



JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS

主办: 中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

2014
12
VOL.19

ISSN1006-8961
CN11-3758/TB



图像色彩和谐变化 P1766



第19卷第12期（总第224期）

2014年12月16日

中国精品科技期刊
中国国际影响力优秀学术期刊
中国科技核心期刊

版权声明

凡向《中国图象图形学报》投稿，均视为同意在本刊网站及CNKI等全文数据库出版，所刊载论文已获得著作权人的授权。本刊所有图片均为非商业目的使用，所有内容，未经许可，不得转载或以其他方式使用。

Copyright

All rights reserved by Journal of Image and Graphics, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS. The content (including but not limited text, photo, etc) published in this journal is for non-commercial use.

主管单位 中国科学院

主办单位 中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

主 编 李小文

编辑出版《中国图象图形学报》编辑出版委员会

邮政信箱 北京9718信箱

邮 编 100101

电子信箱 jig@irsa.ac.cn

电 话 010-64807995

网 址 www.cjig.cn

广告经营许可证 京朝工商广字第0361号

总 发 行 北京报刊发行局

订 购 全国各地邮局

海外发行 中国国际图书贸易集团有限公司

（邮政信箱：北京399信箱 邮编：100048）

印刷装订 北京科信印刷有限公司

Journal of Image and Graphics

Title inscription: Song Jian

Monthly, Started in 1996

Superintended by Chinese Academy of Sciences

Sponsored by Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS
China Society of Image and Graphics

Institute of Applied Physics and Computational Mathematics

Editor-in-Chief LI Xiaowen

Editor, Publisher Editorial and Publishing Board of Journal of
Image and Graphics

P.O.Box 9718, Beijing, P.R.China

Zip code 100101

E-mail jig@irsa.ac.cn

Telephone 010-64807995

Website www.cjig.cn

Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers and Journals

Domestic All Local Post Offices in China

Overseas China International Book Trading Corporation
(P.O.Box 399, Beijing 100048, P.R.China))

Printed by Beijing Kexin Printing Co., Ltd.

CN 11-3758/TB

ISSN 1006-8961

CODEN ZTTXFZ

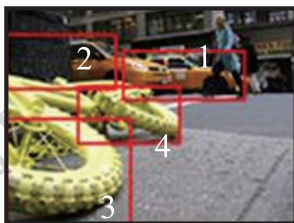
国外发行代号 M1406

国内邮发代号 82-831

国内定价 50.00元



改进鱼眼变换技术的图像适应(第1743页)



面向部件遮挡补偿的车辆检测模型(第1802页)



基于暗原色及入射光假设的单幅图像去雾(第1812页)

综述

视频摘要技术综述

王娟, 蒋兴浩, 孙铨锋 1685

局部二进制模式方法综述

刘丽, 谢毓湘, 魏迎梅, 老松杨 1696

图像处理和编码

2维全相位内插核的设计与实现

苏飞, 孙杰, 秦娟, 段宇翔 1721

改进的正则化模型在图像恢复中的应用

李旭超, 宋博 1730

改进鱼眼变换技术的图像适应

张丽霞, 区兆明, 宋鸿陟 1743

去除乘性噪声的分数阶变分模型及算法

田丹, 薛定宇, 陈大力 1751

丢包环境中H.264视频编码的快速模式判决

兰梦, 张远, 魏雨农 1759

图像分析和识别

偏度和峰度的图像色彩和谐变化

马云芳, 宋明黎, 卜佳俊 1766

结合稀疏表示和概率潜在语义的图像模糊度评价

张涛, 王新年, 梁德群 1775

Log-Gabor小波和分数阶多项式KPCA的火焰图像状态识别

宋昱, 吴一全 1785

加权局部二值模式的人脸特征提取

张洁玉, 武小川 1794

面向部件遮挡补偿的车辆检测模型

陈远, 谢昭, 吴克伟 1802

基于暗原色及入射光假设的单幅图像去雾

於敏杰, 张浩峰 1812

空间可变有限混合模型

申小虎, 吕导中, 万荣春 1820

遥感图像处理

高分辨率极化SAR图像水平集分割

邹鹏飞, 李震, 田帮森 1829

混合本征模型的多视SAR影像海冰密度检测

汪霄箭, 李玉, 赵泉华, 何晓军 1836

总目次

CONTENTS

JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



Improved fisheye transformation for image retargeting (P1743)



Part-oriented occlusion compensate model for vehicle detection(P1802)



Single-image dehazing based on dark channel and incident light assumption(P1812)

Review

- Review of video abstraction
Wang Juan, Jiang Xinghao, Sun Tanfeng 1685
- Survey of Local Binary Pattern method
Liu Li, Xie Yuxiang, Wei Yingmei, Lao Songyang 1696

Image Processing and Coding

- Design and implementation of 2D all-phase interpolation kernel
Su Fei, Sun Jie, Qin Juan, Duan Yuxiang 1721
- Applying the improved regularization model to image restoration
Li Xuchao, Song Bo 1730
- Improved fisheye transformation for image retargeting
Zhang Lixia, Ou Zhaoming, Song Hongzhi 1743
- Fractional-order variation model and algorithm for multiplicative noise removal
Tian Dan, Xue Dingyu, Chen Dali 1751
- Fast-mode decision for H.264 video coding in a packet-loss environment
Lan Meng, Zhang Yuan, Wei Yunong 1759

Image Analysis and Recognition

- Image color harmonization algorithm using skewness and kurtosis
Ma Yunfang, Song Mingli, Bu Jiajun 1766
- Image blur evaluation based on sparse representation and probabilistic latent semantic analysis
Zhang Tao, Wang Xinnian, Liang Dequn 1775
- State identification of boiler combustion flame images via Log-Gabor wavelet and kernel principal component analysis with fractional power polynomial models
Song Yu, Wu Yiquan 1785
- Feature extraction of faces based on a weighted local binary pattern
Zhang Jieyu, Wu Xiaochuan 1794
- Part-oriented occlusion compensate model for vehicle detection
Chen Yuan, Xie Zhao, Wu Kewei 1802
- Single-image dehazing based on dark channel and incident light assumption
Yu Minjie, Zhang Haofeng 1812
- Spatially variant finite mixture model
Shen Xiaohu, Lyu Daozhong, Wan Rongchun 1820

Remote Sensing Image Processing

- High-resolution PolSAR image level set segmentation
Zou Pengfei, Li Zhen, Tian Bangsen 1829
- Intrinsic mixture model-based measurement of sea ice density from a multi-look SAR image
Wang Xiaojian, Li Yu, Zhao Quanhua, He Xiaojun 1836

中图法分类号: TP391.41 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2014)12-1836-07

论文引用格式: Wang X J, Li Y, Zhao Q H, He X J. Intrinsic mixture model-based measurement of sea ice density from a multi-look SAR image[J]. Journal of Image and Graphics, 2014, 19(12): 1836-1842. [汪霄箭, 李玉, 赵泉华, 何晓军. 混合本征模型的多视 SAR 影像海冰密度检测[J]. 中国图象图形学报, 2014, 19(12): 1836-1842.] [DOI:10.11834/jig.20141216]

混合本征模型的多视 SAR 影像海冰密度检测

汪霄箭, 李玉, 赵泉华, 何晓军

辽宁工程技术大学测绘与地理科学学院, 遥感科学与应用研究所, 阜新 123000

摘要: 目的 SAR 影像中像素光谱测度的空间相关性蕴含着海洋表面和海冰更加丰富的空间特性及其变化信息, 因此合理建模这种相关性是高分辨率 SAR 影像海冰精准解译的关键。提出一种利用随机模型及空间统计学测度刻画海冰空间结构的方法。方法 本文首先, 在空间统计学框架下, SAR 影像被表示为多值 Gamma 模型和泊松线 Mosaic 模型线性加权构建的混合模型, 其中多值 Gamma 模型用于描述海洋表面雷达信号背向散射变化的连续性, 而泊松线 Mosaic 模型则用于表征不同类型海冰表面雷达信号背向散射变化的区域性。利用上述混合模型的一阶、二阶变异函数, 建模蕴含在 SAR 影像中海冰空间结构的变化。结果 对 RADARSAT-1 影像海冰结构建模并反演其密度。实验区域真实海冰密度分别为 20%, 80% 等, 运用本文方法反演所得海冰密度与真实海冰密度误差正负不超过 10%。结论 本文提出混合本征模型用以刻画 SAR 强度影像中海冰像素强度变化的空间关系, 能够较好地反演 Ungava 湾海冰密度分布。为利用遥感影像检测空间机构提供一种全新的方法。

关键词: 本征模型; 变异函数; SAR 影像; 海冰密度

Intrinsic mixture model-based measurement of sea ice density from a multi-look SAR image

Wang Xiaojian, Li Yu, Zhao Quanhua, He Xiaojun

Institute of Remote Sensing Science and Application, School of Geomatics, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China

Abstract: **Objective** The spatial structures revealed in remote sensing imagery are essential pieces of information that characterize the nature and scale of the spatial variation of sea ice processes. The freezing and melting of sea ice lead to changes in sea environment conditions, which in turn cause lockout, channel blocking, ship damage, and other issues. This study evaluates the potential capability of using the variogram of the intrinsic regionalization model to estimate sea ice density from synthetic-aperture radar (SAR) intensity images. **Method** A different geo-statistic metric is introduced, in which the spatial structures of sea ice are considered as a combination of two stochastic second-order stationary models. Under the stationarity assumption, a spatial structure model is proposed on the basis of second-order variograms to describe the sea ice density in multi-look SAR images. First, the multi-gamma model is used to characterize continuous variations that correspond to water or the background of sea ice. Second, a Poisson tessellation-based mosaic model is used, in which the image domain is randomly separated into non-overlapping cells. In each cell, a random value is independently assigned. The linear combination of these two stochastic models defines the mixture model to represent the spatial structures of sea ice presented in the SAR intensity imagery. Finally, the least squares method is used for the fitting method to estimate parameters. The im-

收稿日期: 2014-04-30; 修回日期: 2014-08-20

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(41301479); 国家自然科学基金面上项目(41271435); 中国测绘科学院对地观测技术国家测绘地理信息局重点实验室开放基金项目(201204)

第一作者简介: 汪霄箭(1991—), 男, 现为辽宁工程技术大学摄影测量与遥感专业硕士研究生, 主要研究方向为空间数据分析。

E-mail: 690098087@qq.com

age spatial structures are characterized by the variance weight and the variogram range related to each model. **Result** The proposed algorithm is applied to Radarsat-1 images acquired in different days to identify the change in sea ice. Experimental results show that the proposed method can accurately and stably estimate sea ice density. The real sea ice densities of the experimental areas are 20% and 80%. The errors between the real sea ice densities and the results from the proposed method are no more than plus or minus 10%. **Conclusion** In this study, the spatial structures of sea ice shown in a SAR intensity image are characterized by the intrinsic regionalization model. The algorithm is applied to a Radarsat-1 SAR intensity image to detect the sea ice change during two months in 2008. Results demonstrate that the algorithm is useful in detecting sea ice change in terms of intensity and size. However, these findings are limited by the number, types, and small size of the sea ice. Several aspects of the proposed algorithm can be improved in further studies. With the availability of the high-resolution polarization SAR image, the problem caused by high resolution and full polarization should be considered. For example, for the full-polarization SAR image, the spectral and spatial correlation of the same sea ice type becomes complicated. High resolution makes both the details and the noise in the homogeneous sea ice area prominent and enables the SAR images to show massive data characteristics. All of these issues result in unexpected difficulties in the design of high-resolution polarization SAR image-orientated algorithms for sea ice detection. In our future work, the suitability of the proposed algorithm to a high-resolution polarization SAR image will be improved through development of a spatial statistic model in spectral space.

Key words: intrinsic model; variogram; SAR image; sea ice structure

0 引言

海冰对高纬度地区特别是极地地区的水文、大气热循环、洋流和生态系统都有着极其重大的影响。海冰在冻结和融化过程中,会引起海况的变化,如流冰会影响舰只航行和危害海上建筑物;海冰的频繁变化及扩张亦将导致封港、航道堵塞、船舶受损等问题,是高纬度地区主要的海洋灾害^[1]。因此,实现快速、实时、大尺度海冰检测越来越受到许多国家政府、组织以及有关机构的高度重视^[2]。航天、航空技术的飞速发展,使得卫星遥感具有大面积、快速获取地球表面信息的技术优势,目前已成为海冰监测的重要工具,并为海冰灾害预报及预警提供了有效的数据保障^[3]。与光学-红外遥感系统相比,作为主动式成像传感系统的合成孔径雷达(SAR)由于不受阳光、云雾等天气条件影响,具有全天候、全天时、大面积监测海冰的独特优势,已经成为海冰监测最为有效的工具,并在科学研究和经济活动中发挥重要作用^[4],如,加拿大冰情服务局(CIS)以及芬兰冰情服务局(FIS)等机构每天对大量 SAR 海冰影像进行分析与处理,并为用户绘制海冰冰况分布图。

利用 SAR 影像反演海冰类型、面积、轮廓、密集度、结构变化等是遥感学界一直以来面临的热点和难点问题^[5-6]。主要有建立模型对不同类型海冰进行模拟的方法以及直接对影像进行统计分析,建立相关测度以区分海冰类型的方法。Ochi-

lov 等人^[7]提出一种生成像素级海冰分类影像的全自动方法。首先收集先验知识,如蛋形图(egg code)、非监督分类结果和经过校正的原始 SAR 影像;然后建立海冰标号模型,确定模型参数,利用 EM 算法求解最优参数,根据先验知识确定是否进行迭代计算。该方法分类结果受先验知识的影响很大,先验知识不准确则分类结果误差也较大。Alhumaidi 等人^[8]提出一种基于神经网络模型和贝叶斯算法的海冰分类方法,该方法主要用于区分多年冰和一年冰,与传统方法不同的是加入了结构特征用于辅助分类,因为不同类型的海冰在 C 波段和 HH 极化下具有相似的后向散射系数。该方法分类结果和实际结果相符合,但在分类结果边缘有一些叠加错误。运用统计分析方法进行海冰分类的方法则更为广泛。Clausi 等人^[9]利用灰度共生概率(cooccurrence probabilities)检测 SAR 影像海冰纹理结构特征,并用 K-均值聚类方法进行分类。计算共生概率时需要给定空间窗口,通过实验发现,窗口大小会影响灰度共生概率的计算结果和聚类的可分性,所以如何确定窗口的大小是有待解决的问题。Nystuen 等人^[10]提出基于 SAR 后向散射和灰度共生矩阵来区分海冰的方法。根据后向散射系数将海冰分成 3 种类型;初生冰、一年冰和多年冰。虽然该方法对这 3 种海冰类型具有一定的区分效果,但由于在海冰边缘或者小块浮冰相互碰撞形成“饼型冰(pancake ice)”区域具有和多年冰相同的后向散射特性,从

而造成了该类冰和多年冰的区分困难。当影像包含多种海冰类型时,如何分离各区域也有待解决。目前,如何既能充分利用高分辨率 SAR 影像中展现的海冰细节及精细结构变化特征,又能克服由高分辨率带来的诸如:1)同一海冰类型像素光谱测度的空间相关性变得更加复杂;2)由于细节特征的突出,造成同质海冰内几何噪声增大;3)在同样覆盖面积下,海冰区域包含的像素数随其空间分辨率的增加而急剧增加,使得高分辨率 SAR 影像呈现海量数据特征等问题。所有这些问题都为高分辨率 SAR 影像海冰检测方法的设计带来了意想不到的困难,使得适用于低、中分辨率 SAR 影像海冰分析的方法无论是在算法效率还是结果精度上都无法满足对高分辨率 SAR 影像海冰分析的要求,进而极大地限制了其应用。有鉴于此,在空间统计学及随机几何等理论基础上,利用随机模型以及空间统计学测度刻画 SAR 影像中海冰像素强度空间结构。

1 混合本征模型

1.1 随机场与随机函数

SAR 影像可以看做定义为在影像空间域(像素格点集) S 上的随机场 $Z(\mathbf{x})$ 的实现。设 $Z(\mathbf{x})$ 为定义在平面点集 $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 上的随机场,即对平面点 $\mathbf{x}_i \in \mathbf{x}, i \in \{1, 2, \dots, n\}$ 有随机函数 $Z(x_i)$,使得 $Z(\mathbf{x}) = \{Z(x_i), i = 1, \dots, n\}$ 。每个像素点的强度值相当于随机函数 $Z(x_i)$,当影像确定时就得到了随机场的一次采样。由此可以看出,当空间点固定之后, $Z(\mathbf{x})$ 就是一个随机函数,体现了其随机性;另一方面,可以研究空间两个不同点 $\mathbf{x}$ 与 $\mathbf{x} + \mathbf{h}$ 处的随机函数值是否具有某种程度的相关性,这就体现了其结构性的一面^[11]。

1.2 二阶稳态假设与本征假设

1.2.1 二阶稳态假设

当随机场 $Z(\mathbf{x})$ 满足下列两条件,则称其为二阶稳态。

1)在整个研究区域内 $Z(\mathbf{x})$ 的数学期望均存在,且等于常数,即

$$E[Z(\mathbf{x})] = m \quad (1)$$

2)在整个研究区域内 $Z(\mathbf{x})$ 的协方差函数存在且平稳(即只依赖于像素间距离 $\mathbf{h}$,而与 $\mathbf{x}$ 无关),用公式表达为

$$\text{cov}[Z(\mathbf{x}), Z(\mathbf{x} + \mathbf{h})] =$$

$$E[Z(\mathbf{x})Z(\mathbf{x} + \mathbf{h})] - E[Z(\mathbf{x})]E[Z(\mathbf{x} + \mathbf{h})] = E[Z(\mathbf{x})Z(\mathbf{x} + \mathbf{h})] - m^2 = C(\mathbf{h}) \quad (2)$$

当 $\mathbf{h} = \mathbf{0}$ 时,式(2)即为

$$C(\mathbf{0}) = \text{var}[Z(\mathbf{x})] \quad (3)$$

此式说明,方差函数存在,且为常数。

1.2.2 本征假设

当随机场 $Z(\mathbf{x})$ 的增量 $Z(\mathbf{x}) - Z(\mathbf{x} + \mathbf{h})$ 满足下列两条件时,称其满足本征假设。

1)在整个研究区域内有

$$E[Z(\mathbf{x}) - Z(\mathbf{x} + \mathbf{h})] = 0 \quad (4)$$

2)增量 $Z(\mathbf{x}) - Z(\mathbf{x} + \mathbf{h})$ 的方差函数存在且平稳,即

$$\begin{aligned} \text{var}[Z(\mathbf{x}) - Z(\mathbf{x} + \mathbf{h})] &= \\ E[Z(\mathbf{x}) - Z(\mathbf{x} + \mathbf{h})]^2 - \{E[Z(\mathbf{x}) - Z(\mathbf{x} + \mathbf{h})]\}^2 &= \\ E[Z(\mathbf{x}) - Z(\mathbf{x} + \mathbf{h})]^2 &= 2\gamma(\mathbf{x}, \mathbf{h}) - 2\gamma(\mathbf{h}) \end{aligned} \quad (5)$$

式中, $\gamma(\mathbf{h})$ 为变异函数。

1.3 多值 Gamma 稳态本征模型

对于 SAR 影像,可以视为二阶稳态随机场 $Z(\mathbf{x})$,其一阶、二阶矩存在且为稳态,即

$$E[Z(\mathbf{x})] = m$$

$$\text{cov}[Z(\mathbf{x}), Z(\mathbf{x} + \mathbf{h})] = C(\mathbf{h}) \quad (6)$$

式中, $\mathbf{h}$ 为像素 $\mathbf{x}$ 和 $\mathbf{x} + \mathbf{h}$ 间的距离矢量; C 为协相关函数,用以刻画 $Z(\mathbf{x})$ 的空间分布特性^[12-13]。若 $Z(\mathbf{x})$ 为各向同性随机场,则其协相关函数仅与像素间欧几里得距离有关,即

$$C(\mathbf{h}) = C(h) \quad (7)$$

式中, $h = \|\mathbf{h}\|$ 。以下讨论中均假设 $Z(\mathbf{x})$ 为各向同性随机场。在二阶稳态假设下, $Z(\mathbf{x})$ 的二阶变异函数定义为

$$\gamma_2(h) = \frac{1}{2} \text{var}[Z(\mathbf{x} + \mathbf{h}) - Z(\mathbf{x})] \quad (8)$$

二阶变异函数可进一步推得

$$\gamma_2(h) = \sigma^2 - C(h) \quad (9)$$

式中, σ^2 为 $Z(\mathbf{x})$ 的方差。在实际应用中,多视 SAR 影像被证明是服从 Gamma 分布的,所以本文为了用 $\gamma_2(h)$ 刻画海冰空间结构变化,建立满足二值 Gamma 分布的随机矢量 $\mathbf{Z} = (Z_g(\mathbf{x}), Z_g(\mathbf{x} + \mathbf{h}))$,可以由其特征函数定义而成。已知仿射多项式^[14-15]

$$p(\boldsymbol{\theta}) = 1 + \beta\theta_1 + \beta\theta_2 + \beta^2\rho\theta_1\theta_2 \quad (10)$$

式中, $\boldsymbol{\theta} = (\theta_1, \theta_2), \beta > 0, \rho$ 表示 θ_1, θ_2 的非相关性, $0 < \rho < 1$,则特征函数可定义为

$$L(\boldsymbol{\theta}) = E[e^{\theta_1 Z_g(s+h) + \theta_2 Z_g(s)}] = (p(-\boldsymbol{\theta}))^{-\alpha} = (1 - \beta\theta_1 - \beta\theta_2 - \beta^2\rho\theta_1\theta_2)^{-\alpha} \quad (11)$$

可以证明, 对由此构建的二值 Gamma 分布, $Z_g(x)$ 服从形态参数为 α 、尺度参数为 β 的 Gamma 分布^[16]。与实际应用结合到一起, 即

$$p(Z_g; \alpha, \beta) = \frac{Z_g^{\alpha-1}}{\Gamma(\alpha)\beta^\alpha} \exp\left(-\frac{Z_g}{\beta}\right) \quad (12)$$

式中, $\Gamma(\alpha)$ 为 Gamma 函数。而 Z_g 的均值和方差可分别计算为

$$E[Z_g] = \frac{\partial L(\boldsymbol{\theta})}{\partial \theta_1} \Big|_{\boldsymbol{\theta}=0} = \frac{\partial L(\boldsymbol{\theta})}{\partial \theta_2} \Big|_{\boldsymbol{\theta}=0} = \alpha\beta \quad (13)$$

$$\text{var}[Z_g] = \frac{\partial^2 L(\boldsymbol{\theta})}{\partial \theta_1 \partial \theta_2} \Big|_{\boldsymbol{\theta}=0} = \alpha\beta^2$$

进一步地, 二值 Gamma 分布 $Z_g(x)$ 的协相关函数和相关系数分别为

$$\begin{aligned} \text{cov}[Z_g(\mathbf{x}+h), Z_g(\mathbf{x})] &= \\ E[Z_g(\mathbf{x}+h)Z_g(\mathbf{x})] - E[Z_g(\mathbf{x}+h)]E[Z_g(\mathbf{x})] &= \\ \alpha\beta^2(1-\rho)r[Z_g(\mathbf{x}+h), Z_g(\mathbf{x})] &= \\ \frac{\text{cov}[Z_g(\mathbf{x}+h), Z_g(\mathbf{x})]}{\sqrt{\text{var}[Z_g(\mathbf{x}+h)]}\sqrt{\text{var}[Z_g(\mathbf{x})]}} = 1-\rho \end{aligned} \quad (14)$$

为了刻画海洋表面结构的空变化, 找出 ρ 与 h 的函数关系。构造函数模型, 假设 ρ 为 h 的高斯函数, 即

$$\rho = \rho(h) = 1 - \exp\left(-\frac{3h^2}{r_g^2}\right) \quad (15)$$

根据式(14)(15), 协相关函数可重写为

$$\begin{aligned} \text{cov}[Z_g(\mathbf{x}+h), Z_g(\mathbf{x})] &= \\ \alpha\beta^2 \exp\left(-\frac{3h^2}{r_g^2}\right) \end{aligned} \quad (16)$$

由式(9)(13)(16)得, Z_g 的二阶变异函数为

$$\gamma_{2g}(h) = \alpha\beta^2 \left(1 - \exp\left(-\frac{3h^2}{r_g^2}\right)\right) \quad (17)$$

其变程和基台值分别为 r_g 和 $\alpha\beta^2$ 。由此可见, Z_g 为所需的多值 Gamma 稳态随机函数。

1.4 Mosaic 稳态本征模型

2 维平面上的直线可用参数 $(a, d) \in [0, 2\pi] \times [0, \infty]$ 表示(如图 1(a)所示), 其中, a 为该直线的法线方向角, d 为原点到该直线的距离。对定义在 2 维平面上的直线簇, 如果其直线数服从均值为 λ 的泊松分布, 该直线簇称为泊松线网络。过影像域 S 的泊松线网络将 S 划分为不同的泊松单元, 该划分称为泊松划分^[17](如图 1(b)所示)。

如果分配给每个泊松单元一个强度值且服从形

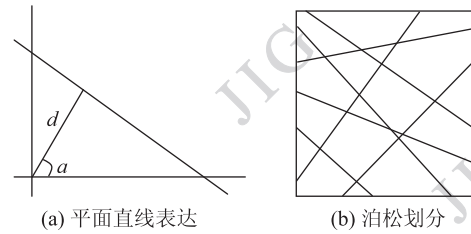


图 1 平面直线表达与泊松划分
Fig. 1 Plane linear expression and Poisson division

态参数为 α 、尺度参数为 β 的 Gamma 分布, 由此在 S 上定义了随机函数 $Z_m(\mathbf{x})$ 。可以证明, Z_m 的二阶矩可表达为^[18-19]

$$\begin{aligned} E[Z_m(\mathbf{x}+h)Z_m(\mathbf{x})] &= \\ \alpha\beta^2 + \alpha^2\beta p(h) + \alpha^2\beta^2(1-p(h)) \end{aligned} \quad (18)$$

式中, $p(h)$ 为 $\mathbf{x}$ 和 $\mathbf{x}+h$ 位于同一泊松单元的概率^[14,21]。对泊松 Mosaic 稳态随机函数 $Z_m(\mathbf{x})$, 其协相关函数为

$$\begin{aligned} \text{cov}[Z_m(\mathbf{x}+h), Z_m(\mathbf{x})] &= \\ \alpha\beta^2 p(h) = \alpha\beta^2 \exp(-2\lambda h) \end{aligned} \quad (19)$$

类似地, Z_m 的二阶变异函数可表示为

$$\gamma_{2m}(h) = \alpha\beta^2 \left(1 - \exp\left(-\frac{3h^2}{r_m^2}\right)\right) \quad (20)$$

其变程和基台值为 $r_m = 3\lambda/2$ 和 $\alpha\beta^2$ 。由此, $Z_m(\mathbf{x})$ 定义了 Mosaic 稳态随机函数^[20]。

1.5 混合本征模型

表征海冰空间结构变化的混合本征模型可以由上述两个稳态随机函数的线性组合定义而成^[13], 即

$$Z(\mathbf{x}) = wZ_m(\mathbf{x}) + \sqrt{1-w^2}Z_g(\mathbf{x}) \quad (21)$$

由 $Z(\mathbf{x})$ 混合本征模型的理论二阶变异函数可以推得

$$\gamma_2(h) = w^2\gamma_{2m}(h) + (1-w^2)\gamma_{2g}(h) \quad (22)$$

利用式(17)(20)(22)中理论二阶变异函数可重新写为

$$\begin{aligned} \gamma_2(h) &= \\ \alpha\beta^2 \left[1 - w^2 \exp\left(-\frac{3h^2}{r_m^2}\right) - (1-w^2) \exp\left(-\frac{3h^2}{r_g^2}\right) \right] \end{aligned} \quad (23)$$

式中, w 表示海冰密度, 通过实验可以求出, 即达到反演海冰密度的目的。

1.6 混合本征模型参数估计

给定 SAR 影像 $\mathbf{z} = \{z(\mathbf{x}) | \mathbf{x} \in \mathbf{X}\}$, 其实际二

阶变异函数可计算为^[13,21]

$$\hat{\gamma}_2(h) = \frac{1}{2|N(h)|} \sum_{\mathbf{x} \in N(h)} [z(\mathbf{x} + h) - z(\mathbf{x})]^2 \quad (24)$$

式中, $N(h) = \{(\mathbf{x} + h, \mathbf{x}) : \mathbf{x} + h, \mathbf{x} \in X\}$, $|N(h)|$ 为 $N(h)$ 中的元素个数。

根据上述计算得到的实际二阶变异函数, 利用最小二乘方法拟合理论二阶变异函数^[12,21], 以估计混合本征模型的参数 $\Theta = (\alpha, \beta, w, r_g, r_m)$ 。依式(19)分别以像素间距 $H = \{h_1, \dots, h_n\}$ 计算实际二阶变异函数, 得 $\hat{\gamma}_2(H) = (\hat{\gamma}_2(h_1), \dots, \hat{\gamma}_2(h_n))$ 。设不同像素间距的理论二阶变异函数为 $\gamma_2(H) = (\gamma_2(h_1, \Theta), \dots, \gamma_2(h_n, \Theta))$ 。假设 $(\hat{\gamma}_2, \gamma_2)$ 满足关系

$$\hat{\gamma}_2(H) = \gamma(H, \Theta) + \varepsilon(H) \quad (25)$$

式中, $\varepsilon(H)$ 均值为 0 的 $n \times 1$ 维矢量, 其协相关矩阵为 $V(\Theta) = \text{cov}[\varepsilon(H)]$ 。根据最小二乘准则, 模型参数矢量可估计^[12,21] 为

$$\begin{aligned} & [\hat{\gamma}_2(H) - \gamma_2(H, \Theta)]^T \times \\ & V(\Theta) [\hat{\gamma}_2(H) - \gamma_2(H, \Theta)] = \\ & \varepsilon(H, \Theta)^T V(\Theta) \varepsilon(H, \Theta) = \\ & \sum_{j=1}^n \frac{|N(h_j)|}{2\gamma_2(h_j, \Theta)} [\hat{\gamma}_2(h_j) - \gamma(h_j, \Theta)] \quad (26) \end{aligned}$$

2 实验结果与讨论

采用以上方法, 针对 SAR 强度影像进行海冰密度反演实验。实验影像区域为加拿大 Ungava 湾, 影像采集时间为 2008 年 4—6 月, 在此期间海冰处于融化期, 其间的 SAR 影像可以较好地反映海冰密度变化情况。实验中, 将本文算法用于该期间所有时相影像。均得到较好的结果。在众多时相的实验数据中, 2008 年 5 月 6—12 日采集的 SAR 影像有最多的海冰类型, 因此本节中仅给出这两景影像的实验结果。图 2(a)(b) 所示为 4 视 RADARSAT-1 强度影像, 影像尺寸 2159×2941 像素, VV 极化, 30 m 空间分辨率。两幅影像的右边是加拿大相关机构制作的蛋形图, 分别反映了相关海域的海冰信息, 第 1 行里的数字表示海冰的总体密度, 第 2 行数字代表各海冰子类所占比重, 第 3 行数字代表海冰所处发展阶段, 第 4 行代表海冰的具体形状^[22]。实验主要利用第 1 行的海冰总体密度信息来验证模型反演的准确性。

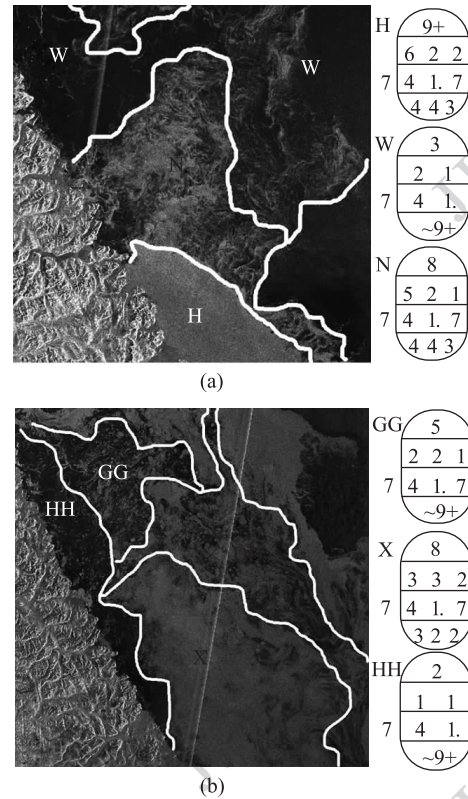


图 2 SAR 强度影像

Fig. 2 SAR Intensity image

为验证模型的合理性, 先对同类型海冰局部进行实验。图 3 为图 2 不同类型海冰区域 50×50 像素大小的采样, 其中, 图 3(a)(b)(c) 分别对应 H、W、N 区域, 图 3(d)(e)(f) 分别对应 HH、GG、X 区域。图 4 为图 3 对应采样图像实际变异函数与高斯模型理论变异函数最小二乘拟合的结果, 由拟合结果可以看出, 理论模型与实际变异函数拟合精度较高, 理论模型可以较好地表示出实际的变异函数值。

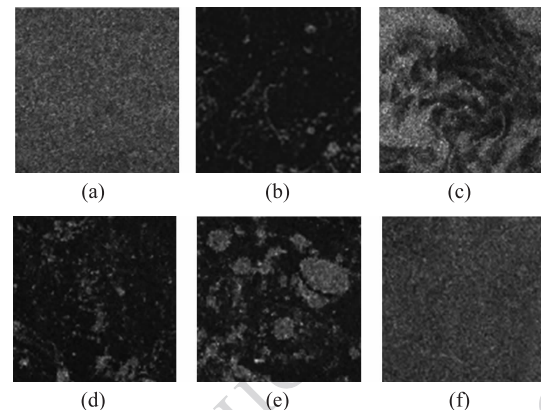


图 3 不同海冰区域采样

Fig. 3 Samples of different sea ice areas

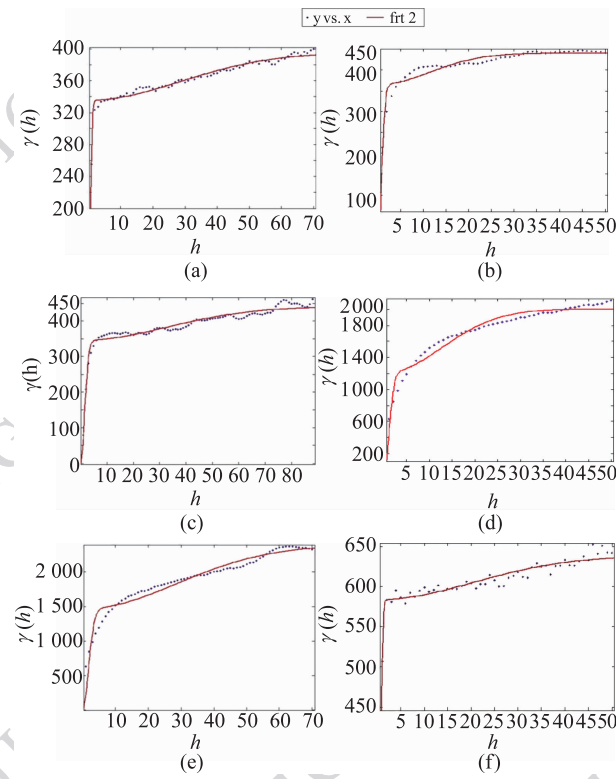


图 4 局部海冰影像拟合结果

Fig. 4 Partial sea ice image fitting results

表 1 列出模型参数的实验估计值,其中 w 是混合本征模型中两个稳态模型的权值,用来反演海冰密度, r_g 表示海洋表面全局的结构变化, r_m 估计冰块的平均尺度。实验结果, H 区域海冰密度为 95%, HH 区域海冰密度为 23%, W 区域海冰密度为 28%, GG 区域海冰密度为 53%, N 区域海冰密度为 71%, X 区域海冰密度为 93%, 与实际海冰密度误差都在 5% 以内。

表 1 局部实验参数估计

Table 1 Partial experiments parameter estimation

海冰结构类型	影像图 3	r_g	r_m	w
H	(a)	1.74	50	0.95
HH	(b)	50	4.34	0.23
W	(c)	50	1.7	0.28
GG	(d)	50	5.3	0.53
N	(e)	50	4.2	0.71
X	(f)	1.1	50	0.93

为了进一步验证模型精度,对图 2(a)中的 H、W、N 区域和图 2(b)中的 HH、GG、X 区域整体进行

海冰密度拟合实验。

图 5 是各不同密度海冰区域整体分割图,图 6 是图 5 各区域整体实际变异函数与高斯模型理论变异函数最小二乘拟合的结果,由实验结果可以看出,理论模型对于实际变异函数值的拟合精度很高。

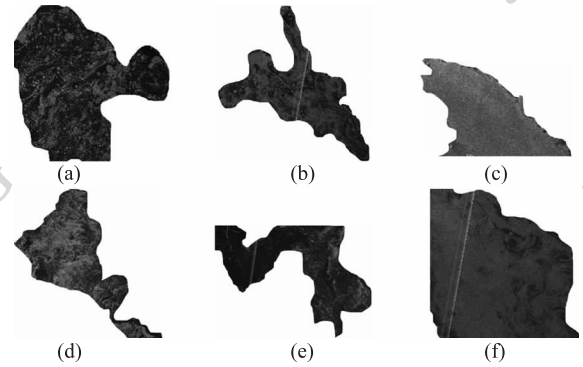


图 5 整体海水区域分割图

Fig. 5 Whole areas of sea ice images

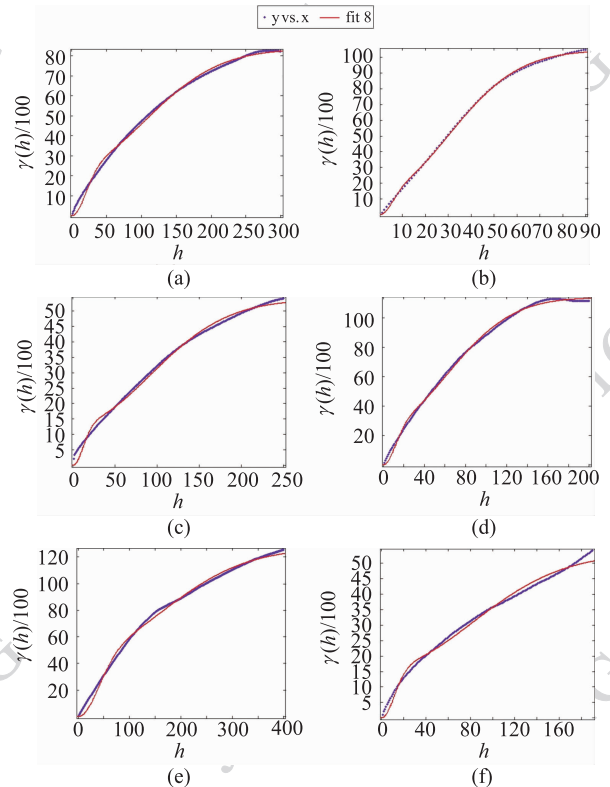


图 6 整体海水区域拟合结果

Fig. 6 Fitting results overall sea ice areas

表 2 列出各个海冰区域理论模型参数的估计值,由表 2 可得拟合结果 w 与实际海冰密度吻合。实验结果, H 区域海冰密度为 93%, HH 区域海冰密度为 21%, W 区域海冰密度为 33%, GG 区域海冰密度为 53%, N 区域海冰密度为 78%, X 区域海冰

密度为 93%,与实际海冰密度误差都在 5% 左右。

表 2 全局海冰实验参数估计
Table 2 Whole areas experiments parameter estimation

海冰结构类型	影像图 5	r_g	r_m	w
N	(a)	250	34.2	0.78
HH	(b)	90	2.4	0.21
H	(c)	2.1	222	0.93
GG	(d)	200	5.3	0.53
W	(e)	378	3.5	0.33
X	(f)	1.4	180	0.93

3 结 论

本文提出混合本征模型用以刻画 SAR 强度影像中海冰像素强度变化的空间关系。该方法应用于 RADARSAT-1SAR 强度影像,较好地反演 Ungava 湾海冰密度分布。从实验结果可以看出,在各尺度的海冰检测中,高斯模型能全面、有效反演海冰密度。尽管本文方法可以有效、准确地监测海冰的空间结构,但仍存在一定的问题,如算法上难以实现泊松分割,实验中如何更加准确地定义变程的范围、如何更加精确的求出海冰尺度并加以应用等。

参考文献 (References)

[1] Zhu H T, Feng Q, Zeng T, et al. Design and research on bohai sea ice monitoring system based on SAR [J]. Remote Sensing Information, 2012, (2):81-85. [朱海天,冯倩,曾韬,等.基于星载 SAR 的渤海海冰遥感监测系统设计与研究[J].遥感信息,2012,(2):81-85.]

[2] Wang A M, Suo L, Yang W T. Preliminary analysis of SAR satellite mission for ocean monitoring [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2007, 22(2):162-165. [王爱明,索乐,杨文涛.海洋监视监测 SAR 卫星任务初步分析[J].遥感技术与应用,2007,22(2):162-165.]

[3] Johannessen O M, Alexandrov V Y, Frolov I Y, et al. Remote sensing of sea ice in the northern sea route studies and applications [M]. Chichester, UK Springer and Praxis Publishing, 2007.

[4] Kerman B. R. Information states in radar imagery of sea ice [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999, 37(3):1435-1446

[5] Chang C C, Mo L, Zhu Q B. SAR sea ice image sementation based on edge preserving regional energy minimization [J]. Microcomputer & Its Applications, 2012, 31(14):37-39. [常灿灿,磨玲,朱启兵.基于边缘保持的区域能量最小化 SAR 海

冰图像分割[J].微型机与应用,2012,31(14):37-39.]

[6] Chen S H, Han B, Lei B. Research on the relationship between SAR sea ice image segmentation precision of MRF and image quality [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2012, 31(10):31-35. [陈少华,韩冰,雷斌.SAR 海冰 MRF 分割精度与图像质量的关系研究[J].国外电子测量技术,2012,31(10):31-35.]

[7] Ochilov S, Clausi D A. Operational SAR sea-ice image classification [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 50(11):4397-4408.

[8] Alhumaidi S M, Jones L P, Park J D, et al. A neural network algorithm for sea ice edge classification [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1997, 35(4):817-826.

[9] Clausi D A, Yue B. Comparing cooccurrence probabilities and Markov random fields for texture analysis of SAR sea ice imagery [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2004, 42(1):215-228.

[10] Nystuen J A, Garcia Jr F W. Sea ice classification using SAR backscatter statistics [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1992, 30(3):502-509.

[11] Feng Y M. Application of Spatial Statistics Theory and Its Application in Forestry [M]. Beijing: China Forestry Press, 2008:22-47. [冯益明.空间统计学理论及其在林业中的应用[M].北京:中国林业出版社,2008:22-47.]

[12] Chiles J, Delfiner P. Geostatistics Modeling Spatial Uncertainty [M]. New York: Wiley, 1999.

[13] Cressie N A C. Statistics for Spatial Data Revised Edition [M]. New York: John Wiley & Sons, 1993:256-258.

[14] Wackernagel H. Multivariate Geostatistics; an Introduction with Application [M]. Berlin: Springer, 2003:367-387.

[15] Barndorff-Nielsen O E. Conditional resolutions [J]. Biometrika, 1980, 67:293-310.

[16] Bernardoff P. Which multivariate gamma distributions are infinitely divisible? [J]. Bernoulli, 2006, 12(1):169-189.

[17] Kotz S, Balakrishnan N, Johnson N L. Continuous Multivariate Distributions: Models and Applications[M]. 2nd ed. Hoboken: Wiley, 2000:467-483.

[18] Garrigues S, Allard D, Baret F. Using first-and second-order variograms for characterizing landscape spatial structures from remote sensing imagery [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2007, 45(6):1823-1834.

[19] Rivoirard J. Introduction to Disjunctive Kriging and Non-linear Geostatistics [M]. Oxford, England: Clarendon Press, 1994:234-253.

[20] Lantuejoul C. Geostatistical Simulation Models and Algorithms [M]. Berlin: Springer, 2002.

[21] Schabenberger O, Gotway C A. Statistical Methods for Spatial Data Analysis [M]. Orange, CA, USA: Chapman and Hall/CRC, 2005:562-572.

[22] Government of Canada. Canadian Ice Service[EB/OL]. 2010-08-05[2014-3-2]. <http://www.ec.gc.ca/>