灰度共生矩阵纹理特征对 SAR 海冰漂移监测的增强性能研究

李小娜[1,2], 张　杰[2], 戴永寿[1], 张　晰[2]

(1. 中国石油大学(华东) 信息与控制工程学院, 山东 青岛 266580; 2. 国家海洋局第一海洋研究所, 山东 青岛 266061)

摘要: 海冰漂移监测对气候变化分析、船只航行、海上石油平台等海上活动安全作业具有重要意义。当前主流的 SAR 海冰漂移监测方法多是基于 SAR 灰度图开展的, 其受噪声、环境等因素的影响较大, 导致其在海冰漂移探测时, 特征失配率高, 匹配正确率低。针对这一问题, 本文尝试利用 SAR 海冰纹理特征来增强海冰漂移探测性能。首先对比分析了 8 种纹理特征对海冰漂移探测中特征匹配的增强性能, 筛选出能够有效增强特征匹配性能的最优纹理特征; 其次进一步分析了海冰类型、入射角和分辨率对基于纹理特征的海冰漂移探测性能增强的影响。实验结果表明, 均值是最优的纹理特征, 与 SAR 强度图相比, 特征匹配正确率提高了约 7%。

关键词: 海冰漂移; 纹理特征; SAR

中图分类号: TP75　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-3096(2018)04-0009-09

DOI: 10.11759/hykx20170803001

海冰漂移遥感监测不仅可以用于探测全球气候的动态变化, 还可以预防和避免海上作业发生航道闭塞、海冰积压毁坏船只等事故[1]。在众多遥感手段中, 合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)具有高分辨率成像、不受光照和云雾的影响、可全天时全天候工作的优势, 已经成为海冰漂移监测的主要业务手段。

海冰漂移 SAR 监测最初是通过人工匹配海冰特征来进行的, 伴随着 SAR 技术的发展, 现已产生了多种基于 SAR 影像自动提取海冰漂移信息的方法, 并应用于极地海冰漂移监测中。通常 SAR 海冰漂移监测的方法共分为两大类: 模式匹配和特征跟踪方法。特征跟踪算法是一种基于特征点的匹配方法, 主要包括 SIFT、SURF、ORB 等方法, 该类方法原理分为三大步, 先提取影像特征点, 然后为特征点赋方向参数形成描述算子, 最后进行特征点之间的匹配, 其应用于海冰漂移监测中会出现大量的错误匹配特征对[2]; 模式匹配方法是一种基于特征区域的匹配方法, 因算法的简洁性和相对较高的准确率被广泛应用[3-4]。海冰漂移监测方法主要研究进展有: Hall 等[5]应用人工匹配的方法, 识别两景 Seasat SAR 影像中的相同特征, 首次在 SAR 图像中提取海冰运动向量; Fily 等[6]将互相关算法运用于 SAR 海冰漂移监测中, 首次实现了海冰漂移信息的自动化提取, 为开展海冰漂移监测研究提供了充分的借鉴作用; Berg 等[7]将相位相关算法与基于特征的匹配算法结合起来应用于 SAR 海冰漂移检测中, 提高了算法的稳定性以及检测正确率; Stefan 等[8]对 ORB(Oriented FAST and Rotated BRIEF)算法进行了改进, 提高了特征跟踪匹配的计算效率。

当前 SAR 海冰漂移监测算法均是利用 SAR 图像的强度信息开展的, 而 SAR 成像过程易受环境因素、成像参数和斑点噪声等的影响, 使得海冰漂移监测算法经常出现特征匹配率低、海冰漂移跟踪丢失的情况, 进而造成海冰漂移监测结果精度低、空间覆盖不均匀等问题。SAR 海冰纹理特征受环境因素及成像参数的影响较小, 对图像局部偏差不敏感, 现已逐渐取代 SAR 强度/灰度成为 SAR 海冰遥感探测的重要特征。到目前为止, SAR 纹理特征已成功应用于海冰分类, 并显著提高了 SAR 海冰分类的精度[9]。Liu 使用纹理特征对支持向量机方法进行改进, 并结合海冰密集度信息提取海冰分类信息, 成功提取了

收稿日期: 2017-08-03; 修回日期: 2017-09-15

基金项目: 国家重点研发计划项目(No.2016YFA0600102); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目(2014G31)

[Foundation: The National Key Research and Development Program of China, No. 2016YFA0600102; Basic Scientific Fund for National Public Research Institutes of China, No. 2014G31]

作者简介: 李小娜(1991-), 女, 安徽界首人, 研究生, 主要从事 SAR 海冰漂移研究, 电话: 13156856651, E-mail: 18655837997@163.com; 张杰, 通信作者, 研究员, 主要从事海洋遥感技术与应用方面的研究, 电话: 0532-88960569, Email: zhangjie@fio.org.cn

六种类型的海冰[10]。David 将纹理特征应用于图像分割方法, 提高了海冰分类的准确程度[11]。可以预见, SAR 海冰纹理特征必然能够提高海冰漂移中特征点的匹配精度, 进一步提升海冰漂移探测能力。

基于此想法, 本文利用 Sentinel-1 SAR 数据, 提取了 SAR 海冰的对比度、相关性、均匀性、相异性、熵、均值、角二阶矩、方差等 8 种纹理特征, 选择了初生冰、初期冰和一年冰三种海冰类型共计 72 个海冰样本进行实验, 分析 SAR 图像的纹理特征对海冰漂移探测的增强能力, 并进一步分析了入射角、分辨率对特征匹配的影响。本文第 1 部分介绍了采用的 SAR 数据和纹理特征; 第 2 部分主要介绍纹理特征的评价和分析结果; 第 3 部分分析分辨率和入射角对纹理特征增强性能的影响; 结论与讨论见第 4 部分。

1 实验数据

本次实验使用的数据为 Sentinel-1 SAR 数据, 共计 4 对 8 景, 时间为 2015 年、2016 年, 区域为北极, 影像位置分布见图 1, SAR 影像图示见图 2。Sentinel-1 工作在 C 波段, 具有 4 种成像模式, 可双极化工作。此次使用的 SAR 数据分辨率为 10 m 和 40 m 两种, 成像模式为超宽幅模式(Extra Wide Swath Mode, EM)和干涉宽幅模式(Interferometric Wide Swath Mode, IM)两种, 具体参数见表 1。

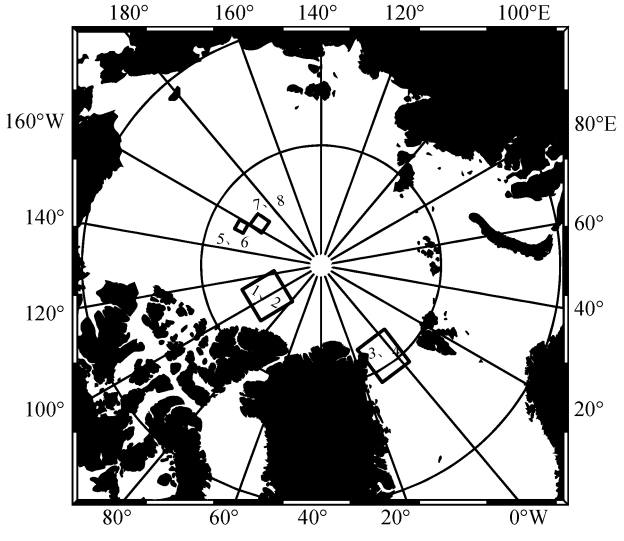


图 1 4 对 Sentinel-1SAR 影像位置图示

Fig. 1 Location icon of four pairs of Sentinel-1SAR images

根据四对 SAR 数据分辨率、入射角和成像模式, 将数据分两组进行实验, 命名为低分辨率组(Low-resolution)和高分辨率组(High-resolution)。

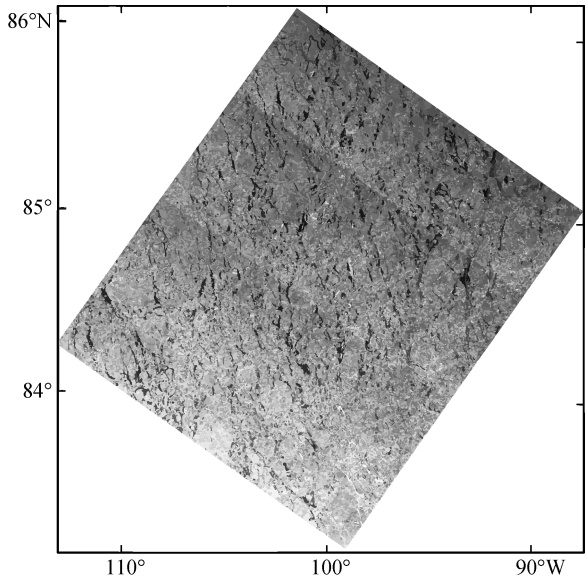


图 2 编号 1 的 Sentinel-1SAR 影像

Fig. 2 Number 1 Sentinel-1SAR image

在进行海冰漂移探测时, 特征匹配是关键的环节, 而保证特征匹配正确率的关键是保证待匹配的特征能够从另一景影像分辨出来。为了分析特征匹配方法的性能是否受海冰类型差异的影响, 在实验时分三种冰类型进行样本选取, 主要分为: 初生冰、初期冰和一年冰。初生冰是最初形成的海冰, 都是针状或薄片状的细小冰晶, 由于其反射电磁波能力较弱, 故在 SAR 影像中一般表现为较暗区域。初生冰继续生长, 当多种薄冰冻结在一起形成厚度约 10~30 cm 的冰层, 即称为初期冰。海冰平稳生长, 成长期没有超过一个冬季且厚度在 0.3~3 m 的白冰即称为一年冰。随着冰龄的增加海冰表面粗糙度增加, 故一年冰在 SAR 影像中多表现为较亮区域, 而初期冰与一年冰相比要暗一些。图 3 给出了选取的典型的初生冰、初期冰和一年冰样本。

本文通过灰度共生矩阵提取 SAR 影像纹理特征, 灰度共生矩阵反映图像灰度方向、相邻间隔、变化幅度等综合信息, 其通过计算图像灰度级之间二阶联合条件概率密度 $p_{ij}(d,\theta)$ 来表示纹理特征, $p_{ij}(d,\theta)$ 表示在给定空间距离 d 和方向 θ 时, 灰度级 i 和 j 同时出现的概率[12]。在计算纹理特征时, 需要确定 4 个参数: 窗口大小、方向、位移量和灰度量化级。不同的灰度共生矩阵计算参数, 得到的纹理特征值有很大的不同。如何设定灰度共生矩阵计算参数, 得到最优的 SAR 海冰纹理特征, 国内外学者已开展了大

表 1　实验 SAR 数据参数表
Tab. 1　SAR experimental data parameters

分组	编号	成像时间/(年-月-日)	分辨率/m	极化方式	波段	入射角/°	成像模式
低分辨率组	1	2016-10-11	40	HH	C	19.3-46.3	EM
	2	2016-10-12	40	HH	C	19.3-46.3	EM
	3	2015-03-28	40	HH/HV	C	19.0-46.4	EM
	4	2015-03-29	40	HH/HV	C	19.0-46.4	EM
高分辨率组	5	2015-10-05	10	HH	C	30.2-45.4	IM
	6	2015-10-06	10	HH	C	30.2-45.4	IM
	7	2015-10-04	10	HH	C	30.2-45.4	IM
	8	2015-10-05	10	HH	C	30.2-45.4	IM

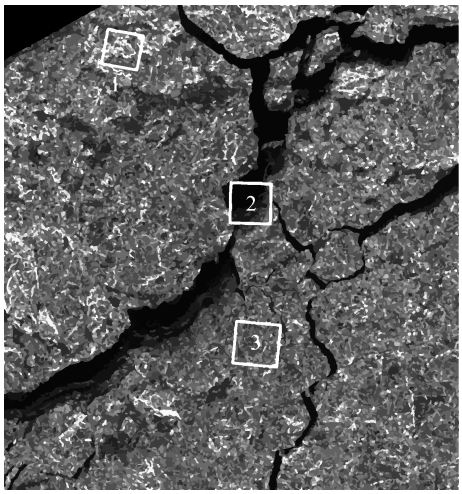


图 3　不同海冰类型实验样本图示
Fig. 3　Different sea ice type test samples
1: 一年冰样本; 2: 初生冰样本; 3: 初期冰样本
1: first year ice samples; 2: new ice samples; 3: young ice samples

量的研究工作。Soh 等[13]分析了以上 4 个参数取不同值时纹理特征对海冰分类精度的影响, 得出以下结论: 64 级的量化级足够用于海冰分类, 8 级和 256 级的灰度量化级不建议使用; 位移比方向更能影响海冰分类精度。张晰等[14]分析了灰度共生矩阵参数对海冰检测的影响, 通过比较相关参数的海冰海水对比度差异, 给出了确切的适合进行海冰检测的灰度共生矩阵参数。参考上述研究成果, 本文采用的灰度共生矩阵计算参数为: 11×11 的窗口大小, 方向为 0°, 位移量取 5, 64 级灰度量化。通过计算, 本文共提取了对比度(Contrast)、相关性(Correlation)、相异性(Dissimilarity)、均匀性(Homogeneity)、熵(Entropy)、均值(Mean)、角二阶矩(Second-moment)、方差(Variance)等 8 种纹理特征, 以下给出了纹理特征的计算方法:

1) 对比度: $T_{\mathrm{Con}}=\sum_{n=0}^{G-1}n^2\left[\sum_{i=1}^{G}\sum_{j=1}^{G}p_{ij}\right],|i-j|=n$, G 为图像灰度级　(1)

2) 相关性: $T_{\mathrm{Cor}}=\dfrac{\sum_{i=1}^{G}\sum_{j=1}^{G}(ij)p_{ij}-\mu_x\mu_y}{\delta_x\delta_y},|i-j|=n$　(2)

令 $p_x(i)=\sum_{j=1}^{G}P_{ij}$, $p_y(i)=\sum_{i=1}^{G}P_{ij}$, μ_x,δ_x 分别为 $\{p_x(i);i=1,2,\cdots,G\}$ 的均值和方差; μ_y,δ_y 分别为 $\{p_y(j);j=1,2,\cdots,G\}$ 的均值和方差。

3) 相异性: $T_{\mathrm{Dis}}=\sum_{n=1}^{G-1}n\left[\sum_{i=1}^{G}\sum_{j=1}^{G}(p_{ij})^2\right],|i-j|=n$　(3)

4) 均匀性: $T_{\mathrm{Hom}}=\sum_{i=1}^{G}\sum_{j=1}^{G}\dfrac{1}{1+(i-j)^2}p_{ij}$　(4)

5) 熵: $T_{\mathrm{Ent}}=-\sum_{i=1}^{G}\sum_{j=1}^{G}p_{ij}\log(p_{ij})$　(5)

6) 均值: $\mu=\dfrac{1}{G\times G}\sum_{i=1}^{G}\sum_{j=1}^{G}p_{ij}$　(6)

7) 角二阶矩: $T_{\mathrm{SM}}=\sum_{i=1}^{G}\sum_{j=1}^{G}(p_{ij})^2$　(7)

8) 方差: $T_{\mathrm{Var}}=\sum_{i=1}^{G}\sum_{j=1}^{G}(1-\mu)^2p_{ij}$　(8)

2　纹理特征对海冰特征匹配的增强性能分析

在 SAR 海冰漂移探测中, 归一化互相关是广泛使用的特征匹配方法。Heacock 等[15]将归一化互相关与相位相关思想相结合, 应用于 SAR 海冰漂移监测中, 提高了漂移监测准确率。Thomas[16]在总结了归一化互相关的原理、优缺点的基础上, 给出了节省计算效率的算法处理模型。本文采用归一化互相关方法开展研究, 其主要原理如下:

设待匹配图像 I 的像素大小为 $M\times N$，模板 T 的像素大小为 $m\times n$。从图像 I 中任意选取一块像素大小为 $m\times n$ 的子图像 $I_{x,y}$，其中子图像左上角在 I 中的坐标为(x, y)。

子图 $I_{x,y}$ 和模板 T 的归一化互相关值 $R(x, y)$定义为:

$$R(x,y)=\frac{\sum_{i=0}^{m-1}\sum_{j=0}^{n-1}\left[I(x+i,y+j)-\overline{I_{x,y}}\right]\left[T(i,j)-\overline{T}\right]}{\sqrt{\sum_{i=0}^{m-1}\sum_{j=0}^{n-1}\left[I(x+i,y+j)-\overline{I_{x,y}}\right]^2\sum_{i=0}^{m-1}\sum_{j=0}^{n-1}\left[T(i,j)-\overline{T}\right]^2}} \tag{9}$$

式中，(i, j) 为像素在模板中的坐标；$\overline{I_{x,y}}=\frac{1}{mn}\sum_{i=0}^{m-1}\sum_{j=0}^{n-1}\left[I(x+j,y+j)\right]$，为子图 $I_{x,y}$ 的像素平均值；$\overline{T}=\frac{1}{mn}\sum_{i=0}^{m-1}\sum_{j=0}^{n-1}T(i,j)$ 为模板 T 的像素平均值。遍历待匹配图像，计算其子图像与模板的归一化互相关值即 R 值，R 值最大处为模板在待匹配图像中的最佳匹配区域，归一化互相关值图示如图 4 所示。

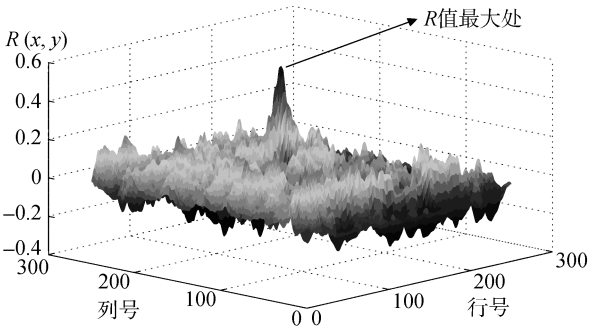


图 4　模板与待匹配图像的归一化互相关值 3D 图示

Fig. 4　Normalized cross-correlation value of template and the image to be matched

此次实验中，低分辨和高分辨两组数据中每组各选择 36 个样本，其中初生冰、初期冰、一年冰各 12 个样本。为了保证样本选择的有效性，将低分辨率组的样本窗口定为 50×50；而高分辨率组的样本窗口为 65×65，这样选择样本能够包含足够的特征以保证特征匹配时的有效性，又能降低样本包含的不同海冰类型的比例。选定样本区域后，通过归一化互相关算法得到样本区域的在待匹配图像中的位置，最后通过目视解译和下述两项标准，判定匹配正确性和匹配性能。

(1) 正确匹配次数除以总的样本匹配次数即为样本匹配正确率。匹配正确率越高者，越适合用于海冰漂移监测；在同等匹配正确率的情况下，再比较如下参数来进一步评价纹理特征。

(2) 使用归一化互相关计算得出的最高互相关值与次高互相关值的比值 r_1，以及最高互相关值与互相关均值的比值 r_2 来评价纹理特征，越高越适合用于海冰漂移监测。

r_1 表示待匹配特征相对于相似区域的区分程度，r_2 表示待匹配特征相对于于整个待匹配区域的区分程度。两组样本匹配正确率结果见表 2 和 3。

表 2　低分辨率组 SAR 强度图与 8 种纹理下样本匹配正确率

Tab. 2　Correct rate of SAR intensity image and eight kinds that of texture low resolution group

	SAR 图像	对比度	相关性	相异性	熵	均匀性	均值	角二阶矩	方差
总	0.893	0.417	0.222	0.518	0.639	0.361	0.982	0.444	0.464
初期冰	0.938	0.406	0.313	0.500	0.719	0.406	1.000	0.625	0.438
初生冰	0.750	0.583	0.250	0.833	0.833	0.667	1.000	0.500	0.667
一年冰	0.917	0.250	0.083	0.250	0.333	0.000	0.917	0.167	0.333

表 3　高分辨组 SAR 强度图与 8 种纹理下样本匹配正确率

Tab. 3　Correct rate of SAR intensity image and eight kinds that of texture high-resolution group

	SAR 图像	对比度	相关性	相异性	熵	均匀性	均值	角二阶矩	方差
总	0.924	0.424	0.333	0.833	0.924	0.864	0.985	0.788	0.530
初期冰	0.963	0.481	0.222	0.852	0.852	0.852	1.000	0.704	0.630
初生冰	0.714	0.429	0.286	0.857	0.929	0.857	0.929	0.714	0.429
一年冰	1.0	0.360	0.520	0.800	0.960	0.880	1.000	0.920	0.480

从总正确率来看，低分辨组实验中均值的匹配准确率最高，其次是 SAR 海冰强度图，可见均值在本组实验中更具有进行海冰漂移监测的优势；高分辨组实验中，均值的正确率也是最高的，其次为熵

和 SAR 强度图, 至于两者相比较哪一个更适合海冰漂移监测, 需要进一步比较 r_1 与 r_2 的值, 见表 4, 两个值越高则说明越适合做海冰漂移监测。由表 4 可看出, SAR 强度图的 r_1 与 r_2 值要高于熵, 即 SAR 强度图是高分辨组实验中第二适合进行海冰漂移监测的, 第一仍为均值。综合两组实验结果, 利用纹理特征的均值得到的特征匹配正确率比 SAR 强度图提高了约 7%。

表 4　高分辨率组样本 r_1、r_2 值比较
Tab. 4　Comparison of r_1 and r_2 that form high-resolution group

		SAR 图像	对比度	相关性	相异性	熵	均匀性	均值	角二阶矩	方差
总	r_1	1.018	1.002	1.013	1.002	1.001	1.002	1.002	1.003	1.004
	r_2	6.33	5.195	5.196	4.168	4.184	3.955	4.480	4.641	5.324
初期冰	r_1	1.021	1.003	1.015	1.003	1.002	1.002	1.003	1.002	1.004
	r_2	7.093	5.754	5.307	4.486	4.502	4.129	4.976	4.595	5.182
初生冰	r_1	1.01	1.002	1.01	1.001	1.00	1.001	1.002	1.002	1.005
	r_2	4.268	4.871	5.312	3.672	3.481	3.487	3.652	4.218	5.402
一年冰	r_1	1.023	1.00	1.014	1.003	1.003	1.004	1.003	1.005	1.003
	r_2	7.177	4.904	4.986	4.346	4.770	4.396	4.911	5.240	5.507

由表 2、表 3 两组匹配正确率可以看出, 海冰类型下匹配正确率情况皆不相同。在第一组实验中, 初生冰类型下, 8 种纹理特征以及 SAR 强度图的匹配正确率总体要比初期冰和一年冰高一些。第二组组实验中, 一年冰相对而言匹配正确率更高一些, 由此, 在使用模式匹配方法进行海冰漂移监测时, 选择的特征区域应尽量多包含初生冰和一年冰。

3　SAR 入射角和分辨率对性能增强的影响分析

3.1　入射角的影响分析

为保证只有入射角(γ)是唯一变化的量, 实验中选择低分辨率组中的前两景 SAR 影像, 且在挑选样本时尽量选择同一类型冰的样本。基于此原则, 实验主要选择的是初期冰和一年冰两种冰类型的样本, 而初生冰所占比例小, 分布不均衡, 不满足实验条件故舍去。

实验时, 将 SAR 数据的入射角划分为 7 段, 从每一个入射角段中取 6 个冰样本进行归一化互相关实验, 分析 8 种纹理特征的匹配正确率、r_1 与 r_2 的值是否随着入射角的变化而变化。实验中匹配正确率为 0 的特征的 r_1 和 r_2 统计值设为本组最小整数值。例如: 对比度在 28°~29.3°入射角范围内的正确率为 0, 即其没有 r_1 和 r_2 统计值, 但为了更好观察整体 r_1 与 r_2 值的变化, 将对比度在该入射角范围内的 r_1 值设为 1, r_2 值设为 3。实验结果见表 5、表 6、图 5~图 8。

从表 5 和表 6 可以看出不论对于初期冰还是一年冰, 8 种纹理特征与 SAR 强度图在匹配正确率基本不受入射角变化的影响。从图 5~图 8 可以看出两种冰类型下, r_1 与 r_2 随着入射角的变化也没有明显统一的变化趋势, 结合正确率变化的分析, 得出入射角不是影响样本匹配的因素。

表 5　初期冰下纹理特征随入射角变化的样本正确匹配率
Tab. 5　Correct rate of texture features with the change of incident angle that forms young ice sample

γ	对比度	相关性	相异性	熵	均匀性	均值	角二阶矩	方差
28°~29.3°	0.00	0.17	0.50	0.67	0.17	1.00	0.33	0.00
29.3°~31°	0.00	0.17	0.50	0.17	0.17	1.00	0.33	0.17
31.4°~32.6°	0.17	0.00	0.50	0.67	0.33	1.00	0.67	0.17
32.6°~34.7°	0.17	0.33	0.33	0.67	0.67	1.00	0.50	0.17
35.4°~37.4°	0.33	0.33	0.83	0.67	0.33	1.00	0.50	0.33
37.4°~38.6°	0.33	0.17	0.33	0.83	0.50	1.00	1.00	0.33
38.6°~40.6°	0.50	0.67	0.33	0.67	0.17	1.00	0.50	0.33

表 6　一年冰下纹理特征随入射角变化的样本正确匹配率

Tab. 6　Correct rate of texture features with the change of incident angle that forms first year ice sample

γ	对比度	相关性	相异性	熵	均匀性	均值	角二阶矩	方差
28°~29.3°	0.50	0.17	0.50	0.33	0.17	1.00	0.33	0.50
29.3°~31°	0.17	0.17	0.33	0.33	0.17	1.00	0.33	0.33
31.4°~32.6°	0.17	0.50	0.50	0.83	0.17	1.00	0.67	0.00
32.6°~34.7°	0.17	0.17	0.33	0.67	0.33	1.00	0.50	0.17
35.4°~37.4°	0.33	0.17	0.33	0.50	0.33	1.00	0.50	0.33
37.4°~38.6°	0.17	0.33	0.50	0.83	0.33	1.00	0.67	0.50
38.6°~40.6°	0.00	0.17	0.50	0.67	0.33	1.00	0.50	0.50

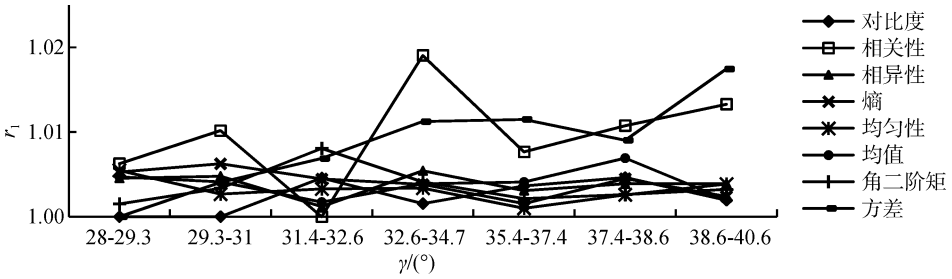


图 5　初期冰样本下 r_1 随入射角的变化

Fig. 5　r_1 changes with the incident angle that forms young ice samples

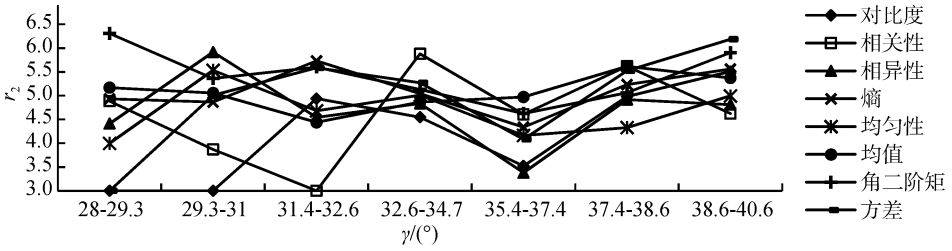


图 6　初期冰样本 r_2 随入射角的变化

Fig. 6　r_2 changes with the incident angle that forms young ice samples

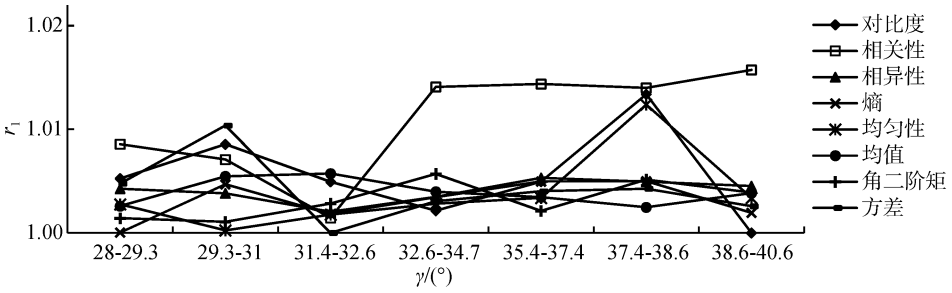


图 7　一年冰样本下 r_1 随入射角的变化

Fig. 7　r_1 changes with the incident angle that forms first year ice samples

3.2　分辨率的影响分析

为了分析分辨率对特征匹配的影响，只保持分辨率为实验变量而其他参数保持相同，故考虑将高分辨率组(分辨率为 10 m)的 SAR 数据的分辨率降为 40 m，使用降低分辨率后的 SAR 数据重复归一化实验，并将实验结果与未降分辨率的实验结果做对比。由于初生冰在 SAR 影像中所占比例小，经过降分辨率后，更加减小了其像素个数，65×65 的样本窗口大小已不再适用，故在进行样本选择时，将初生冰类型舍弃，只对初期冰、一年冰两种冰类型进行分辨率实验。

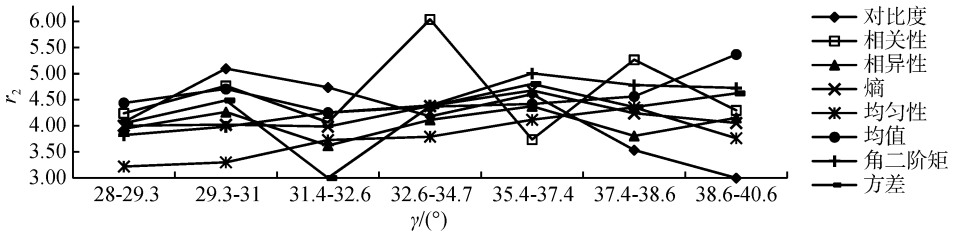


图 8　一年冰样本下 r_2 随入射角的变化

Fig. 8　r_2 changes with the incident angle that forms first-year ice samples

此次实验共选择了 12 组初期冰样本, 12 组一年冰样本, 将实验结果与未降分辨率(高分辨率)的结果做对比, 进而来分析分辨率对特征匹配的影响。

为了验证结果的可靠性, 最后将降分辨率的实验结果与低分辨率组的实验结果做对比, 即观察同为分辨率是 40 m 的两组实验结果是否相近。实验结果见图 9 和图 10。

从以上结果可看出, 将分辨率将为 40 m 后, 对于所有纹理特征, 初期冰和一年冰的样本匹配正确率都有所降低, 且有逼近低分辨率实验组的趋势, 因此 SAR 分辨率越高, 其匹配结果正确率越高。

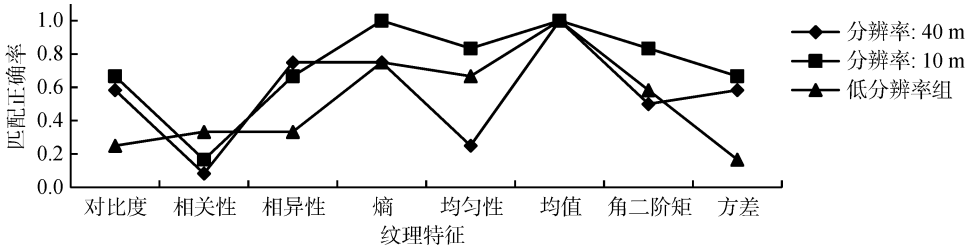


图 9　初期冰匹配正确率

Fig. 9　Correct rate of young ice samples

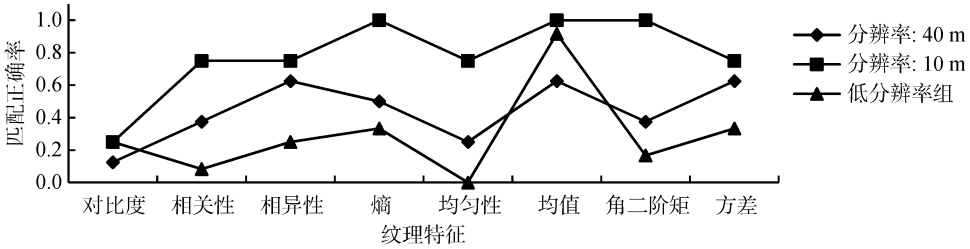


图 10　一年冰匹配正确率

Fig. 10　Correct rate of first-year ice samples

4　结论与讨论

本文使用归一互相关方法首先评价了 8 种纹理特征在海冰漂移探测中特征匹配的增强性能, 筛选出能够有效增强特征匹配的最优纹理特征; 并进一步分析了海冰类型、入射角、分辨率对纹理特征海冰漂移探测性能增强的影响。从实验中得出以下结论:

1) 均值在八种纹理特征中最适宜做海冰漂移监测, 其特征匹配正确率比 SAR 强度图高了 7%左右, 这表明均值在某些情况下其比 SAR 强度图更具有进行海冰漂移监测的优势。

2) 初生冰或一年冰的特征区域匹配正确率更高。

3) 入射角对特征区域的匹配正确率几乎无影响, 但分辨率却能对特征匹配计算值造成一定的影响, 分辨率越高, 其匹配结果准确度越高。

4) 综合本次实验结果, 在海冰漂移监测方面, 均值比 SAR 强度图具有更大的优势, 能够提高原有以 SAR 强度图为基础的海冰漂移监测性能, 提高监测准确率。以上研究填补了纹理特征在海冰漂移监测应用中的空白, 为该方向研究提供了更多可行思路。

参考文献:

[1] 孙鹤泉, 李春花, 张志刚. 基于遥感图像分析的极区海冰漂移研究[J]. 海洋技术学报, 2015, 34(1): 10-14.
Sun Hequan, Li Chunhua, Zhang Zhigang. Study on the polar sea ice drift based on remote sensing image analysis[J]. Journal of ocean Technology, 2015, 34(1): 10-14.

[2] 肖健. SIFT 特征匹配算法研究与改进[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
Xiao Jian. Research and Improvement of SIFT Feature Matching Algorithm[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.

[3] Pla F, Bober M. Estimating Translation/Deformation motion through phase correlation[C]//International Conference on Image Analysis and Processing(ICIAP). Image Analysis and Processing. Florence: Springer-Verlag, 1997: 653-660.

[4] Fily M, Rothrock D A. Sea ice tracking by Nested Correlations[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 1987, GE-25(5): 570-580.

[5] Hall R T, Rothrock D A. Sea ice displacement from SEASAT synthetic aperture radar[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1981, 86(C11): 11078-11082.

[6] Fily M, Rothrock D A. Extracting sea ice data from satellite SAR imagery[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 1986, 24(6): 849-854.

[7] Berg A, Eriksson L E B. Investigation of a Hybrid Algorithm for sea ice drift measurements using Synthetic Aperture Radar images[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2014, 52: 5023-5033.

[8] Muckenhuber S, Andreevich Korosov A, Sandven S. Open-source feature-tracking algorithm for sea ice drift retrieval from Sentinel-1 SAR imagery[J]. Cryosphere, 2016, 10(2): 913-925.

[9] 李旭坤. 基于多特征融合的 PolSAR 海冰分类应用[D]. 大连: 大连海事大学, 2014.
Li Xukun. PolSAR Sea Ice Classification Application Based on feature Fusion[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2014.

[10] Liu H, Guo H, Zhang L. SVM-Based sea ice classification using textural features and concentration from RADARSAT-2 Dual-Pol ScanSAR data[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing, 2015, 8(4): 1601-1613.

[11] Clausi D A, Deng H. Operational segmentation and classification of SAR sea ice imagery[C]// Institute of Electrical and Electronics Engineers. 2003 IEEE Workshop on Advances in Techniques for Analysis of Remotely Sensed Data. Maryland: IEEE, 2004: 268-275.

[12] 胡召玲, 李海权, 杜培军. SAR 图像纹理特征提取与分类研究[J]. 中国矿业大学学报, 2009, 38(3): 422-427.
Hu Zhaoling, Li Haiquan, Du Peijun. Study on the extraction of texture features and its application in classifying SAR images .Journal of China University of Mining & Technology, 2009, 38(3): 422-427.

[13] Soh L K, Tsatsoulis C. Texture analysis of SAR sea ice imagery using gray level co-occurrence matrices[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 1999, 37(2): 780-795.

[14] 张晰, 张杰, 纪永刚. 基于纹理特征分析的辽东湾 SAR 影像海冰检测[J]. 海洋科学进展, 2008, 26(3): 386-393.
Zhang Xi, Zhang Jie, Ji Yonggang. Sea ice detection from SAR image of the Liaodong Bay based on texture analysis [J]. Advances in marine science, 2008, 26(3): 386-393.

[15] Heacock T, Hirose T, Lee F, et al. Sea-ice tracking on the east coast of Canada using NOAA AVHRR imagery[J]. Annals of Glaciology, 1993, 17: 405-413.

[16] Hollands T. Motion tracking of sea ice with SAR satellite data[D]. Bremen: University Bremen, 2012.

Research on the enhanced performance of texture feature for sea ice drift monitoring based on gray level co-occurrence matrices

LI Xiao-na[1, 2], ZHANG Jie[2], DAI Yong-shou[1], ZHANG Xi[2]
(1. College of Information and Control Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China; 2. The First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao 266061, China)

Received: Aug. 03, 2017
Key words: sea ice drift; texture feature; SAR

Abstract: Sea ice drift monitoring is important for climate change analysis, vessel navigation, and offshore maritime safety operations. The current methods of synthetic aperture radar (SAR) sea ice drift tracking are based on SAR intensity image analysis. However, intensity images are easily influenced by noise and have a high probability of mismatching and low matching accuracy for sea ice drift detection. Considering the above problems, this paper attempts to use the SAR sea ice texture features to enhance the drift detection performance. First, the enhancement performance of eight texture features for pattern matching in sea ice drift detection is analyzed, and the optimal texture feature is selected. Then the effects of sea ice type, incident angle, and resolution on the enhanced performance of texture features are analyzed. The results show that the mean value is the optimal texture feature, and compared with the SAR intensity image analysis approach, the proposed method improves the pattern matching accuracy by about 7%.

(本文编辑: 李晓燕)