)$$

背景类别出现的概率计算公式如下:

$$w_1 = \sum_{x=s}^{255} \sum_{y=t}^{255} p_{x,y} = 1 - w_0 \quad (13)$$

前景和背景两个类别的像素平均灰度值定义为

$$\mu_0 = (\mu_{0,x}, \mu_{0,y})^T = \left(\sum_{x=0}^{s-1} \sum_{y=0}^{t-1} x p_{x,y} / w_0, \sum_{x=0}^{s-1} \sum_{y=0}^{t-1} y p_{x,y} / w_0 \right)^T \quad (14)$$

$$\mu_1 = (\mu_{1,x}, \mu_{1,y})^T = \left(\sum_{x=s}^{255} \sum_{y=t}^{255} x p_{x,y} / w_1, \sum_{x=s}^{255} \sum_{y=t}^{255} y p_{x,y} / w_1 \right)^T \quad (15)$$

整幅 SAR 图像的平均灰度值为

$$\mu = (\mu_x, \mu_y)^T = \left(\sum_{x=0}^{255} \sum_{y=0}^{255} x p_{x,y}, \sum_{x=0}^{255} \sum_{y=0}^{255} y p_{x,y} \right)^T \quad (16)$$

类间方差计算公式如下:

$$\sigma_B = w_0 \left[(\mu_0 - \mu)(\mu_0 - \mu)^T \right] + w_1 \left[(\mu_1 - \mu)(\mu_1 - \mu)^T \right] \quad (17)$$

定义矩阵的迹作为衡量类间方差大小的标准:

$$\begin{aligned} \text{tr}(\sigma_B) &= w_0 \left((\mu_{0,i} - \mu_i)^2 + (\mu_{0,j} - \mu_j)^2 \right) + \\ &w_1 \left((\mu_{1,i} - \mu_i)^2 + (\mu_{1,j} - \mu_j)^2 \right) = \\ &\frac{\left(\sum_{i=0}^2 \sum_{j=0}^t i p_{ij} - w_0 \mu_i \right)^2 + \left(\sum_{i=0}^s \sum_{j=0}^t j p_{ij} - w_0 \mu_j \right)^2}{w_0(1-w_0)} \end{aligned} \quad (18)$$

当矩阵的迹达到最大值时, 最佳阈值 (s^*, t^*) 公式如下:

$$(s^*, t^*) = \arg \max \{ \text{tr} \sigma_B(s, t) \}, 1 \leq s, t \leq L \quad (19)$$

对应的二维阈值函数定义如下:

$$f_{s^*, t^*}(x, y) = \begin{cases} 1, f(x, y) < s^* \text{ 且 } g(x, y) < t^* \\ 0, f(x, y) \geq s^* \text{ 且 } g(x, y) \geq t^* \end{cases} \quad (20)$$

使用阈值进行图像分割, 将 SAR 图像中灰度值超过阈值的像素划分为岛岸背景类同时标记为 1, 将灰度值低于阈值的像素划分为海洋前景类并标记为 0, 分割结果呈现为二值图像。当存在海洋

区域的灰度值高于阈值或者陆地区域的灰度值低于阈值时,在二值图像中陆地区域会出现小缝隙或者小孔洞,海洋区域可能出现孤立的亮点。为了改善二值图像使得后续舰船目标检测效果更好,采用形态学处理方法^[11],包括膨胀、腐蚀、开闭运算等操作,来填充岛岸区域的孔洞缝隙,使其形成一个整体。

3) 传统三维 Otsu 算法

二维 Otsu 算法适用范围不够普遍,在低信噪比、复杂背景等特殊条件下分割效果较差,由此在二维基础上引入第三维度像素的邻域中值,得到三维 Otsu 算法^[12],此算法能够更好地分割低对比度、低信噪比的 SAR 图像。

假设任意一幅 SAR 图像的灰度等级为 L , 像素点 (x, y) 处的灰度值用 $f(x, y)$ 来表示, 在每个像素点 (x, y) 处计算 $k \times k$ 邻域内的均值 $g(x, y)$ 和邻域中值 $h(x, y)$, 表达式如下:

$$g(x, y) = \frac{1}{k^2} \sum_{m=-k/2}^{k/2} \sum_{n=-k/2}^{k/2} f(x+m, y+n) \quad (21)$$

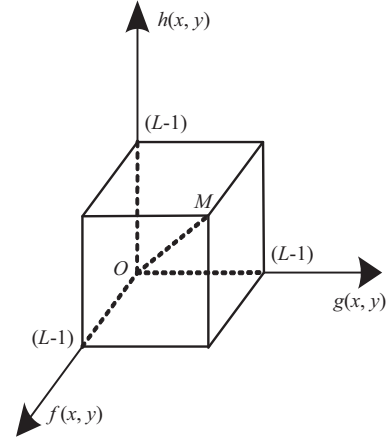
$$h(x, y) = \text{Med} \{ f(x+m, y+n) | -k/2 \leq m \leq k/2, -k/2 \leq n \leq k/2 \} \quad (22)$$

由上式可知 $g(x, y)$ 和 $h(x, y)$ 的灰度级数也为 L 。由此形成像素点 (x, y) 的一个三维向量 $(f(x, y), g(x, y), h(x, y))$, 并且 3 个维度的变化范围相同皆为 $[0, L-1]$ 。3 个维度分别定义三元组 $(f(x, y), g(x, y), h(x, y))$ 的值域, 也就是三维直方图的含义, 其定义域为 $L \times L \times L$ 的一个立方体, 如图 2 所示, 直方图中定义某点为 p_{mnk} , 根据直方图的定义可知其表示向量 (m, n, k) 发生的频率, 发生的频数用 C_{mnk} 来表示, 则 p_{mnk} 可由式 (23) 求得:

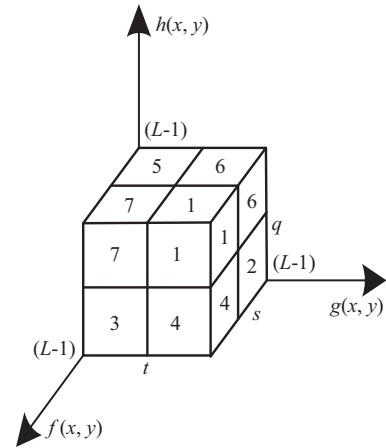
$$p_{mnk} = \frac{C_{mnk}}{M \times N} \quad (0 \leq m, n, k < L-1) \quad (23)$$

假设某点 (s, t, q) 定义为最佳阈值点, 三维直方图被划分为图 2(b) 八个区域^[13], 具体划分如图 2 所示。SAR 图像是由暗背景和亮目标组成的, 目标和背景之间的像素点关联性较强, 所以 s, t, q 三个的值接近, 根据分析把 $(0, 0, 0)$ 到 (s, t, q) 为对角线的长方体区域 0 判定为背景, 把 (s, t, q) 到 $(L-1, L-1, L-1)$ 为对角线的长方体区域 1 判定为目标。除去目标背景区域外的噪声和边缘像素关联

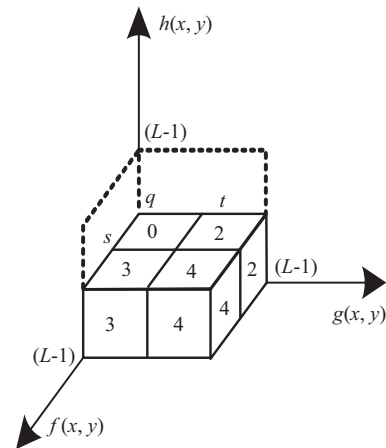
性较弱, s, t, q 三个的值相差较大, 所以由区域 2~7 表示。在一幅 SAR 图像中, 噪声和边缘的像素点个数远少于目标和背景区域的像素点个数, 因此假设长方体区域 2~7 的概率之和近似为 0 来实现去噪的目标。



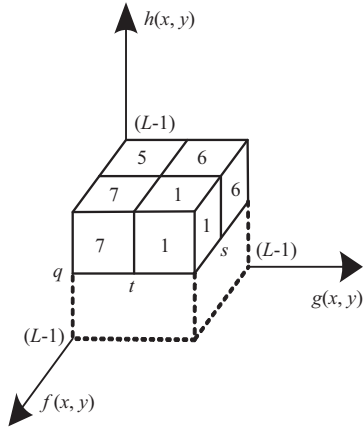
(a) 三维直方图定义域



(b) 整体区域划分



(c) 区域 0、2、3、4 划分



(d) 区域 1、5、6、7 划分

图 2 三维直方图具体划分方法

其中区域 0 和区域 1 表示背景和区域, 分别记为 C_0 和 C_1 , 二者的概率分布不同, 根据上文选取的最佳阈值点对 SAR 图像进行分割, C_0 和 C_1 区域各自发生的概率为

$$w_0 = P_r(C_0) = \sum_{m=0}^s \sum_{n=0}^t \sum_{k=0}^q p_{mnk} = w_0(s, t, q) \quad (24)$$

$$w_1 = P_r(C_1) = \sum_{m=s+1}^{L-1} \sum_{n=t+1}^{L-1} \sum_{k=q+1}^{L-1} p_{mnk} = w_1(s, t, q) \quad (25)$$

背景和区域分别对应的均值矢量定义为

$$\begin{aligned} \mu_0 &= (\mu_{0m}, \mu_{0n}, \mu_{0k})^T = \\ &= \left(\sum_{m=0}^s m p_r(m|C_0), \sum_{n=0}^t n p_r(n|C_0), \sum_{k=0}^q k p_r(k|C_0) \right)^T = \\ &= \left(\sum_{m=0}^s \sum_{n=0}^t \sum_{k=0}^q m p_{mnk} / w_0(s, t, q), \right. \\ &\quad \left. \sum_{m=0}^s \sum_{n=0}^t \sum_{k=0}^q n p_{mnk} / w_0(s, t, q), \right. \\ &\quad \left. \sum_{m=0}^s \sum_{n=0}^t \sum_{k=0}^q k p_{mnk} / w_0(s, t, q) \right)^T \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \mu_1 &= (\mu_{1m}, \mu_{1n}, \mu_{1k})^T = \\ &= \left(\sum_{m=s+1}^{L-1} m p_r(m|C_1), \sum_{n=t+1}^{L-1} n p_r(n|C_1), \right. \\ &\quad \left. \sum_{k=q+1}^{L-1} k p_r(k|C_1) \right)^T = \\ &= \left(\sum_{m=s+1}^{L-1} \sum_{n=t+1}^{L-1} \sum_{k=q+1}^{L-1} m p_{mnk} / w_1(s, t, q), \right. \\ &\quad \sum_{m=s+1}^{L-1} \sum_{n=t+1}^{L-1} \sum_{k=q+1}^{L-1} n p_{mnk} / w_1(s, t, q), \\ &\quad \sum_{m=s+1}^{L-1} \sum_{n=t+1}^{L-1} \sum_{k=q+1}^{L-1} k p_{mnk} / w_1(s, t, q) \right)^T \end{aligned} \quad (27)$$

三维直方图总体均值向量为

$$\begin{aligned} \mu_T &= (\mu_{Tm}, \mu_{Tn}, \mu_{Tk})^T = \left(\sum_{m=0}^{L-1} \sum_{n=0}^{L-1} \sum_{k=0}^{L-1} m p_{mnk}, \right. \\ &\quad \left. \sum_{m=0}^{L-1} \sum_{n=0}^{L-1} \sum_{k=0}^{L-1} n p_{mnk}, \sum_{m=0}^{L-1} \sum_{n=0}^{L-1} \sum_{k=0}^{L-1} k p_{mnk} \right)^T \end{aligned} \quad (28)$$

由长方体区域 2~7 的概率之和近似为 0 可推出

$$\begin{aligned} w_0 + w_1 &\approx 1 \\ \mu_T &\approx w_0 \mu_0 + w_1 \mu_1 \end{aligned} \quad (29)$$

在目标区域和背景区域两类之中定义类间散度矩阵:

$$\begin{aligned} \sigma_B &= w_0 [(\mu_0 - \mu_T)(\mu_0 - \mu_T)^T] + \\ &\quad w_1 [(\mu_1 - \mu_T)(\mu_1 - \mu_T)^T] \end{aligned} \quad (30)$$

根据最大类间方差思想可知矩阵 σ_B 的迹 $\text{tr} \sigma_B$ 为目标区域和背景区域两类的类间散度函数, 求迹的公式如下^[14]:

$$\begin{aligned} \text{tr} \sigma_B(s, t, q) &= w_0 [(\mu_{0m} - \mu_{Tm})^2 + (\mu_{0n} - \mu_{Tn})^2 + \\ &\quad (\mu_{0k} - \mu_{Tk})^2] + w_1 [(\mu_{1m} - \mu_{Tm})^2 + \\ &\quad (\mu_{1n} - \mu_{Tn})^2 + (\mu_{1k} - \mu_{Tk})^2] = \\ &\quad \frac{[\mu_m - w_0 \mu_{Tm}]^2 + [\mu_n - w_0 \mu_{Tn}]^2 + [\mu_k - w_0 \mu_{Tk}]^2}{w_0(1 - w_0)} \end{aligned} \quad (31)$$

最终, 满足上式使得迹的值最大的向量取值 $T_{(s_0, t_0, q_0)}$

即为最佳阈值, 公式如下:

$$T_{(s_0, t_0, q_0)} = \arg \max_{0 \leq s, t, q \leq L-1} \{ \text{tr} \sigma_B(s, t, q) \} \quad (32)$$

2 改进三维 Otsu 算法

2.1 三维 Otsu 算法阈值的选取及表达

在二维 Otsu 算法理论上增加一个维度得到三维 Otsu 算法, 分割效果明显提升, 传统的三维 Otsu 算法是以像素灰度值-邻域平均灰度值-邻域中值灰度值 3 个维度对 SAR 图像进行分割, 适用于去除含有椒盐噪声的图像, 但对于 SAR 图像中的目标边缘轮廓和具体细节处理效果一般, 为了后续更精确的 SAR 图像目标检测和识别技术的研究, 三维 Otsu 算法中的第三维选择运用 Prewitt 算子的梯度运算, 该算子适用于处理噪声较多和灰度渐变的图像, 针对低对比度的 SAR 图像可以更好地进行噪声抑制。

Prewitt 算子的本质是一阶微分算子的边缘检测, 综合考虑像素点上下和左右邻点灰度数值的差值, 在图像边缘达到最大值从而对边缘区域进

行检测,去除部分可能存在的伪边缘,对噪声具有平滑的效果^[15]。其主要原理是在图像空间利用水平、竖直两个方向模板与原始SAR图像进行邻域卷积,一个方向模板用来检测垂直边缘,另一个用来检测水平边缘。针对SAR图像中某点 $f(m, n)$,Prewitt算子的计算公式如下:

水平方向的一阶微分为

$$\nabla f_m(m, n) = f(m-1, n+1) + f(m, n+1) + f(m+1, n+1) - f(m-1, n-1) - f(m, n-1) - f(m+1, n-1) \quad (33)$$

垂直方向的一阶微分为

$$\nabla f_n(m, n) = f(m-1, n-1) + f(m-1, n) + f(m-1, n+1) - f(m+1, n-1) - f(m+1, n) - f(m+1, n+1) \quad (34)$$

则梯度的计算公式为

$$G[f(m, n)] = \sqrt{\nabla f_m(m, n)^2 + \nabla f_n(m, n)^2} \quad (35)$$

式中 $f(m, n)$ 定义为像素点 (m, n) 的灰度值。

2.2 分解的三维Otsu算法

传统的三维Otsu方法考虑了像素灰度值、像素邻域平均灰度值、像素邻域中值灰度值这3个维度,会导致计算复杂度很高,针对这个问题,采用分解的思想^[16],将三维Otsu降低维度变成3个一维Otsu,假设有一幅 $M \times M$ 个像素的SAR图像,像素灰度值为 L ,其中三元组 (x, y, z) 出现的次数为 C_{xyz} ,由此可推出 x, y, z 三个维度出现的次数分别为

$$\begin{cases} f_x = \sum_{y=0}^{L-1} \sum_{z=0}^{L-1} C_{xyz} \\ g_y = \sum_{x=0}^{L-1} \sum_{z=0}^{L-1} C_{xyz} \\ h_z = \sum_{x=0}^{L-1} \sum_{y=0}^{L-1} C_{xyz} \end{cases} \quad (36)$$

则 x, y, z 三个维度发生的概率分别为

$$\begin{cases} Q_x = \sum_{y=0}^{L-1} \sum_{z=0}^{L-1} C_{xyz} \\ R_y = \sum_{x=0}^{L-1} \sum_{z=0}^{L-1} C_{xyz} \\ H_z = \sum_{x=0}^{L-1} \sum_{y=0}^{L-1} C_{xyz} \end{cases} \quad (37)$$

以上3个概率作为 x, y, z 的一维直方图的值,其中 $0 \leq x, y, z \leq L-1$ 。根据最大类间方差的算法原理,通过式(38)~(40)可获得求取最佳阈值 s, t, q 的参数^[17]。

灰度值 x 的类间方差为

$$\sigma_{Bx}(s) = \left(\sum_{x=0}^s Q_x \right) \left(\frac{\sum_{x=0}^s x Q_x}{\sum_{x=0}^s Q_x} - \sum_{x=0}^{L-1} x Q_x \right)^2 + \left(\sum_{x=s+1}^{L-1} Q_x \right) \left(\frac{\sum_{x=s+1}^{L-1} x Q_x}{\sum_{x=s+1}^{L-1} Q_x} - \sum_{x=0}^{L-1} x Q_x \right)^2 \quad (38)$$

邻域均值 y 的类间方差为

$$\sigma_{By}(t) = \left(\sum_{y=0}^t R_y \right) \left(\frac{\sum_{y=0}^t y R_y}{\sum_{y=0}^t R_y} - \sum_{y=0}^{L-1} y R_y \right)^2 + \left(\sum_{y=t+1}^{L-1} R_y \right) \left(\frac{\sum_{y=t+1}^{L-1} y R_y}{\sum_{y=t+1}^{L-1} R_y} - \sum_{y=0}^{L-1} y R_y \right)^2 \quad (39)$$

梯度值 z 的类间方差为

$$\sigma_{Bz}(q) = \left(\sum_{z=0}^q H_z \right) \left(\frac{\sum_{z=0}^q z H_z}{\sum_{z=0}^q H_z} - \sum_{z=0}^{L-1} z H_z \right)^2 + \left(\sum_{z=q+1}^{L-1} H_z \right) \left(\frac{\sum_{z=q+1}^{L-1} z H_z}{\sum_{z=q+1}^{L-1} H_z} - \sum_{z=0}^{L-1} z H_z \right)^2 \quad (40)$$

由以上三式可推出最佳阈值 $T_{(s_0, t_0, q_0)}$ 中3个阈值分别为

$$\begin{cases} s_0 = \arg \max \sigma_{Bx}(s) \\ t_0 = \arg \max \sigma_{By}(t) \\ q_0 = \arg \max \sigma_{Bz}(q) \end{cases} \quad (41)$$

以上的分解思想是将原来的求解1个三元函数 $T_{(s_0, t_0, q_0)}$ 的最优解,拆分成求解3个一元函数 $\sigma_{Bx}(s)$ 、 $\sigma_{By}(t)$ 和 $\sigma_{Bz}(q)$ 的最优解,原来的传统方法是在 $L \times L \times L$ 的一个立方体直方图内搜索求解,

本文是在 3 个长为 L 的一维直方图内搜索求解,将 3 个一维算法求得的最佳阈值 s, t, q 作为本文改进的三维最大类间方差算法的最佳阈值。

算法流程图如图 3 所示。

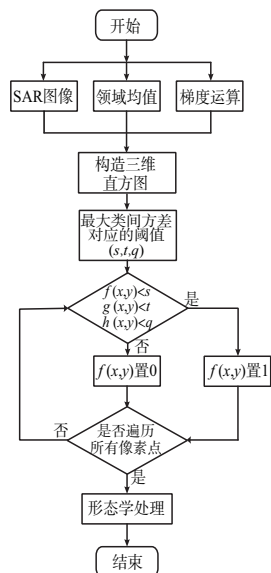
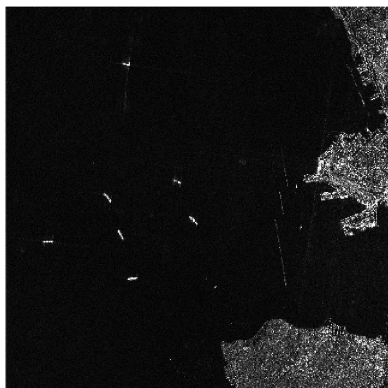


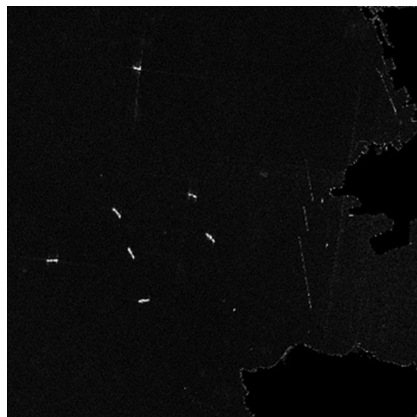
图 3 三维 Otsu 的海陆分割算法流程图

3 实验结果和分析

实验 1 首先采用常规的 SAR 海岸图像来验证基于改进三维最大类间方差的 SAR 图像海陆分割算法的可行性与有效性。图 4(a) 为高分 3 号 (GF-3) C 波段的常规背景下的 SAR 图像, 图像中包含海面和岛岸区域, 大小为 3 000 像素 × 3 000 像素, 图 4(b) 为改进的三维最大类间方差算法海陆分割结果。从图 4(b) 中可以看出, 经过改进的三维最大类间方差的海陆分割算法后, 常规背景下的 SAR 图像中的岛岸背景被有效地去除掉。



(a) 常规背景下的原始图像

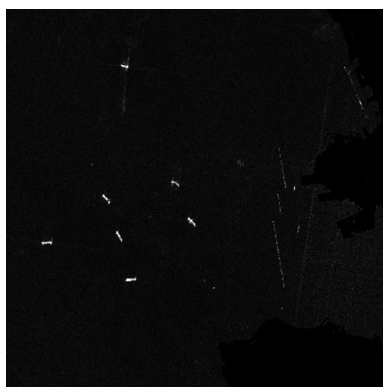


(b) 改进三维 Otsu 算法分割结果图

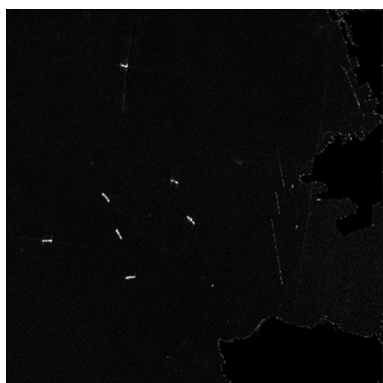
图 4 常规背景海陆分割算法结果图

实验 2 为了验证分解的思想在算法中的可行性, 统计同一幅图像在运用三维直方图 Otsu 算法和分解的三维 Otsu 算法进行海陆分割后陆地去除的概率是否相近。在算法基础上提出分割思想的前提是假设图 2 三维直方图这一立方体区域中噪声所在区域 2~7 远离目标和背景, 这些区域视为噪声概率之和近似为零来达到去噪的目的, 在这种条件下采用分解的思想会得到和三维最大类间方差算法相同的阈值。但是实际的 SAR 图像中不可能完全没有噪声, 使得采用分解的三维 Otsu 算法性能下降, 但是本文采用改进的三维最大类间方差算法, 考虑到了像素邻域均值和梯度多个维度, 具有比较优越的去噪声能力, 可以更好地进行噪声抑制, 将目标区域和背景区域分割, 算法复杂度也从 $O(L^3)$ 变为 $O(L + L + L) = O(L)$, 所以采用分解的三维 Otsu 算法进行海陆分割可以在保证性能的前提下, 减少算法的运行时间, 有效地提升算法效率, 非常适用于尺寸很大的 SAR 图像。图 5(a) 为使用三维直方图分割算法处理后的海陆分割结果, 图 5(b) 为使用本文提出的基于分解思想的改进三维最大类间方差算法得到的海陆分割结果, 可以看出本文算法能够有效地去除陆地。

表 1 中统计了两种算法去除陆地的效果和各自所用时间, 其中去除陆地的效果主要统计了去除陆地数量占总陆地数量的百分比, 可以看出采用分解思想可以有效地去除陆地, 海陆分割效果近似达到原三维 Otsu 算法的效果, 但是本文算法的第三维采用梯度算子可以更有效地滤除噪声,



(a) 三维直方图Otsu算法的分割结果图



(b) 改进三维Otsu算法分割结果图

图5 验证分解思想可行性的对比结果图

表1 两种算法的海陆分割性能和所需时间

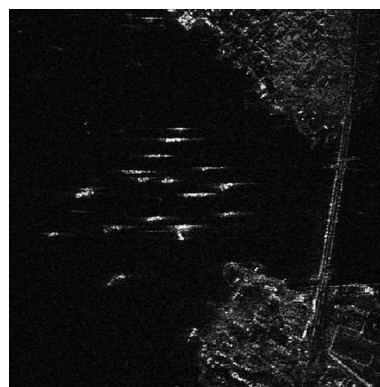
算法	性能/%	时间/ms
原三维Otsu	96.32	2×10^4
分解的三维Otsu	91.78	5×10^2

同时算法效率提高很多,在保证算法性能的前提下节省许多时间。

实验3分别采用包含复杂岛岸区域的某跨海大桥的实测SAR图像和使用RADARSAT-1卫星获取的大尺寸包含岛岸区域的SAR图像来测试基于改进三维最大类间方差的SAR图像海陆分割算法在复杂岛岸背景条件下的性能,图6(a)和图7(a)为原始SAR图像,可以看出岛岸区域和舰船目标都表现出区别于背景的高亮像素的聚集区域,图6(b)和图7(b)为一维最大类间方差算法海陆分割结果二值图,图6(c)和图7(c)为二维最大类间方差算法海陆分割结果二值图,图6(d)和图7(d)为传统三维最大类间方差算法海陆分割结果二值图,图6(e)和图7(e)为本文提出的改进三维最大类间方差算法海陆分割结果二值图,岛岸区域像

素灰度为1,表现为亮的部分;海洋区域像素灰度为0,表现为暗的部分。分别对比4种算法的结果二值图可以看出,经过一维、二维和传统三维分割算法后,原始图像中的岛岸背景大部分没有被剔除掉。本文提出的改进三维最大类间方差的SAR图像海陆分割算法效果最好,可以很好地将陆地区域剔除掉。

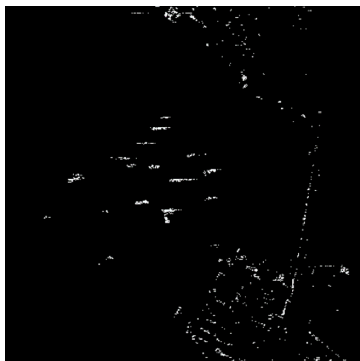
但是存在一种情况:陆地区域中的某些区域亮度低,导致该区域被错误地归属到海面类别,相反海洋区域较强的杂波被错误归到岛岸陆地类别,所以采用形态学处理的方法,一方面消除海面上的较小孤立亮点,另一方面填补陆地上的细小孔洞,使陆地大面积地连接为一个整体。然后将二值图像中像素灰度值为1的像素数量统计出面积,若比原始SAR图像中最大的舰船目标的面积还要大,则判定为陆地区域。最终去除岛岸陆地区域的海陆分割结果如图6(f)和图7(f)所示,根据图6(f)和图7(f)可以看出,原始SAR图像的岛岸陆地区域被有效地剔除掉,从而减少陆地对舰船目标检测的干扰,对后续舰船目标检测性能有很大提升。



(a) 场景1原始图像



(b) 一维Otsu算法分割二值图



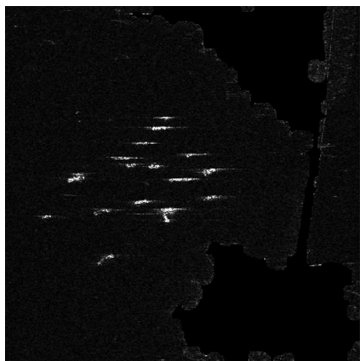
(c) 二维 Otsu 算法分割二值图



(d) 传统三维 Otsu 算法分割二值图

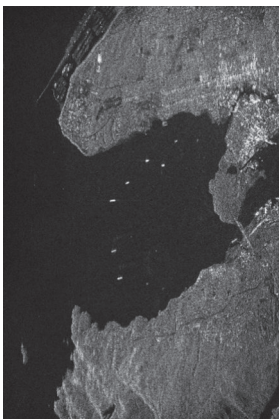


(e) 改进三维 Otsu 算法分割二值图

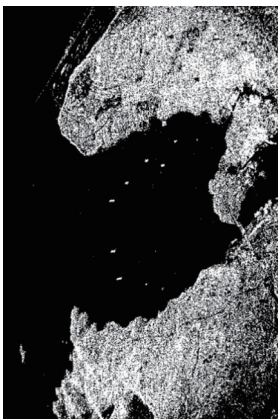


(f) 改进算法处理后的分割结果图

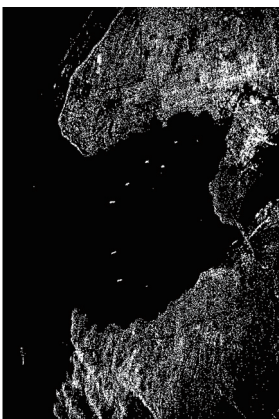
图 6 场景 1 海陆分割算法结果图



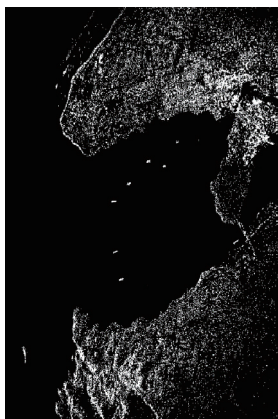
(a) 场景 2 原始图像



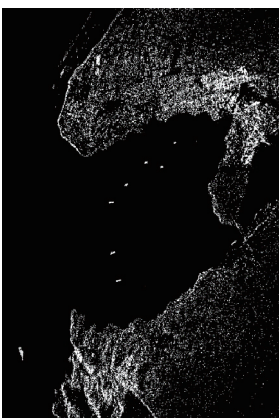
(b) 一维 Otsu 算法分割二值图



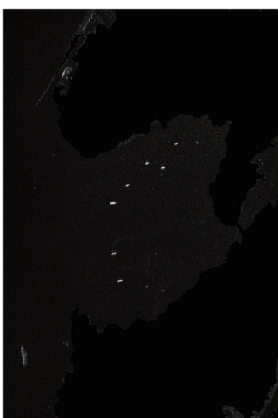
(c) 二维 Otsu 算法分割二值图



(d) 传统三维 Otsu 算法分割二值图



(e) 改进三维 Otsu 算法分割二值图



(f) 改进算法处理后的分割结果图

图 7 场景 2 海陆分割算法结果图

在图像分割中,通常有两个评价准则来有效评价分割方法对 SAR 图像的分割效果,分别是:区域相似度(UR)与区域差异性(DR)^[18],它们的计算公式分别如下:

$$UR = 1 - \frac{1}{N} \sum_{k=1}^2 \frac{\sum_{(x,y) \in R_k} \left[I(x,y) - \frac{1}{N_k} \sum_{(x,y) \in R_k} I(x,y) \right]^2}{\left[\max_{(x,y) \in R_k} I(x,y) - \min_{(x,y) \in R_k} I(x,y) \right]^2} \quad (42)$$

$$DR = \frac{\left| \frac{1}{N_1} \sum_{(x,y) \in R_1} I(x,y) - \frac{1}{N_2} \sum_{(x,y) \in R_2} I(x,y) \right|}{\max_{(x,y) \in I} I(x,y) - \min_{(x,y) \in I} I(x,y)} \quad (43)$$

$I(x, y)$ 表示 SAR 图像某点 (x, y) 的灰度值, N_1 和 N_2 分别是前景类和背景类的像素个数, N 是 SAR 图像 I 的总像素个数。 UR 表示不同区域的相似程度, DR 表示不同区域的差异大小, UR 和 DR 的取值范围都为 $[0, 1]$, 并且二者的数值越大, 代表图像分割效果更好。 4 种算法在不同场景下的两种指标数值如表 2 所示。

表 2 4 种算法的 SAR 图像分割结果指标

算法	指标	场景 1	场景 2
一维 Otsu	UR	0.384 2	0.103 1
	DR	0.368 6	0.225 4
二维 Otsu	UR	0.796 1	0.471 0
	DR	0.581 0	0.318 2
传统三维 Otsu	UR	0.871 3	0.695 2
	DR	0.695 5	0.513 6
本文改进三维 Otsu	UR	0.915 7	0.724 5
	DR	0.742 3	0.575 0

表 2 给出了包含复杂岛岸背景的两场景 SAR 图像在 4 种算法下的图像分割结果的评价指标数值。 从表中 UR 和 DR 两个指标的数值可以定量分析, 改进的三维最大类间方差的图像分割算法相较于一维、二维和传统三维分割算法效果更优。

4 结束语

在较复杂岛岸背景条件下, 本文提出了一种基于改进三维最大类间方差的 SAR 图像海陆分割算法, 一方面相较于一维和二维最大类间方差算法有更好的 SAR 图像海陆分割效果, 准确性方面有很大的提升; 另一方面比传统三维最大类间方差算法分割效率更高, 能够更有效地保留图像细节和边缘信息, 根据三维直方图的区域划分可以将立方体的对角线区域定义为图像目标和背景所

在区域, 而其他远离对角线的区域定义为边缘噪声基本忽略不计, 在这一特点的基础上, 采用分解的思想, 将 3 个维度拆分成 3 个一维, 算法的计算复杂度从 $O(L^3)$ 降为 $O(L)$, 性能提升的同时实时性也进行了提升。 将一维、二维和传统三维 Otsu 与本文算法对比, 可以看出本文算法的 SAR 图像海陆分割效果更好, 对后续的认识、跟踪技术研究更有利。

参考文献:

- [1] WEI Shunjun, SU Hao, MING Jing, et al. Precise and Robust Ship Detection for High-Resolution SAR Imagery Based on HR-SDNet[J]. Remote Sensing, 2020, 12(1): 167-196.
- [2] 曾祥书, 黄一飞, 蒋忠进. 基于 YOLOX 网络的 SAR 图像舰船目标检测[J]. 雷达科学与技术, 2023, 21(3): 255-263.
- [3] XU Changgui, ZHANG Bo, GE Ji, et al. Faster Ship Detection Algorithm in Large-Scene SAR Images[C]//2022 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Kuala Lumpur, Malaysia: IEEE, 2022: 635-638.
- [4] DU Yun, YUAN Hanliu, JIA Kejin, et al. Research on Threshold Segmentation Method of Two-Dimensional Otsu Image Based on Improved Sparrow Search Algorithm[J]. IEEE Access, 2023, 11: 70459-70469.
- [5] FAN Shuchen, SUN Yuhe, SHUI Penglang. Region-Merging Method with Texture Pattern Attention for SAR Image Segmentation[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2021, 18: 112-116.
- [6] LIU Chun, LUO Yi, YANG Jian, et al. Coastline Detection in Polarimetric SAR Images Based on Freeman Decomposition and Three-Region Markov Random Field Segmentation[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2024, 21: 1-5.
- [7] YE Xinghuo, WANG Qianyi. Active Contour Image Segmentation Method for Training Talents of Computer Graphics and Image Processing Technology[J]. IEEE Access, 2021, 9: 19187-19194.
- [8] 董忠言, 蒋理兴, 王俊亚, 等. 基于图像复杂度的一维 Otsu 改进算法[J]. 计算机科学, 2015, 42(S1): 171-174.
- [9] 黄雪滢. SAR 图像海上舰船目标检测算法[D]. 大连: 大连海事大学, 2021.
- [10] ARORA S, ACHARYA J, VERMA A, et al. Multilevel Thresholding for Image Segmentation Through a Fast Statistical Recursive Algorithm[J]. Pattern Recognition Let-

- ters, 2008, 29(2):119-125.
- [11] XIAO Mingxi, WANG Hui, ZENG Zhaoyang, et al. SAR Image Segmentation and Target Detection Based on Mathematical Morphology [C]//2021 2nd China International SAR Symposium, Shanghai, China: IEEE, 2021: 1-5.
- [12] 景晓军, 李剑峰, 刘郁林. 一种基于三维最大类间方差的图像分割算法[J]. 电子学报, 2003, 31(9):1281-1285.
- [13] 范九伦, 赵凤, 张雪峰. 三维 Otsu 阈值分割方法的递推算法[J]. 电子学报, 2007, 35(7):1398-1402.
- [14] 吕燕, 龚劬. 加权三维 Otsu 方法在图像分割中的应用[J]. 计算机应用研究, 2011, 28(4):1576-1579.
- [15] 刘直芳, 王运琼, 朱敏. 数字图像处理与分析[M]. 北京:清华大学出版社, 2006.
- [16] 岳峰, 左旺孟, 王宽全. 基于分解的灰度图像二维阈值选取算法[J]. 自动化学报, 2009, 35(7):1022-1027.
- [17] 肖乐意. Otsu 图像分割法的改进与应用研究[D]. 长沙:湖南大学, 2020.
- [18] CHABIER S, EMILE B, ROSENBERGER C, et al. Unsupervised Performance Evaluation of Image Segmentation [J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2006(12):1-12.

作者简介:

李雨轩 女, 硕士研究生, 主要研究方向为 SAR 图像处理, SAR 图像舰船目标检测。

刘 峰 男, 博士, 教授, 主要研究方向为雷达信号处理的理论与系统设计、雷达精确制导技术和多传感器信息融合。

冉 磊 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为高速高机动 SAR 成像技术、多通道/阵列雷达成像技术。

(上接第 399 页)

- [32] WU Qingbo, LI Hongliang, MENG Fanfan, et al. Blind Image Quality Assessment Based on Multichannel Feature Fusion and Label Transfer [J]. IEEE Trans on Circuits and Systems for Video Technology, 2016, 26(3): 425-440.
- [33] LIN T, DOLLAR P, GIRSHICK R, et al. Feature Pyramid Networks for Object Detection [C]// 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Honolulu, HI, USA: IEEE, 2017: 936-944.
- [34] HE Kaiming, ZHANG Xiangyu, REN Shaoqing, et al. Deep Residual Learning for Image Recognition [C]// 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Las Vegas, NV, USA: IEEE, 2016:770-778.

作者简介:

张 驰 男, 硕士研究生, 主要研究方向为合成孔径雷达干扰评估。

安洪阳 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为合成孔径雷达认知抗干扰。

娄明悦 女, 博士研究生, 主要研究方向为认知合成孔径雷达。

李中余 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为双/多基雷达舰船目标检测与成像技术。

武俊杰 男, 博士, 教授, 主要研究方向为前视 SAR 成像技术。

杨建宇 男, 博士, 教授, 主要研究方向为新体制雷达成像技术。

(上接第 415 页)

- [10] 王立坤, 周琳, 郭琰. 基于多组重频相参积累的多普勒解模糊方法[J]. 现代雷达, 2020, 42(3):35-39.
- [11] 高飞, 谢文冲, 段克清, 等. 相控阵机载 PD 雷达波形参数系统化设计方法研究[J]. 空军预警学院学报, 2017, 31(1):23-27.

作者简介:

牛利民 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为雷达总体设计。