doi: 10.6046/gtzyyg.2017.02.10

引用格式:赵庆平. 朗伯定律的宽观测带 SAR 海冰图像分割[J]. 国土资源遥感,2017,29(2):67-71(Zhao Q P. Wide - swath SAR ice images segmentation based on Lambert's law[J]. Remote Sensing for Land and Resources,2017,29(2):67-71.)

朗伯定律的宽观测带 SAR 海冰图像分割

赵庆平1,2

(1. 淮北师范大学物理与电子信息学院,淮北 235000; 2. 淮北师范大学信息学院,淮北 235000)

摘要: 入射角效应是宽观测带 SAR 海冰图像分割的主要障碍之一。基于宽观测带 SAR 海冰图像数据,提出了一种 集成余弦朗伯定律的分割算法。为了提高分割算法对 SAR 海冰图像的适应性,充分考虑了斑点噪声和入射角效应 因素,并在区域 K - means 聚类、朗伯定律校正之后,进行区域合并。分别针对合成 SAR 海冰图像和星载 SAR 海冰 图像的实验结果表明,该算法可有效提高分割的准确性。

关键词: 入射角效应; 余弦朗伯定律; 宽观测带; 海冰; 图像分割

中图法分类号: TP 751.1 文献标志码: A 文章编号: 1001-070X(2017)02-0067-05

0 引言

海冰是各种冰类的复杂组合,具有较强的季节 性变化,影响着海上交通和海上作业,也是全球气候 变化的一个预测因子,为了更好地了解地球、改善和 保护高纬度地区的航线安全,开展海冰的精确化研 究和业务化监测十分重要。目前的星载合成孔径雷 达(synthetic aperture Radar, SAR)已经具有了业务 化海冰监测的能力,但对于特定的星载 SAR 成像系 统,海冰成像仍存在着不确定性,主要是因为相干斑 噪声和距离向入射角等的影响,前者通常被作为影 响 SAR 海冰图像分割的主要研究对象^[1-3];而后者 的影响往往被忽略,但是针对于宽观测带 SAR 海冰 图像,该影响不可忽略^[4]。由于入射角逐渐变大, 会极大地造成宽观测带 SAR 海冰图像的衰退。基 于星载宽观测带模式 SAR 数据,本文提出了一种集 成朗伯定律的分割方法。

对于宽观测带 SAR 海冰图像而言,近距(小入 射角)要比远距(大入射角)亮得多。例如,一幅由 ENVISAT ASAR 获取的 SAR 海冰图像,其入射角变 化范围达 30°,随着入射角的增加,海冰后向散射每 度衰减 0.36 dB^[5];而对于航天飞机获取的 SAR 海 冰数据而言,入射角的跨度高达 40°,入射角的影响 是显而易见的。Ulaby 等^[6-7]的研究表明,入射角效 应不仅取决于入射角,而且取决于海冰的含盐量、粗 糙度和海冰的类型。

本文选择宽观测带 SAR 海冰图像为研究对象, 综合考虑了斑点噪声和入射角效应等不确定因素, 从各类海冰固有的特性出发,将冰况图所包含的信 息转换为海冰的类内特征信息,并利用基于马尔可 夫随机场(Markov random field,MRF)对二者进行建 模,将海冰解译转化为目标函数的优化问题。通过 区域聚类、余弦朗伯定律校正以及区域合并等步骤 实现宽观测带 SAR 海冰图像的分割。

1 分割算法

若把图像分成 $n \gtrsim_{\circ}$ 设 $S \in H$ 格上的一组位置, $s \in S, x_s \in S, x_s \in S, x_s$ 表示赋给位置 s 的(冰)类。图像分割是把原始图像 I_s 转换成符号表示^[2]

 $K_{:}\{I_{s} \mid s \in \mathbf{S}\} \rightarrow \{x_{s} \mid s \in \mathbf{S}\} \quad , \qquad (1)$

通过上述方式把图像空间划分成n个分割段 $\boldsymbol{\Omega}_1, \dots, \boldsymbol{\Omega}_n$,得到

$$\boldsymbol{\Omega}_i = \{ s \mid x_s = i, s \in \boldsymbol{S} \} , \qquad (2)$$

$$\bigcup_{i=1}^{n} \boldsymbol{\Omega}_{i} = \boldsymbol{S} \quad , \tag{3}$$

$$\forall i \neq j, \boldsymbol{\Omega}_i \cap \boldsymbol{\Omega}_j = \varphi_{\circ} \qquad (4)$$

具体算法流程如图 1 所示,其中实线表示本文 算法的主要步骤,虚线代表基于区域 MRF 分割的算

收稿日期: 2016-09-07;修订日期: 2016-11-04

基金项目:安徽省高校自然科学研究重点项目"距离相校正的 SAR 海冰图像自动分割研究"(编号:KJ2016A650)资助。

作者简介:赵庆平(1972-),男,硕士,副教授,主要研究方向为合成孔径遥感图像处理与分析、计算机网络通信等。Email: zhaoqing-万方数据15@163.com。



1.1 区域化表示

首先,采用分水岭算法对图像进行分割,把图像 分割成许多小的区域,每个区域具有相对一致的后 向散射值。每个区域 Ω 由一组位置 S_{α} 构成,这些 位置属于该区域。通过把这些位置组合到对应区域 来降低斑点噪声效应。其次,确定局部强度最小值, 定义分水岭的底,该最小值所对应像素的强度要小 于8个近邻像素。然后,计算图像梯度。由于在一 幅图像中可能有多个通道,使用矢量场梯度(vector field gradient,VFG)方法利用所有通道来计算联合 图像梯度。并通过除以场景中的最大梯度进行归一 化。最后,针对每一个残留像素,利用梯度信息找出 图像中的某个强度最小值。把该最小值的标示符赋 给输出图像中对应的像素位置。基于平均强度、大 小和梯度,把每一对邻近分水岭合并在一起。

1.2 基于区域的 K - means 聚类初始化

作为初始化过程的一部分,区域的 K - means 聚类是一种推动该算法找出局部可接受方案的技术。利用该聚类算法把标记赋给每个所得区域 v。 对于每个区域 v,K - means 聚类算法都能找出最佳的标记,寻找最佳标记的公式为

$$x_v^r = \arg\min_i \sum_{s \in S_v} (\boldsymbol{y}_s - \boldsymbol{\mu}_i)^{\mathrm{T}} (\boldsymbol{y}_s - \boldsymbol{\mu}_i)$$
, (5)

式中: x'_{v} 为区域化后的图像; y_{s} 为 s 处的特征向量; μ_{i} 为均值特征向量,在区域的 K – means 聚类中,每 次迭代 μ_{i} 都不断更新; T 表示转置。

1.3 基于朗伯定律校正模型

基于余弦朗伯定律^[6,10-11]提出按类校正模型。 如果散射目标为完美的朗伯碰撞截面,辐射波全反 射回天线,则后向散射系数服从一阶余弦定律,即

$$E_{f} = \frac{1}{2c} \sum_{i=1}^{n} \sum_{S_{v} \subseteq \boldsymbol{\Omega}_{i} \le \boldsymbol{S}_{v}} \ln(|\boldsymbol{\Sigma}_{i}|) + (\boldsymbol{y}_{s} - \boldsymbol{\mu}_{i})^{\mathrm{T}} \boldsymbol{\Sigma}_{i}^{-1} (\boldsymbol{y}_{s} - \boldsymbol{\mu}_{i}) \quad ,$$
(14)

式中:
$$c$$
 是图像中的通道数; n 表示海冰分割区域的
数量; Σ_i 是区域 Ω_i 的特征协方差矩阵; E_f 是与假
设有关的能量。每一类分水岭区域的图像值遵守多
变量高斯分布,该分布能给出合理的结果^[12-13]。

 E_s 定义为

万方数据

$$\sigma^{0} = \sigma_{0}^{0} \cos[\theta_{r}(i,j)] \cos[\theta_{a}(i,j)], \quad (6)$$
式中: σ^{0} 为后向散射系数; σ_{0}^{0} 为常数,取决于目标
物类型; θ_{r} 是距离向中的局部入射角; θ_{a} 为方位向
中的局部入射角。

对于表面粗糙的散射物,辐射波不能完全反射 至天线,则 σ^0 服从余弦定律的平方,即

$$\sigma^{0} = \sigma_{0}^{0} \cos^{2} \left[\theta_{r}(i,j) \right] \cos^{2} \left[\theta_{a}(i,j) \right] \quad (7)$$

如果散射物是分布式和独立的散射目标,那么

$$\sigma^0 = \sigma_0^0 \quad (8)$$

然而,单一的物理模型不能适用于所有的 SAR 海冰图像,综合式(6)—(8),定义了一种通用的描 述模型,即

$$\sigma^{0} = \sigma_{0}^{0} \{ \cos[\theta_{r}(i,j)] \cos[\theta_{a}(i,j)] \}^{m} , (9)$$

式中m的估计值可以通过规格化曲线得到,该值使得曲线更加平缓。

如果目标物的类型为平地,也就是 $\theta_a = 0, 那么$ 式(9)可以简化为

$$\sigma^0 = \sigma_0^0 \cos^m(\theta_r) \quad (10)$$

为了解决入射角对目标物解译的影响,参数 m 可以通过线性回归模型得到。

对式(10)两边取对数进行简化,设 $s = \lg(\sigma^0)$, $t = \lg(\cos \theta_r), k = \lg(\sigma_0^0), 则$

$$s = mt + k \quad , \tag{11}$$

式中 k 为常数。

因此,基于朗伯定律校正模型为

$$\sigma_n^0 = \sigma^0 \cos^m(\theta_r) + k \quad , \qquad (12)$$

式中 σ_n^0 为按类校正后的后向散射系数估计值。

1.4 区域合并

为了产生最优分割 x^{r*},最小化的成本函数,即

$$x^{r^*} = \arg \min_{x' \in Y'} E_f + E_s$$
, (13)

式中: X' 为所有可能的 x' 集合; E_f 是特征模型能量; E_s 是空间语境模型能量。

 E_f 定义为

$$E_{s} = \beta \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n} \sum_{s \in \partial \mathbf{Q}_{i} \cap \partial \mathbf{Q}_{j}} g(\nabla_{s}) \quad , \qquad (15)$$

式中: β 为正权重值,在成本函数中决定了空间语 境模型的强度; $\partial \Omega_i$ 和 $\partial \Omega_j$ 分别为一组沿着 i 类和 j类边缘的位置; ∇_s 为SAR海冰图像在位置s处的 归一化梯度; g(∇,) 为边界惩罚函数,定义为

$$g(\nabla_s) = \exp\left[-\left(\frac{\nabla_s}{K}\right)^2\right]_{\circ}$$
 (16)

式中变量 K为 SAR 图像的边界强度^[1,14]。

2 实验分析及评价

2.1 评价标准

整体准确率和 Kappa 系数^[15] 是 2 种常用的分 割精度评价参数。整体准确率是被正确分割像素的 百分比。Kappa 系数定义为

$$Kappa = \frac{P(A) - P(E)}{1 - P(E)} , \qquad (17)$$

式中: P(A)为观测一致率; P(E)为期望一致率。 Kappa 代表精度评价度量,范围为[-1,1]。假设分 割结果随机分配。当 Kappa = 0时,分割结果与随 机分配一样好。当 Kappa = 1时,分割结果是完美 的。Kappa 为负值表明分割结果相对于正确分割有 偏差。

2.2 实验数据

为了验证分割的有效性,针对合成 SAR 海冰图 像和真实星载 SAR 海冰图像分别采用本文算法和 基于区域 MRF 分割算法进行对比实验。合成 SAR 海冰图像入射角范围约为 15°,大小为 600 像素 × 595 像素,并将其划分为 3 个相等区段,区段大小为 200 像素 ×595 像素。该图含有 4 类海冰:尼罗冰、 密集冰、稀疏冰和固定冰。真实星载 SAR 海冰图像 为 2000 年 3 月 6 日获取的波斯尼亚湾影像,入射角 在 35°~46°之间,其中海冰入射角的变化范围为 9°,图像大小为 615 像素 ×938 像素,同样划分为 3 个相等区段,区段大小为 205 像素 ×938 像素,波斯 尼亚湾一般为短期冰(夏季融化),参考芬兰海洋研 究所提供的冰况图和文献[16],同样将其海冰分为 尼罗冰、密集冰、稀疏冰和固定冰 4 类。

2.3 实验结果分析

针对整体准确率和 Kappa 系数 2 个参数,对比 利用不同算法 2 组 SAR 海冰图像的分割结果。合成 SAR 海冰图像、不同算法分割结果及海面实况如 图 2 所示。



Fig. 2 Segmentation results of synthetic SAR sea ice image

从图 2 可以发现,针对合成 SAR 海冰图像,基 于区域 MRF 的分割结果显示出较多的歧义性,特别 是在左、中区段;而本文算法在该区域兼顾了边缘 定位和区域一致性。该图像各区段的分割精度对比 如表1所示。

表1 合成 SAR 海冰图像分割精度对比

 Tab. 1
 Segmentation accuracy comparisons of synthetic SAR sea ice image

图像大小	整体准确率		Kappa 系数		
	区域 MRF 算法	、本文算法	区域 MRF 算法	5 本文算法	
600×595	90.34%	91.81%	0.8996	0.914 2	
左 200 × 595	90.81%	92.63%	0.887 2	0.911 6	
中 200 × 595	88.93%	91.16%	0.871 5	0.9007	
右 200 × 595	91.97%	91.89%	0.922 3	0.926 3	

从表1可以看出,区域 MRF 分割算法右区段准 确率最高为91.97%;本文算法的中区段准确率比 区域 MRF 算法最高提升了2.23%,Kappa 系数改进 了0.029 2。对于整幅 SAR 海冰图像来说,由于入 射角的跨度增大和其他不确定因素(形状)的影响, 区域 MRF 分割算法的整幅准确率比该算法各区段 最高准确率降低了1.63%;但是本文分割算法的整 幅准确率为91.88%,与各区段准确率基本持平, Kappa 系数也提高到了0.914 2,与区域 MRF 分割 算法相比增幅为0.014 6。结果表明,采用本文算法 整幅合成海冰图像的分割精度得到明显提高。

整幅波斯尼亚湾 SAR 海冰图像、不同算法分割 结果及海面实况如图 3 所示。



Fig. 3 Segmentation results of SAR sea ice image in gulf of Bothnia

从图 3 可以发现,针对波斯尼亚湾 SAR 海冰图像,与基于区域 MRF 分割结果相比,本文算法分割结果具有更好的区域连通性,图像中孤立区域明显减少,更接近海面实际情况,特别是在左、中区段。该图像各区段的分割精度如表 2 所示。

表 2 波斯尼亚湾 SAR 图像海冰分割精度对比 Tab. 2 Segmentation accuracy comparisons of SAR sea ice image in gulf of Bothnia

图像大小	整体准确率		Kappa 系数	
	区域 MRF 算法	本文算法	区域 MRF 算法	本文算法
615 × 938	88.60%	91.83%	0.8737	0.904 2
左205×938	91.06%	92.61%	0.907 2	0.921 3
中 205 × 938	93.62%	95.46%	0.929 8	0.941 9
右 205 × 938	84.92%	86.58%	0.8369	0.8584

由表2可以得出与合成 SAR 海冰图像分割类 似的结果。但2幅图像有所不同的是,对于波斯尼 亚湾各区段图像来说,本文分割算法在中区段准确 度上最高仅提升了1.84%,相应的 Kappa 系数只提 升了0.0121,明显低于合成 SAR 图像的改进精度。 然而对于整幅波斯尼亚湾 SAR 海冰图像而言,本文 算法在整体准确率上提升了3.23%,Kappa 系数也 提升了0.0305。波斯尼亚湾海冰分布对应的入射 角范围小于合成 SAR 海冰图像可能是该图像整体 分割精度提升低于合成 SAR 海冰图像的主要原因。

综上所示,本文提出的分割算法通过集成余弦 朗伯定律,能够较好地平滑同质海冰的像素值,有效 提高 SAR 海冰图像的分割精度,但是伴随着入射角 尺度的提高,分割精度提高的效果会逐渐降低。

3 结论

本文研研究规测带 SAR 海冰图像提出了一种

集成余弦朗伯定律的分割算法,通过对合成 SAR 海 冰图像和真实星载 SAR 海冰图像的对比实验,证明 了本文算法对宽观测带 SAR 图像分割是有效的,为 实现海冰的准确分割提供了一个新途径。虽然大多 数的研究忽视了入射角效应对 SAR 图像分割的影 响或忽视不同海冰类型对入射角效应的补偿,但是 笔者认为对于宽观测带 SAR 海冰图像应该考虑更 完美的校正方案,如入射角效应及不同海冰类型的 分布。在未来的研究中,将会把本文提出的分割算 法应用于其他 SAR 平台(如 ALOS PALSA 和 ASAR 等采集的),以增强其理论的可靠性。

参考文献(References):

- [1] Clausi D A, Qin K, Chowdhury M S, et al. MAGIC: Map guided ice classification system[J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 2010,36(S1):S13 – S25.
- [2] Karvonen A J. Baltic Sea ice SAR segmentation and classification using modified pulse – coupled neural networks[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2004, 42 (7): 1566 – 1574.
- [3] Soh L K, Tsatsoulis C, Gineris D, et al. ARKTOS: An intelligent system for SAR sea ice image classification [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2004, 42(1):229 – 248.
- [4] Leclerc G, Beaulieu N, Bonn F A. A simple method to account for topography in the radiometric correction of radar imagery[J]. International Journal of Remote Sensing, 2001, 22(17);3553-3570.
- [5] Mäkynen M P, Manninen A T, Similä M H, et al. Incidence angle dependence of the statistical properties of C – Band HH – Polarization backscattering signatures of the Baltic sea ice [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002, 40 (12): 2593 – 2605.
- [6] Ulaby F T, Batlivala P P, Dobson M C. Microwave backscatter dependence on surface roughness, soil moisture, and soil texture: Part I – bare soil [J]. IEEE Transactions on Geoscience Electronics,

1978,16(4):286-295.

- Ulaby F T, Bush T F, Batlivala P P. Radar response to vegetation II:8 - 18 GHz band [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1975, 23(5):608-618.
- [8] Yu Q Y, Clausi D A. SAR sea ice image analysis based on iterative region growing using semantics [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2007, 45(12):3919-3931.
- [9] Vincent L, Soille P. Watersheds in digital spaces: An efficient algorithm based on immersion simulations [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1991, 13 (6): 583 – 598.
- [10] Menges C H, Van Zyl J J, Hill G J E, et al. A procedure for the correction of the effect of variation in incidence angle on AIRSAR data [J]. International Journal of Remote Sensing, 2001, 22(5):829 – 841.
- [11] Menges C H, Hill G J E, Ahmad W, et al. Incidence angle correction of AirSAR data to facilitate land – cover classification [J].

Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2001, 67(4): 479-489.

- [12] Yu Q, Clausi D A. IRGS: Image segmentation using edge penalties and region growing[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2008, 30(12):2126-2139.
- [13] 李旭超,朱善安. 图像分割中的马尔可夫随机场方法综述[J]. 中国图象图形学报,2007,12(5):789-798.
 Li X C,Zhu S A. A survey of the Markov random field method for image segmentation[J]. Journal of Image and Graphics,2007,12 (5):789-798.
- [14] Qin A K, Clausi D A. Multivariate image segmentation using semantic region growing with adaptive edge penalty[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2010, 19(8):2157-2170.
- [15] Richards J A, Jia X P. Remote Sensing Digital Image Analysis
 [M]. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 2006:304 305.
- [16] Peter Y. Segmentation of RADARSAT 2 Dual Polarization Sea Ice Imagery[D]. Waterloo; University of Waterloo, 2009.

Wide – swath SAR ice images segmentation based on Lambert's law

ZHAO Qingping^{1,2}

School of Physics and Electronic Information, Huaibei Normal University, Huaibei 235000, China;
 Information College, Huaibei Normal University, Huaibei 235000, China)

Abstract: Incidence angle effect of the SAR images is a major obstacle to the automatic interpretation of SAR sea ice image. Based on wide – swath SAR ice data, this paper proposes a new segmentation algorithm which integrates Lambert's law correction step. The segmentation algorithm considers the effects of speckle noise and the angle of incidence of factors. The Lambert's law correction and region merging will be combined. The efficiency of the proposed method has been demonstrated on the segmentation of synthetic SAR sea ice image and gulf of Bothnia SAR sea ice image, where the segmentation accuracy has been substantially improved in contrast to area – based Markov random field(MRF) algorithm.

Keywords: incident angle effect; Lambert's cosine law; wide - swath ; sea ice; image segmentation

(责任编辑:陈理)