

清 华 大 学

# 综 合 论 文 训 练

题目：基于 GPU 的极化 SAR 图像舰  
船检测算法设计

系 别：电子工程系

专 业：电子信息科学与技术

姓 名：孙天宇

指导教师：杨健 教授

2020 年 5 月 15 日

# 关于学位论文使用授权的说明

本人完全了解清华大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留学位论文的复印件，允许该论文被查阅和借阅；学校可以公布该论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存该论文。

**(涉密的学位论文在解密后应遵守此规定)**

签 名：\_\_\_\_\_ 导师签名：\_\_\_\_\_ 日 期：\_\_\_\_\_

## 中文摘要

合成孔径雷达 (SAR) 作为一种主动成像的遥感观测手段, 可以通过收发电磁波波束来获取地物目标的极化散射信息, 生成高分辨率的地物影像。目前 SAR 被广泛应用于海上目标检测与识别。为满足 SAR 系统对海上目标检测的高时效性要求, 本文共实现了三种基于 CPU+GPU 异构架构的高效并行舰船目标检测方法, 总结如下:

1) 对于极化 SAR 图像, 以极化白化滤波器 (PWF) 方法为例, 实现了多 GPU 协同的并行极化白化滤波器算法, 该方法采用滑动窗选取局部海杂波像素计算极化白化滤波器参数, 通过该滤波器融合各个极化通道的散射信息, 得到一幅相干斑抑制图像。对重构降斑图像应用 CFAR 检测器进行阈值分割, 得到最终的检测结果。实验结果表明, 基于 GPU 并行的 PWF 检测方法有效, 并在检测时间性能上获得了显著的提升, 明显优于传统的 CPU 串行算法。

2) 对于单极化 SAR 图像, 采用了混合对数正态分布来描述强度图像中的非负海杂波分布。首先采用滑动窗选择局部海杂波像素然后采用最大期望 (EM) 方法来估计混合对数正态分布中参数, 得到分布后根据给定的虚警率采用牛顿迭代法计算 CFAR 检测器的分割阈值。我们将该算法中参数估计与阈值计算等可并行执行的部分分配到 GPU 上去并行执行。实验结果表明, 相比于传统 CPU 串行执行方式, 该并行方法在时间性能上获得了数十倍的提升。

3) 实现了基于 GPU 的极化协方差差异矩阵极化 SAR 图像舰船目标检测方法。该方法计算了图像中每个像元与其  $3 \times 3$  邻域极化协方差矩阵的差值, 由此得到极化协方差差异矩阵。为了充分利用极化协方差差异矩阵中含有的极化信息, 在每个 GPU 线程中, 我们提取了极化协方差差异矩阵的 SPAN 值与基座舰船高度 (PSH) 这个极化特征, 对这两个特征应用阈值分割, 得到最终检测结果。实验结果表明: 相较于 PWF 方法, 该方法对复杂海况的适应能力更强, 算法在检测精度与时间、空间性能上都优于 PWF 方法。

**关键词:** 舰船检测; 高性能计算; 极化白化滤波器; 极化协方差差异矩阵; 极化 SAR

## ABSTRACT

Synthetic aperture radar (SAR) system provides an all-weather remote sensing method that can generate high-resolution ground object images under radar beam irradiation. Now, it has been widely used in Marine target detection and classification. In order to meet the requirement of high timeliness of SAR ship target detection, this paper proposes a method based on CPU+GPU heterogeneous architecture for SAR image ship target detection. In this paper, three kinds of efficient target detection based on CPU+GPU heterogeneous architecture are realized, these are summarized as follows:

1) For polarization SAR images, with polarization whitening filter (PWF) method as an example, this paper implements the GPU collaborative parallel polarization filter algorithm, the method estimates the local sea clutter covariance matrix and combine the polarization scattering channel information to get a pair of coherent spot suppression images. For the reconstruct image, CFAR detector was applied to get the final detection results. The experimental results show that the method is effective and the detection time is improved significantly, which is better than the traditional method CPU platform.

2) For SAR images, the log-mixture gaussian model is used to describe the non-negative sea clutter distribution in amplitude SAR images, and the maximum expectation (EM) method is used to effectively estimate the sea clutter distribution parameters. According to the given false alarm rate in advance, the CAFR detection threshold is obtained by Newton iteration method. The experimental results of this method on NVIDIA TITAN V GPU show that compared with the traditional CPU platform, the detection efficiency of this method is improved by dozens of times

3) A ship detection method based on polarization covariance difference matrix is implemented. This method calculates the polarization covariance matrix difference between each pixel and its surrounding 3x3 neighborhood. The polarization covariance difference matrix improves the ship-sea contrast in the local area. In order to make full use of the polarization and intensity features in the polarization covariance difference matrix, the Shannon entropy of the polarization covariance difference matrix is calculated, and the threshold is used for segmentation to obtain the final detection re-

sult. Experimental results show that, compared with the PWF method, the detection accuracy of this method has been effectively improved.

**Keywords:** ship detection; CUDA; polarimetric whitening filter; polarimetric covariance difference matrix; polarimetric synthetic aperture radar

# 目 录

第 1 章 引言 .....	1
1.1 研究背景与意义 .....	1
1.2 研究现状与进展 .....	2
1.2.1 单极化 SAR 舰船目标检测 .....	2
1.2.2 极化 SAR 舰船目标检测 .....	3
1.3 论文内容 .....	4
第 2 章 基于 PWF 的极化 SAR 图像舰船目标检测 .....	6
2.1 引言 .....	6
2.2 海杂波统计特性 .....	6
2.3 极化白化滤波器 .....	7
2.4 自适应 PWF 舰船检测算法 .....	8
2.5 基于 GPU 的 PWF 算法实现 .....	9
2.5.1 GPU 算法设计与优化 .....	9
2.5.2 多 GPU 协同算法设计 .....	11
2.6 实验结果与加速比测试 .....	11
2.7 小结 .....	12
第 3 章 基于混合对数正态模型 SAR 图像目标检测 .....	14
3.1 引言 .....	14
3.2 混合对数正态模型 .....	14
3.3 海杂波分布参数估计 .....	15
3.4 应用 LMM 模型进行 CFAR 舰船检测 .....	16
3.5 GPU 算法优化 .....	17
3.6 LMM 实验结果 .....	19
3.7 小结 .....	21
第 4 章 基于 PCDM 的极化 SAR 图像舰船目标检测 .....	22
4.1 引言 .....	22
4.2 PCDM 理论背景 .....	22

4.2.1 极化 SAR 散射表征与 SPAN 理论 .....	22
4.2.2 极化协方差差异矩阵 .....	23
4.3 基于 PCDM 的舰船目标检测算法 .....	24
4.4 基于 GPU 的 PCDM 算法设计 .....	26
4.5 PCDM 算法检测结果 .....	27
4.6 小结 .....	30
第 5 章 总结与展望 .....	32
插图索引 .....	33
表格索引 .....	34
公式索引 .....	35
致 谢 .....	36
声 明 .....	37
附录 A 外文资料的调研阅读报告或书面翻译 .....	38
A.1 介绍 .....	38
A.2 极化 SAR 图像概率统计模型 .....	38
A.3 变分贝叶斯推断 .....	38
A.4 实验与结果 .....	38
A.5 结论 .....	38

## 主要符号对照表

HPC	高性能计算 (High Performance Computing)
CUDA	统一计算设备架构 (Compute Unified Device Architecture)
GPU	图形处理器 (Graphics Processing Unit)
SAR	合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar)
CFAR	恒虚警率 (Constant False Alarm Rate)
SPAN	散射总功率
CTD	相干目标分解 (Coherent Target Decomposition)
ICTD	非相干目标分解 (Incoherent Target Decomposition)
PWF	极化白化滤波器 (Polarimetric Whitening Filter)
APWF	自适应极化白化滤波器
LMM	混合对数正态模型 (Lognormal Mixture Model)
EM	最大期望算法 (Expectation Maximization algorithm)
PCDM	极化协方差差异矩阵
LBP	局部二值模式 (Local Binary Patterns)
PSH	基座舰船高度 (Pedestal Ship Height)
$\mathbf{X}^T$	矩阵转置
$\mathbf{X}^H$	矩阵共轭转置
$\Gamma$	Gamma 函数
$E(\cdot)$	计算期望
$  $	矩阵行列式或绝对值
$\ln$	对数函数
$\exp$	指数函数
$\Sigma_c$	极化协方差矩阵
$p_{fa}$	虚警概率
$F_1$	品质因数
T	检测阈值



# 第 1 章 引言

## 1.1 研究背景与意义

合成孔径雷达 (synthetic aperture radar,SAR)<sup>[2]</sup> 以微波遥感的形式进行对地观测,可以不受天气、光照等自然条件的影响,具有全天候、全天时的实时对地观测能力。鉴于 SAR 系统可以提供丰富的地物散射特征等信息,目前其被广泛应用于自然灾害评估,海洋维权,对地侦察,资源勘探等领域<sup>[2]</sup>。SAR 技术自从 20 世纪 50 年代诞生以来,已经取得了长足的发展。最初其被应用于侦察和检测人造目标等军用领域,进入到七十年代,一些用来探测地表物理特征的民用机载 SAR 系统被相继研发。1978 年,第一颗民用 SAR 卫星 Seasat 发射。二十世纪九十年代欧洲、日本、加拿大分别发射了 ERS-1/2、JERS-1、Radarsat-1 星载 SAR 系统。21 世纪进入 SAR 系统发展的黄金时代,如今在轨运行的星载 SAR 系统超过 20 个,我国于 2016 年发射了高分三号遥感卫星 (GF-3),这是一颗 C 波段分辨率达到 1 米的多极化合成孔径雷达卫星。

广泛的应用场景需求在不断推动着 SAR 成像技术的迅猛发展,起初 SAR 系统只能以一种收发电磁波的模式去获取数据,工作频段、角度单一。如今 SAR 系统成像模式日渐多样化,产生了多极化,多角度,多波段,多识相的组合观测模式。相较于单极化 SAR 系统,多极化 SAR 可以采用多种组合观测模式去获得地物目标的完备的散射信息。目前 SAR 成像技术在向高空间,时间分辨率的方向发展,对于高分辨 SAR 影像的后处理以满足各领域应用需求等前沿科学问题正在引发学者广泛关注<sup>[2]</sup>。

近几年,图形处理器 (GPU) 因其高效的计算性能引起了科研人员的广泛关注。最初图像处理器作为协处理器仅被用来加速图像处理与实时图像渲染以提供平滑与流畅的屏幕图形显示。如今随着深度学习的快速发展,GPU 因其强大的数据处理能力与高内存带宽已经成为神经网络训练的标配。在 SAR 领域,GPU 也被广泛应用 SAR 图像的生成与后处理<sup>[2,3]</sup>。与此同时,GPU 编程接口 CUDA 也一直与时俱进,其提供了一套基于 C/C++ 的 API 以便捷开发人员创建可以在其上运行的软件。

海上舰船目标检测与识别是极化 SAR 重要应用之一。我国海域辽阔,近些年来海上安全形势日趋严峻,海洋管控能力亟待提升。基于极化 SAR 的舰船目

标检测与识别对于航线管理，海上救援，航洋权益争端等具有非常重要的意义。然而传统的极化 SAR 目标识别方法存在着计算复杂度高，耗时长等问题。针对此问题，我们基于 CPU+GPU 的异构架构将 SAR 目标检测算法中可并行的部分附加到高速的 GPU 中去执行，从而全面提升 SAR 系统对目标快速识别与处理的能力。

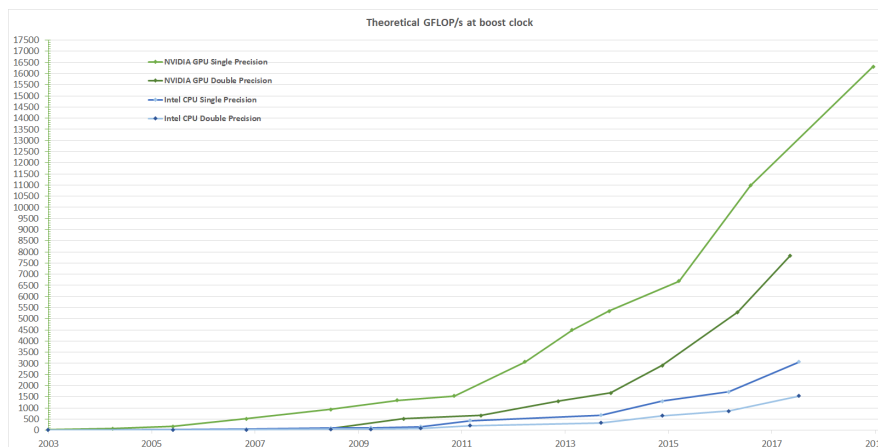


图 1.1 CPU 和 GPU 浮点运算比较

## 1.2 研究现状与进展

本节介绍 SAR 图像舰船检测方法研究与进展，包含了单极化 SAR 图像舰船检测与极化 SAR 图像舰船目标检测。

### 1.2.1 单极化 SAR 舰船目标检测

通常星载 SAR 系统可以对大范围海面进行成像，对于原始单通道 SAR 图像数据，舰船目标检测主要包含了以下几个过程：海陆分割，截取含有潜在目标的候选检测区域，使用目标检测算法鉴别候选区域中的舰船像素与杂波像素<sup>[2]</sup>。目前大多数检测算法都是依据舰船目标与海面后的向散射特性的差异来进行鉴别。舰船目标包含大量二面角，后向散射系数较高，在强度图像中表现为一块高亮区域，而海杂波则为无规则的灰暗斑点噪声的形态。

在基于幅值的单极化 SAR 图像舰船目标检测方法中，应用最广泛的为基于恒虚警率 (CFAR) 的舰船检测方法。CFAR 检测方法根据滑动窗选择待检测像素周围的海杂波像素，然后按照事先提出的统计分布模型依据选择的海杂波像素去估计杂波分布参数，得到杂波分布后根据恒虚警率  $P_{FA}$  去计算自适应分割阈值  $T$ ，当待检测像素值大于阈值  $T$  时将该像素判定为舰船像素<sup>[2]</sup>。对于恒虚警

率舰船检测方法, 其检测精度主要受到两个因素的影响, 雷达系统本身的参数, 如极化模式、入射角等, 另一个是成像区域海况条件如风速风向等。

对于海杂波的统计建模方法, Novak<sup>[2]</sup>提出了双参数 CFAR 检测方法, 该方法采用高斯分布对海杂波进行统计建模, 实验结果表明在低分辨率匀质杂波条件下, 双参数 CFAR 检测器拥有较好的检测性能。此外研究人员还采用了其他分布模型如瑞利分布、K 分布、对数正态分布、Weibull 分布来描述海杂波分布特性, 经实验验证, 这些统计模型都可以有效区分 SAR 图像中的舰船目标与背景杂波<sup>[2]</sup>。虽然有很多可供选择的统计分布模型, 但是在高分辨率的复杂海洋场景中, 这些模型对杂波的拟合精度依然不能满足检测要求, 于是一些学者提出了非参数化的检测方法。Jiang et al.<sup>[2]</sup>提出了概率神经网络 (Probability neural networks, PNN) 来估计海杂波的概率密度函数。Gao<sup>[2]</sup>提出了基于 Parzen-window-kernel 的检测方法, 该方法利用 Parzen 窗中的核函数去逼近真实 SAR 图像直方图, 从而完成对杂波概率密度函数的估计。近些年来一些基于深度学习的方法也被应用到 SAR 图像目标检测中。Kang<sup>[2]</sup>将光学图像目标检测网络 Faster-RNN 与 CFAR 检测器相结合, 将 Faster-RCNN 网络输出的举荐目标区域作为滑动窗的保护区域对 CFAR 算法进行改进。实验结果表明, 该算法对可以有效提升对 SAR 图像中尺寸较小的舰船目标的检测能力。

### 1.2.2 极化 SAR 舰船目标检测

极化 SAR 系统通过组合不同的电磁波收发模式获得了更加丰富的地物目标极化散射信息, 研究表明加入极化信息可以提升检测器对 SAR 图像中舰船目标的检测能力<sup>[2, 2]</sup>。极化 SAR 舰船目标检测方法主要分为两大类, 一类是基于海杂波统计分布特性的方法, 另一类是基于极化分解的方法。在第一类方法中, 首先对各个通道的极化信息进行融合构造一种新的检测量, 之后计算海杂波像素对应检测量服从的统计分布, 接下来使用 CFAR 检测器计算检测阈值, 当被检测像素大于检测阈值时判定为舰船目标像素。在多通道极化信息融合的方法中, 最简单的为 SPAN 即散射矢量极化协方差矩阵的迹, 该检测量表征了地物目标的后向散射总功率。极化白化滤波器 (PWF) 以最小化重建图像斑点噪声的方式去融合不同通道的极化信息, Novak<sup>[2]</sup>采用 K 分布对 PWF 重构图像中的海杂波像素进行统计建模, 实验结果表明 PWF 方法可以抑制图像中的相干斑噪声并得到了不错的检测结果。最优极化检测器 (OPD)<sup>[2]</sup>在融合过程中将目标物体的极化协方差矩阵考虑在内, 检测性能优于 PWF 方法。对于纹理多变、复杂海况

的应用场景，匀质模型不能很好的对海杂波进行拟合，学者提出了乘积模型，将图像描述为纹理模型与匀质模型的乘积，对纹理模型的统计建模比较常用的有方根 Gamma 分布<sup>[2]</sup>，逆 Gamma 分布<sup>[2]</sup>，Fisher 分布<sup>[2]</sup>等。宋<sup>[2]</sup>基于乘积模型提出了基于变分贝叶斯推断的舰船检测方法。

基于极化分解的方法从散射矩阵或相干矩阵中提取目标物体的散射特征。其中散射矩阵的极化分解要求目标回波相干，又被称为相干目标分解 (CTD)。相干分解中最基本的分解为 Pauli 分解，其将散射矩阵分解为表面散射，二面角散射，体散射等泡利基，各散射成分值可表示为一向量，使用支持向量机 (SVM) 的方法对该向量进行分类。另一类是基于协方差矩阵或相干矩阵的非相干目标分解 (ICTD)。1998 年 Freeman<sup>[2]</sup>提出了一种基于极化协方差矩阵的分解方法，其将协方差阵分解为体散射，面角散射和二面角散射分量。张涛<sup>[2]</sup>提出了基于极化协方差差异矩阵检测方法，该方法利用了检测像素的邻域信息得到了极化协方差差异矩阵，并提取了极化协方差差异矩阵的基础舰船高度 (PSH) 特征用于舰船目标的检测。近些年来一些使用深度卷积神经网络的方法也用于极化 SAR 图像的检测与分类中<sup>[2]</sup>。

### 1.3 论文内容

本文主要研究了基于 GPU 的极化 SAR 图像舰船检测方法，文章结构框架如图1.2所示，第一章为引言，介绍了极化 SAR 图像舰船目标检测的背景、研究现状和意义。第二章针对极化 SAR 图像，研究了并行的极化白化滤波器舰船检测方法。第三章研究了基于混合对数正态分布的单极化 SAR 图像舰船检测方法。第四章从空间相干矩阵的角度研究了基于协方差差异矩阵的极化 SAR 舰船目标检测方法。



图 1.2 论文内容安排

第二章研究基于 PWF 极化 SAR 舰船检测方法。本章首先介绍了 SAR 图像中斑点噪声的概念。为了抑制斑点噪声，我们将不同通道的极化信息进行融合。并推导出当海杂波散射矢量满足复高斯分布时的极化白化滤波器参数计算公式。之后采用极化白化滤波器生成重构图像，并应用 CFAR 检测器进行检测。本章在完成算法流程分析后，设计了基于 GPU 的并行极化白化滤波器舰船检测算法与多 GPU 协同实现的方案。最后通过实验，我们验证了基于 GPU 算法的有效性与高校性。

第三章研究了基于混合对数正态模型的单极化 SAR 舰船检测方法。本章我们首先介绍了混合对数正态分布的概念与其参数估计方法。然后使用 LMM 模型对海杂波进行建模并应用 CFAR 检测器进行检测。针对该算法中迭代计算分布参数的过程，本章提出了基于 GPU 的优化方案，最后实验结果证明本章的基于 GPU 的方法在算法时间性能上获得了数十倍的提升。

第四章研究了基于极化协方差差异矩阵的极化 SAR 舰船检测方法。本章我们首先回顾了极化 SAR 散射表征与 SPAN 理论，并对极化协方差差异矩阵做了详细的介绍。我们提取了极化协方差差异矩阵的 SPAN 值与 PSH 特征用于舰船目标检测并阐述了该算法在 GPU 上实现的具体细节，最后通过实验证明了本章基于 GPU 的 PCDM 舰船检测方法检测效果相较于 PWF 方法在时间性能与检测精度上都有明显的提升。

第五章对本文的工作进行了总结并提出了对未来工作的展望。

## 第 2 章 基于 PWF 的极化 SAR 图像舰船目标检测

### 2.1 引言

在 SAR 图像中，斑点噪声是影响图像品质的主要因素之一。通常其由一个分辨单元内多个散射体的回波相干叠加形成。相干斑的存在导致舰船目标检测中的虚警、漏报率提升，从而影响舰船目标检测的性能，因此相干斑噪声的处理一直被认为是 SAR 图像处理中最重要的问题。在拥有多极化的 SAR 数据后，通过将散射矩阵各个通道信息进行融合，提取极化特征，可以获取相干斑抑制的重构图像。通常图像 SPAN 即散射总功率为最基本的极化特征，相较于单通道 SAR 图像，其可以显著的减少 SAR 图像中的相干斑噪声。在本章中采用了重构图像的标准差  $s$  与均值  $m$  比进行相干斑噪声的衡量，并证明了极化白化滤波器可以使该比值达到最小，从而得到最优的重构图像。最后我们采用 PWF 方法与恒虚警率检测器对极化 SAR 图像进行处理，结果表明基于极化白化滤波器的 CFAR 方法可以有效鉴别海上舰船目标。

### 2.2 海杂波统计特性

此节采用复高斯模型来描述海杂波的数学统计特性，包含三个通道的极化散射矢量描述如下

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{hh} \\ \mathbf{S}_{hv} \\ \mathbf{S}_{vv} \end{bmatrix} \quad (2-1)$$

极化散射矢量中的 HH, HV, VV 通道满足联合复高斯分布，因此极化散射矢量满足如下的概率密度分布

$$f(\mathbf{X}) = \frac{1}{\pi^3 |\Sigma_c|} \exp(-\mathbf{X}^H \Sigma_c^{-1} \mathbf{X}) \quad (2-2)$$

其中  $\Sigma_c = E(\mathbf{X}\mathbf{X}^H)$  是极化散射矢量的协方差， $H$  代表共轭转置， $E(\cdot)$  代表求期望。通常假设海杂波散射矢量具有零均值即  $E(\mathbf{X}) = 0$ ，当同极化矢量  $\mathbf{S}_{hh}$  与交

叉极化矢量  $\mathbf{S}_{hv}$  间存在耦合时，海杂波极化协方差可以描述为以下的形式：

$$\Sigma_c = \sigma_{hh} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \rho\sqrt{\gamma} \\ 0 & \varepsilon & 0 \\ \rho^*\sqrt{\gamma} & 0 & \gamma \end{bmatrix} \quad (2-3)$$

在上式中 \* 代表共轭转置

$$\begin{aligned} \sigma_{hh} &= E(|S_{hh}|^2) \\ \varepsilon &= \frac{E(|S_{hv}|^2)}{E(|S_{hh}|^2)} \\ \gamma &= \frac{E(|S_{vv}|^2)}{E(|S_{hh}|^2)} \\ \rho &= \frac{E(S_{hh} \cdot S_{vv})}{\sqrt{E(|S_{hh}|^2)E(|S_{vv}|^2)}} \end{aligned} \quad (2-4)$$

## 2.3 极化白化滤波器

利用 HH, HV, VV 三个通道的极化信息构建最优图像，采用重构图像的标准差  $s$  与均值  $m$  之比进行斑点噪声的度量。下面将证明极化白化滤波器可以使得标准差与均值的比值达到最小。

$$\frac{s}{m} = \frac{\sigma(y)}{E(y)} \quad (2-5)$$

上式中随机变量  $y$  代表重构的图像像素，当给定 SAR 图像 HH、HV、VV 通道极化信息后，通过下式来重建斑点抑制图像

$$y = \mathbf{X}^H \mathbf{A} \mathbf{X} \quad (2-6)$$

在式2-6中，权重矩阵  $\mathbf{A}$  为厄米共轭且正定，为了找到最优权重矩阵  $\mathbf{A}^*$ ，将式2-5做如下变换，式2-7中， $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  为矩阵  $\Sigma_c \mathbf{A}$  的特征值，因此寻找最优权重矩阵的问题被转化为寻找特征值  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  使得  $s/m$  比值达到最小。显然当矩阵  $\Sigma_c \mathbf{A}$  为单位阵特征值  $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3$  时，该比值达到最小。因此  $\mathbf{A}^* = \Sigma_c^{-1}$  被称作极化白化滤波器。

$$\begin{aligned}
\sigma(y) &= tr(\Sigma_c A)^2 = \sqrt{\sum_{i=1}^3 \lambda_i^2} \\
E(y) &= tr(\Sigma_c A) = \sum_{i=1}^3 \lambda_i \\
\frac{s}{m} &= \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^3 \lambda_i^2}}{\sum_{i=1}^3 \lambda_i}
\end{aligned} \tag{2-7}$$

获得极化白化滤波器后，通过式2-8得到最小化相干斑重构图像。从式2-8可以看出相干斑抑制图像是对  $|S_{hh}|^2, |S_{hv}|^2, |S_{vv}|^2$  三个通道进行优化权重求和得到的强度图像。相较于单极化强度图像，极化白化滤波器提供了  $4.8dB$  的相干斑噪声抑制。

$$y = \frac{|S_{hh}|^2}{\sigma_{hh}(1 - |\rho|^2)} + \frac{|S_{vv}|^2}{\sigma_{hh}(1 - |\rho|^2)\gamma} + \frac{|S_{hv}|^2}{\sigma_{hh}\epsilon} - \frac{2\text{Re}(\rho \cdot S_{hh}^* \cdot S_{vv})}{\sigma_{hh}(1 - |\rho|^2)\sqrt{\gamma}} \tag{2-8}$$

采用实验数据来验证 PWF 相干斑抑制效果，实验数据选择的是 C 波段多极化大连港的原始图像数据，所截取图像为  $1000 \times 1000$  的海洋场景，在自适应极化白化滤波器方法中，使用大小为  $31 \times 31$  的滑动窗选择海杂波像素来计算协方差矩阵，下表为原图像 SPAN 方法，PWF 方法与 APWF(自适应极化白化滤波器)方法处理后图像的标准差与均值比

表 2.1 HH、SPAN 与 APWF 强度图像标准差与均值比

滤波方法	HH 强度图像	SPAN 强度图像	APWF 强度图像
s/m	2.02	2.25	11.24

从不同强度图像结果中可以看到，SPAN 强度图像与 APWF 强度图像对相干斑都有抑制效果，并且增强了船-海之间的对比度，可以对重构强度图像进行统计分析来进一步实施舰船检测<sup>[7]</sup>。

## 2.4 自适应 PWF 舰船检测算法

不同天气条件下的海况不同，因此在 SAR 图像不同区域的杂波表现差别也很大，为了让算法具有更好的普适性，采用自适应极化白化滤波器 (Adaptive



PWF) 舰船检测方法。在本章前三节描述了当海杂波散射矢量满足复高斯分布时, 可以采用滑动窗选择局部海杂波散射矢量计算极化白化滤波器参数, 并使用该滤波器生成相干斑抑制图像, 在文献<sup>[2]</sup>中表明, 使用自适应极化白化滤波器生成的重构强度图像值满足如下分布:

$$f_y(y) = (N)^{N-\rho+1} \frac{y^{(\rho-1)}}{(y+N)^{N+1}} \frac{\Gamma(N+1)}{\Gamma(\rho)\Gamma(N-\rho+1)} \quad (2-9)$$

式2-9中,  $\rho$  为极化散射矢量的维度,  $N$  为滑动窗内极化散射矢量的个数。当给定恒虚警率时我们可以轻松的检测阈值, 当  $N$  很大时检测阈值与恒虚警率近似有以下的关系。式2-10中,  $T$  代表检测阈值,  $P_{FA}$  为恒虚警率。

$$P_{FA} = \exp(-T) \sum_{k=0}^{\rho-1} \frac{T^k}{k!} \quad (2-10)$$

整个算法流程如 Alogrithm 1所示, 在该算法中要对图像中的所有像素值进行判断, 所以使用的滑动窗的个数等于图像的像素数量。对于大小为  $N$  的滑动窗, 每一个滑动窗内算法时间复杂度为  $O(N)$ , 整个算法的时间复杂度为  $O(n^3)$ , 因此使用滑动窗检测运行时间与滑动窗和原始 SAR 图像大小有关。当图像或滑动窗尺寸较大时, 整个算法的时效性差不能满足实时检测的要求, 所以要在时间方面进行优化。此算法各个滑动窗所对应的自适应极化白化滤波器参数估计相互独立, 因此可以采用并行计算的方式来提高算法的运行效率。

## 2.5 基于 GPU 的 PWF 算法实现

### 2.5.1 GPU 算法设计与优化

对于 APWF 舰船检测方法, 不同像素对应的自适应极化白化滤波器参数计算过程完全相同, 只是通过滑动窗选取的海杂波数据不同, 因此我们将可并行且计算密集的滤波器参数计算部分放到 GPU 上去执行如算法2所示。在 GPU 编程模型中, 线程有两个并行的层次分别是网格层次和线程块层次, 一个线程块中的线程会作为一个整体被调度到流多处理器上去执行。为充分利用 GPU 硬件资源, 将线程块大小设计为  $32 \times 32$  即每个线程块中包含 1024 个线程, 网格大小设计为  $16 \times 16$ 。实验中使用的图像大小为  $1000 \times 1000$ , 故让一个线程块中共 1024

---

**Algorithm 1:** 自适应极化白化滤波器舰船检测算法

---

**Input:** 极化 SAR 数据,  $S_{hh}$ ,  $S_{hv}$ ,  $S_{vv}$

- 1 对原始图像边缘根据所选择的滑动窗大小做镜像延拓。
- 2 **foreach** 图像中的像素 **do**
- 3     从原始 SAR 图像中根据滑动窗选择海杂波散射矢量  $\mathbf{X}$
- 4     计算自适应极化白化滤波器参数  $\Sigma_c$
- 5     根据自适应极化白化滤波器生成重构强度图像值  $y$
- 6     依据式2-10, 采用牛顿迭代法得到检测阈值  $T$
- 7     得到检测结果  $result = y > T$
- 8 **end**

**Output:** 二值舰船检测结果图像  $result$

---

个线程对应处理 SAR 图像一行的数据, 每个线程通过自身的二维索引和 SAR 图像中的像素一一对应。

将线程索引与像素索引对应后, 从 GPU 全局内存 (Global Memory) 中读取该像素邻域的海杂波数据。在一个线程块内, 数据的读取是以线程束的方式进行的。一个线程束中包含 32 个线程, 当线程束中线程访问的数据地址在 128 字节范围内时, 该访问可以进行合并。合并访问可以大大加快内存访问的速度, 提升总线利用效率。因此在算法设计过程中, 将全局数据复制到线程私有空间采用行访问的形式可以保证线程束中线程访问的地址空间位于 128 字节段范围内。

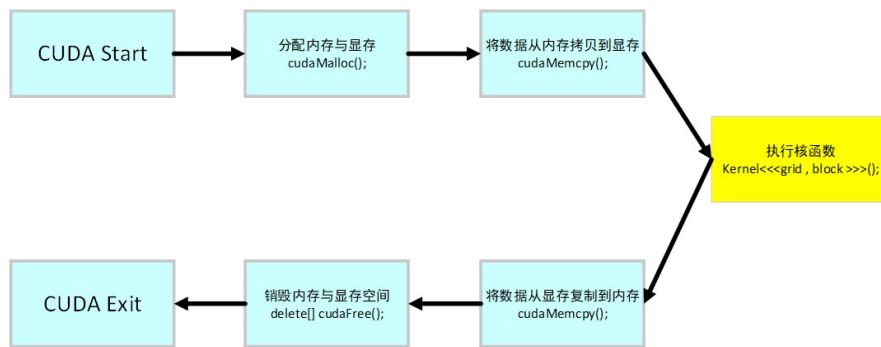


图 2.1 CUDA 执行流程

核函数的设计, 在 GPU 上所有的线程按照单指令多线程的方式去执行。不同的线程在私有数据空间上去执行相同的指令。对于 APWF 方法, 核函数数的主要任务是计算极化白化滤波器参数即海杂波散射矢量的协方差矩阵, 协方差

---

**Algorithm 2:** 并行 PWF 方法 CUDA 简化执行流程代码

---

```
1 cudaSetDevice();
2 cudaMemcpy2D(imgGPU, pitch imgCPU, pitch, size, n
  cudaMemcpyHostToDevice);
3 cudaStreamCreate(Stream1)
4 fPWF<<grid,block,0,stream1>>(parameters)
5 cudaDeviceSynchronize()
6 cudaMemcpy(resCPU,resGPU,size,cudaMemcpyDeviceToHost)
7 imshow(); Timeshow()
```

---

矩阵计算主要涉及一个  $3 \times N$  与一个  $N \times 3$  的矩阵相乘，对于该矩阵乘法，采用了动态并行的方式进行了进一步的优化，从当前核函数中创建新的核函数来完并行完成矩阵乘法运算。得到滤波器参数后，按照式2-6生成重构强度值，并与牛顿迭代法获得的阈值做分割，输出二值检测结果图像。

### 2.5.2 多 GPU 协同算法设计

多 GPU 协同 APWF 方法实现，当多个 GPU 通过 PCIe 总线连接时，不同 GPU 设备之间可以进行通信与同步。多 GPU 编程中要首先确定系统中可用的 GPU 数量，之后将计算任务合理的分配到各个 GPU 上。在 APWF 算法设计中，首先为各个 GPU 设备分配设备内存，流和事件并将 SAR 图像数据从主机内存拷贝至设备内存。然后依据系统的 GPU 数量，将原 SAR 图像进行按行划分并将计算任务分配到不同的 GPU 流上。当流中的核函数执行完成后，将不同 GPU 上的检测结果复制到主机内存中，作为最终的检测结果。在多 GPU 编程实现过程中，为了便于多 GPU 之间进行通信，采用了同一虚拟寻址的技术，将所有变量映射到相同的虚拟地址空间中，方便主机和设备进行访问。

## 2.6 实验结果与加速比测试

本次实验在 NVIDIA TIATN V 平台上对 APWF 舰船检测方法进行测试，图2.2为海洋 SAR 图像检测结果，为了衡量 SAR 图像的检测效果，定义  $F_1 = \frac{N_{tt}}{N_{fa} + N_{gt}}$  作为评价指标，其中  $N_{tt}$  为正确检测舰船目标个数， $N_{fa}$  为虚警的数量， $N_{gt}$  为数据船只的真实数量。

本次实验采用的 GPU 平台为 NVIDIA TiTan V, 相对比的 CPU 平台为 (Intel(R) Core(TM) i9-7920X CPU) 处理器, 实验所用 SAR 图像大小为 1000x1000 , 滑动的大小为 31, 经过多次测试, 不同算法消耗时间如表3.1所示。由测试结果可知对于 GPU 多线程 PWF 检测方法在检测效率上提升了近 32 倍, 而在多卡的条件下提升了 53 倍。

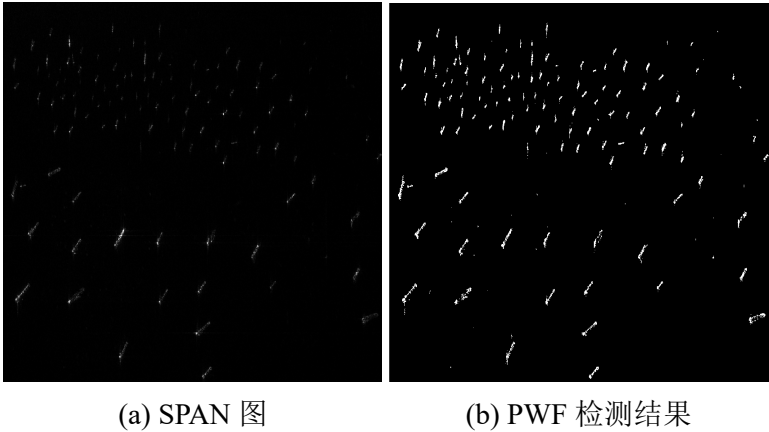


图 2.2 PWF 图像检测结果

表 2.2 SAR 图像极化白化滤波器检测结果

检测方法	船只总数	总检测数量	正确检测数量	虚警数量	漏报数量	$F_1$
PWF	118	123	117	6	1	0.943

表 2.3 不同平台 PWF 算法运行时间

检测算法	运行平台	运行时间/s
PWF(C++)	(Intel(R) i9-7920X CPU)	67.4
GPU 多线程 PWF	GPU(Titan V)	2.1
多卡协同 PWF	2 GPU(Titan V)	1.27

## 2.7 小结

在本章中, 我实现了基于 GPU 的高性能并行极化白化滤波器 SAR 图像舰船目标检测算法, 本章首先对自适应极化白化滤波器检测算法原理进行分析, 然

后结合 GPU 架构特点，将计算密集且可并行的滤波器参数计算部分放到 GPU 上去并行执行，并进一步将数据和计算任务分配到多 GPU 上去执行，对原算法在时间性能上进行优化。实验结果表明，相比于串行基于 CPU 的检测方法，基于 GPU 的并行检测算法在时间性能上获得了数十倍的提升。

## 第 3 章 基于混合对数正态模型 SAR 图像目标检测

### 3.1 引言

在使用恒虚警率的 SAR 图像目标检测方法中，对海杂波的精准建模是其中至关重要的问题。目前可以有效对海杂波建模的分布模型有锐利分布，K 分布，威布尔分布，对数高斯分布等<sup>[2]</sup>。在本章中我采用混合对数正态模型对强度 SAR 图像中的海杂波进行建模，实质上对数混合正态模型 (lognormal mixture model) 等价于强度 SAR 图像在对数域上的混合高斯模型<sup>[2]</sup>，因此可以采用 EM 方法估计分布参数，得到海杂波概率密度分布后应用牛顿迭代法计算分割阈值输出检测的结果图像

### 3.2 混合对数正态模型

定义强度 SAR 图像中的像素值  $\mathbf{x}$  为一随机变量，当其满足式3-1中的分布时，我们称随机变量  $\mathbf{x}$  服从包含 K 个成分的混合对数正态分布。

$$f_{\mathbf{x}}(x) = \sum_{i=1}^K \alpha_i \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i x} \exp\left(-\frac{(\ln x - \mu_i)^2}{2\sigma_i^2}\right), x > 0 \quad (3-1)$$

在式3-1中， $\alpha_i, \mu_i, \sigma_i (i = 1, 2, \dots, K)$  为混合对数正态分布参数其中  $\alpha_i$  权重系数满足式3-2所示关系。混合对数正态分布为 K 个对数正态分布加权求和。 $\mu_i, \sigma_i$  为各独立的对数正态分布参数。

$$\sum_{i=1}^K \alpha_i = 1, \alpha_i \geq 0 \quad (3-2)$$

对随机变量  $\mathbf{x}$  做形式变换，另  $\mathbf{Y} = \mathbf{x}$ ，我们可以推导出对于随机变量  $\mathbf{Y}$ ，其满足的概率密度函数如式3-3所示，显然随机变量  $\mathbf{Y}$  满足含有 K 个分量的混合高斯分布，等价来讲对于强度 SAR 图像采用混合对数正态模型对海杂波进行建模等价于在 SAR 图像对数强度域上应用混合高斯模型，因此在该建模方法中，首

先对强度 SAR 图像取对数变换到对数域，然后应用混合高斯模型描述海杂波的分布。

$$f_Y(y) = \sum_{i=1}^K \alpha_i \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} \exp\left(-\frac{(y - \mu_i)^2}{2\sigma_i^2}\right) \quad (3-3)$$

### 3.3 海杂波分布参数估计

在3.2节表明，混合对数正态分布在强度域与混合高斯分布在对数域上等价，因此混合正态分布中的参数计算可以采用目前现有的混合高斯模型参数计算方法。在文献<sup>[7]</sup>中表明了对于混合高斯模型，最大期望算法是一种高效的估计混合高斯分布参数的方法。因此在参数估计中，应用 EM 算法计算海杂波分布参数。参数迭代更新如式3-4 所示。在该式中  $\phi(y|\mu_k, \sigma_k)$  为均值为  $\mu_k$ ，标准差为  $\sigma_k$  的高斯分布， $n$  为参与估计的杂波像素数量， $y$  为取对数后的图像强度值。

$$\begin{aligned} \mu_k^{i+1} &= \frac{\sum_{j=1}^n \gamma_{jk} y_j}{\sum_j \gamma_{jk}} \\ \sigma_k^{i+1} &= \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n \gamma_{jk} (y_j - \mu_k^{i+1})^2}{\sum_j \gamma_{jk}}} \\ \alpha_k^{i+1} &= \frac{\sum_j \gamma_{jk}}{n} \\ \gamma_{jk} &= \frac{\alpha_k^i \phi(y_j | \mu_k^i, \sigma_k^i)}{\sum_{k=1}^K \alpha_k^i \phi(y_j | \mu_k^i, \sigma_k^i)} \end{aligned} \quad (3-4)$$

受自然条件风速、风向的影响，同一 SAR 图像不同区域的杂波分布不尽相同，因此采用图3.3所示的滑动窗进行局部杂波像素的选取，该滑动窗分为三个区域分别为检测像素区域，保护区域，杂波区域。合适大小的保护区域可以减少舰船目标像素对杂波统计分布参数估计的干扰。选定杂波像素值后，将其代入到式3-4中进行海杂波分布参数的迭代估计。

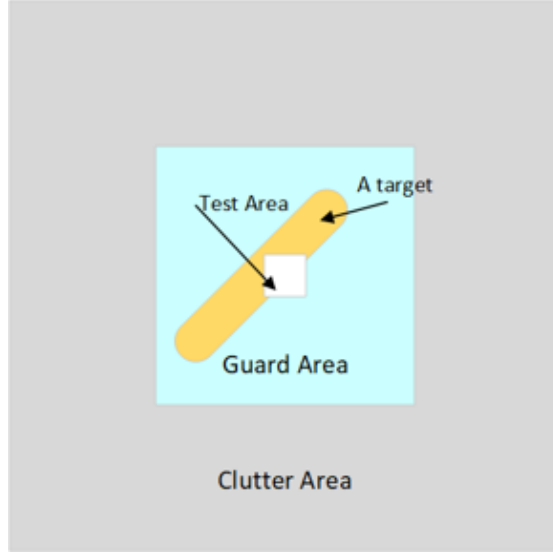


图 3.1 CFAR 滑动窗示意图

### 3.4 应用 LMM 模型进行 CFAR 舰船检测

当采用混合对数正态模型对海杂波分布进行建模后，根据给定的恒虚警率来实现 CFAR 方法检测。检测阈值通过式3-5来得到, 该式中  $T$  为恒虚警率所对应的检测阈值,  $f(x)$  为采用局部海杂波像素估计得到的混合对数正态分布,  $F(x)$  为  $f(x)$  对应的累积密度分布函数。我们采用牛顿迭代法来解决这个非线性的等式方程，迭代更新公式如式3-6所示, 迭代停止的条件为  $|T_{i+1} - T_i| < \delta$  当满足迭代精度要求后，最终的检测阈值为  $T^* = T_{i+1}$ 。

$$P_{FA} = \int_T^{+\infty} f(x)dx = 1 - F(x) \quad (3-5)$$

$$T_{i+1} = T_i - \frac{F(T_i) + P_{FA} - 1}{f(T_i)} \quad (3-6)$$

在3.2节，我们证明 LMM 模型等价于对数域的混合高斯模型， $f(x)$  的概率密度函数在对数变换后可表示为式3-3 的形式。混合高斯分布的累积概率密度函数可以表示为式3-7。其中  $erf(x)$  为误差函数，可以通过查表的方法来得到误差函数的值从而减少计算量。



---

**Algorithm 3:** 基于 LMM 分布的 CFAR 舰船检测算法

---

**Input:** HH 通道强度 SAR 图像

- 1 初始化, 将强度图像做对数变换得到对数域强度图像, 设置滑动窗的参数。
- 2 **foreach** 图像中的像素 **do**
  - 3 从对数强度图像中根据滑动窗选择海杂波像素值  $y$
  - 4 采用 EM 迭代算法计算 LMM 分布参数  $\mu_i$ ,  $\alpha_i$  与  $\sigma_i$
  - 5 根据式3-6计算检测阈值  $T$
  - 6 如果  $y(i, j) > T$  则该像素点为舰船目标像素点, 否则为背景杂波像素点。
- 7 **end**

**Output:** 二值舰船检测结果图像 *result*

---

$$F(x) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^K \lambda_k [1 + \operatorname{erf}(\frac{x - u_i}{\sqrt{2}\sigma_i})] \quad (3-7)$$

综合前几节所述, 使用混合对数正态模型的 CFAR 舰船目标检测流程如算法3所示

### 3.5 GPU 算法优化

通常应用滑动窗的 SAR 图像目标检测方法都面临着计算复杂度高, 时间效率低等问题。而滑动窗参数估计是一类典型的可以采用并行方式去计算的问题, 不同滑动窗之间所用数据和输出结果是相互独立的, 没有依赖与调用关系, 因此可以将滑动窗参数估计部分在 GPU 多线程上去执行。

在估计 LMM 分布参数的过程中, 要进行多次迭代并访问杂波像素值来更新分布参数, 因此减少此部分数据访存时间可以大幅提升算法的运行效率, 对于 GPU 而言总主要有以下几种存储类型, 一、二级缓存, 寄存器, 全局内存, 共享内存, 纹理内存, 常量内存。其中一二级缓存为不可编程的存储介质, 系统运行时环境会自动分配数据在其上的位置以获得更加优良的性能。对于可编程存储介质, 通常每个线程的寄存器数量非常有限, 因此不适合存储海杂波像素值。而全局内存、常量内存与纹理内存是板上内存, 访问延迟相较于片上的共享内

存要高 20 30 倍。因此我们选择片上的共享内存作为海杂波像素的高速暂存存储器，通过访问共享内存上的杂波像素，可以优化全局内存访问的模式，从而提升核函数的执行速度。

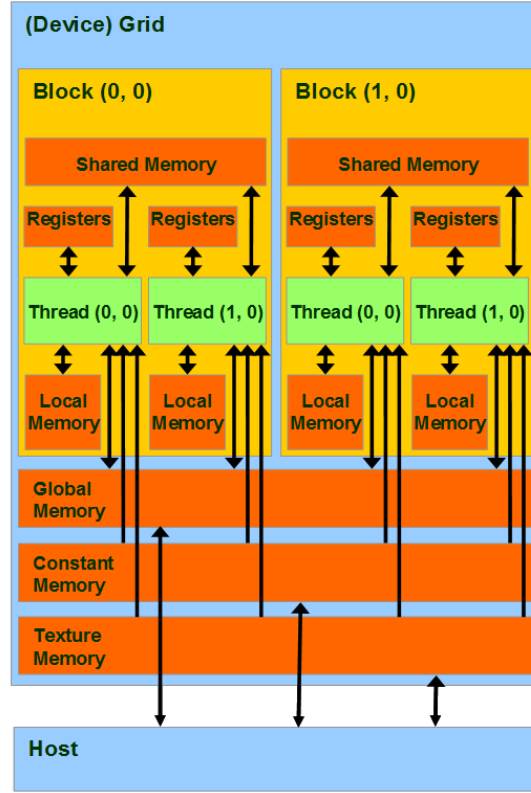


图 3.2 CUDA 内存模型

共享内存得容量有限，通常为 64KB。该存储空间位于流多处理器上类似于 CPU 的一级缓存，此内存空间被一个线程块中的所有线程共享。要合理的设置线程块的大小，避免因共享内存空间过度使用导致活跃线程束减少从而影响程序的执行效率。结合滑动窗的大小，我们最终将线程块的大小设置为  $8 \times 8$ ，将线程网格的大小设置为  $(\lfloor \frac{w+1}{8} \rfloor, \lfloor \frac{h+1}{8} \rfloor)$ 。其中  $\lfloor \cdot \rfloor$  代表向下取整， $w$  代表 SAR 图像的宽度， $h$  代表 SAR 图像的高度。

在分配好线程块与线程网格大小后，每个线程与 SAR 图像像素索引对应关系为：row = threadIdx.x + blockDim.x \* blockIdx.x; column = threadIdx.y + blockDim.y \* blockIdx.y; 之后根据滑动窗，将检测像素所对应的海杂波像素复制到该线程所对应的共享内存内存空间，在 EM 算法过程中在共享内存中读取杂波像素值进行分布的参数更新，当满足参数迭代停止条件后得到 LMM 分布参数，然后应用牛顿迭代法计算检测阈值  $T$ ，当检测像素值大于阈值  $T$  时，该像素被标记

为舰船目标像素。当所有线程执行完毕后，将检测结果从设备内存拷贝至主机内存，进行进一步的分析与处理。

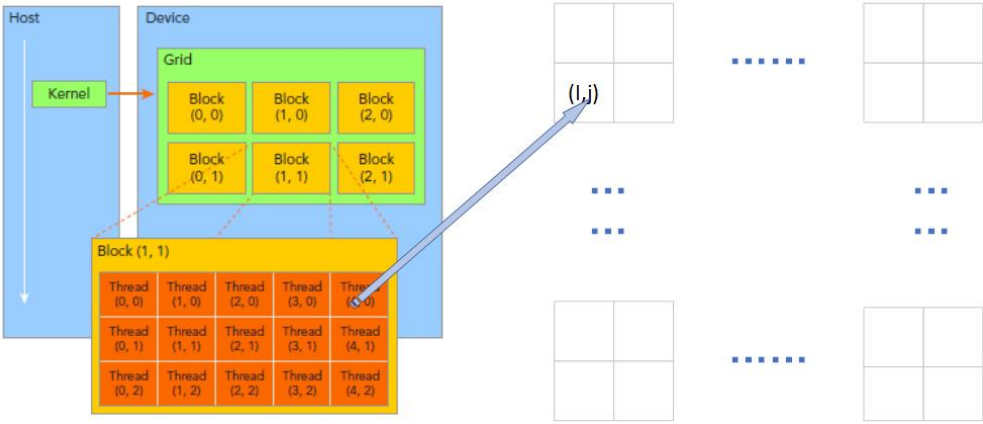


图 3.3 CUDA 线程与检测像素映射关系

### 3.6 LMM 实验结果

本次实验中我们使用的是由星载成像雷达系统 (SIR-C/X) 拍摄的香港维多利亚港的 SAR 图像数据。SAR 图像部分 HH 通道强度图像如图3.4所示

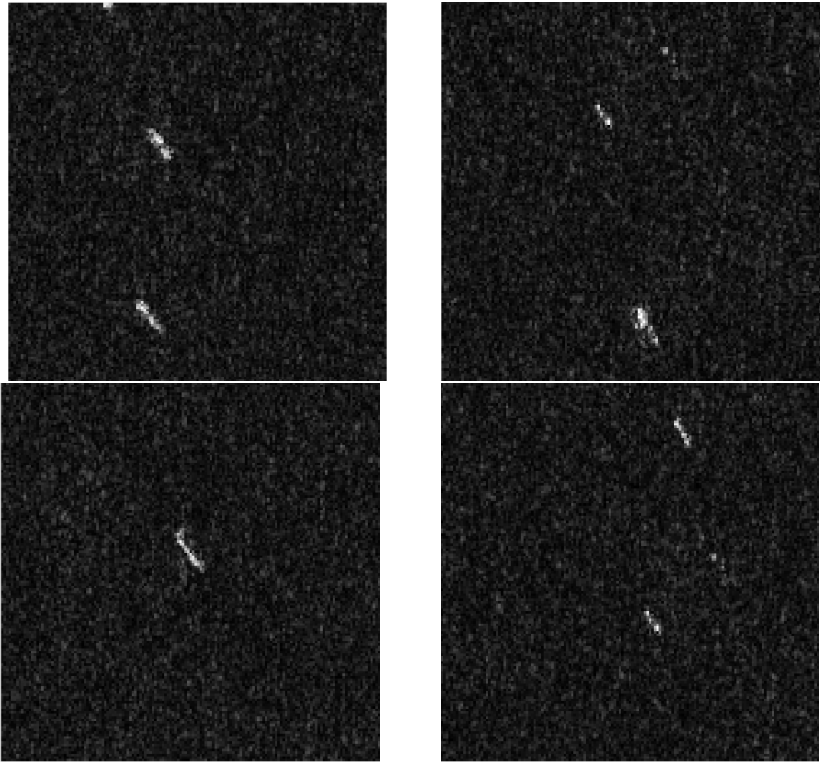


图 3.4 四张 SIR-C/XSAR 强度图像

在检测中我们设置恒虚警为  $1 \times 10^{-5}$ ，检测结果如图3.5所示，其中白色区域代表舰船目标像素区域，黑色区域代表背景杂波区域，从结果可以看出在给定的虚警率下 LMM 算法对目标像素与舰船像素作做出了正确的分割。本次实验使用的 GPU 为 NVIDIA TITAN V，经过多次实验验证，相较于使用单线程 CPU 的检测方法，程序运行的时间效率提升了近 21 倍，不同平台运行时间如表所示，原始 SAR 图像中的舰船数量较少，检测结果中虚警漏报的数量均为 0，准确率达到了 100%。

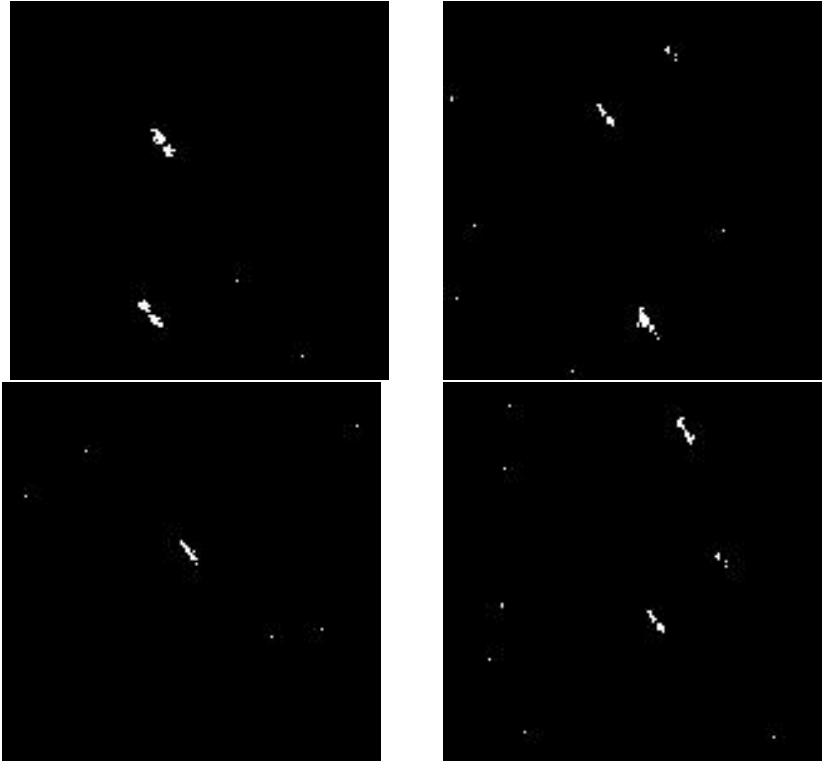


图 3.5 LMM 检测结果

表 3.1 串行与并行 LMM 算法运行时间对比

检测算法	运行平台	运行时间/s
LMM-CFAR(Matlab 单线程)	(Intel(R) i7-9750H CPU)	37.5
LMM-CFAR(GPU 多线程)	GPU(Titan V)	1.73

### 3.7 小结

本章我们实现了基于混合对数正态分布的恒虚警率 SAR 图像舰船检测方法，在本质上混合对数分布等价于强度 SAR 图像在对数域上的混合高斯分布，因此采用了 EM 算法与牛顿迭代法得到分布参数与检测阈值。对于滑动窗参数估计的部分，我们将其放置在 GPU 上进行并行计算，并使用延迟更低的共享内存来加快访存速度。相较于传统的串行解决方案，本章基于 GPU 的 LMM 方法不仅在时间性能获得了显著的提升同时还保证了检测效果的有效性。

## 第 4 章 基于 PCDM 的极化 SAR 图像舰船目标检测

### 4.1 引言

在第2章与第3章,我们实现了基于 PWF 与 LMM 模型的舰船检测算法,这两种方法都是基于图像强度信息进行统计建模以区分舰船目标与背景杂波。然而基于强度或幅值的方法易受海况的影响从而对海杂波的统计建模不够精确,使得检测性能下降。在本章中我们实现了基于极化协方差差异矩阵的极化 SAR 舰船目标检测方法。在极化 SAR 图像目标检测中,舰船目标点的邻域像素提供了丰富的空间相干信息,极化协方差矩阵主要度量了待检测像素与其 3x3 邻域像素的协方差矩阵的差异,基于该极化差异矩阵,我们应用了 SPAN 检测器得到了粗略的舰船检测结果。同时我们将 PCDM 矩阵进行分解提取了新的极化特征基础船高 (PSH),通过此极化特征结合 SPAN 检测器给出的初步结果进行综合判断得到最终的舰船检测结果。

### 4.2 PCDM 理论背景

#### 4.2.1 极化 SAR 散射表征与 SPAN 理论

通常散射矩阵被用来描述目标散射体的极化信息。在使用水平与垂直极化基的典型极化 SAR 系统中,复散射矩阵定义为如下的形式<sup>[2]</sup>,其中  $S_{HH}$  代表了水平发射水平接收的极化信息,当满足互易性的条件时,  $S_{HV} = S_{VH}$  此时复散射矩阵可用三维的复散射矢量  $k$  式4-2来表示。

$$S = \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix} \quad (4-1)$$

$$k = [S_{HH}, \sqrt{2}S_{HV}, S_{VV}] \quad (4-2)$$

将散射矩阵进行变换可以得到更多散射体的极化信息,如式4-3为散射矢量对应的 3x3 极化协方差矩阵<sup>[2]</sup>。在该式中  $\langle \rangle$  代表在空间域上求平均,  $||$  代表幅度值,  $H$  代表共轭转置。

$$[C] = \langle k \cdot k^H \rangle = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix} \quad (4-3)$$

在极化协方差矩阵  $C$  中，将对角线元素之和定义为后向散射总功率即 SPAN，如式4-4所示。还可以对极化协方差矩阵进行分解如式4-5所示<sup>[2]</sup>，其中  $\lambda_i$  为极化协方差矩阵特征值， $v_i$  为  $\lambda_i$  对应的特征向量。

$$\text{SPAN} = C_{11} + C_{22} + C_{33} \quad (4-4)$$

$$C = \sum_{i=1}^3 \lambda_i (v_i \cdot v_i^H) \quad (4-5)$$

#### 4.2.2 极化协方差差异矩阵

在计算机视觉领域，LBP 特征 (局部二值模式) 用来描述光学图像中的纹理特征，被广泛应用于人脸检测与目标识别。LBP 特征是将一个 3x3 区域内的中心像素值与邻域像素值做比较，并将得到的八位二进制结果重新排列构成一新二进制数值，该数值作为此区域中心像素的 LBP 特征值，如式4-6所示，其中  $g_i$  表示邻域内第  $i$  个像素的灰度值  $g_c$  为中心像素灰度值。 $x_c, y_c$  表示中心图像坐标。

$$[LBP]_{(x_c, y_c)} = \sum_{i=0}^{n-1} 2^{is(g_i - g_c)}, s(x) = \begin{cases} 1 & x \geq 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases} \quad (4-6)$$

类比光学图像中的 LBP 特征<sup>[2]</sup>，在极化 SAR 图像中，采用极化协方差矩阵来描述图像的极化信息。在光学图像中像素的灰度值可以通过 R、G 和 B 三个通道进行计算得到，而极化协方差矩阵也包含了极化 SAR 图像的 HH、HV 和 VV 通道的信息，但区别是灰度值只含有图像的一个特征，而极化协方差矩阵包含了九个极化特征，因此对此模型改进引入极化协方差差异矩阵 (PCDM)

定义  $C^{(x,y)}$  为极化 SAR 图像索引为  $x, y$  像素处的极化协方差矩阵，接下来计算其 3x3 邻域上的协方差累积差异  $P^{(x,y)}$ ，称  $P^{(x,y)}$  为极化 SAR 图像  $x, y$  处的极化协方差差异矩阵<sup>[2]</sup>，如式4-7所示，其中  $C_{m,n}^{(i,j)}$  为图像索引  $i, j$  处协方差矩阵的第  $(m, n)$  个元素。

$$P_{m,n}^{(i,j)} = \sum_{\Delta i=-1, \Delta j=-1}^1 \left| C_{m,n}^{(i,j)} - C_{m,n}^{(i+\Delta i, j+\Delta j)} \right| \quad (4-7)$$

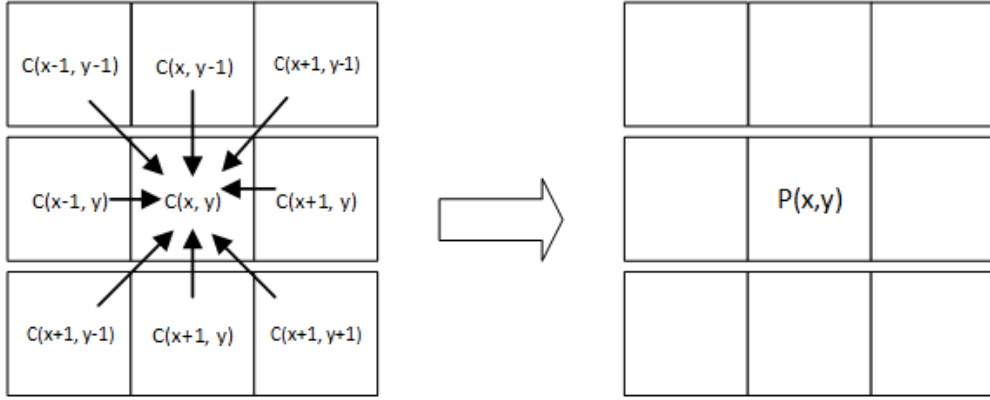


图 4.1 PCDM 矩阵计算示意图

### 4.3 基于 PCDM 的舰船目标检测算法

前三节我们描述了 PCDM 可以综合利用待检测像素与其邻域的像素的相干信息，在此基础上我们提出了基于极化协方差差异矩阵的舰船检测方法。对于输入的原始极化 SAR 图像数据，我们首先计算每个像素的极化协方差矩阵，然后按照式4-7计算每个像素对应的极化协方差差异矩阵。得到极化协方差差异矩阵  $\mathbf{P}$  后，首先对  $\mathbf{P}$  矩阵应用 SPAN 检测器，即当  $\text{SPAN}_{\mathbf{P}} > T_{\text{SPAN}}$  时，认定该检测像素为舰船目标像素。

对 PCDM 矩阵应用 SPAN 检测器后输出初步检测结果，为了提升检测的精度，我们进一步提取极化协方差差异矩阵的极化特征来区分舰船目标与背景杂波。通常 SAR 图像目标散射特性可以用极化特征来描述，例如极化分解，极化反对称性等极化特征。在文献<sup>[2]</sup>中提出了 pedestal height 特征来描述目标的散射特性，该极化特征实质上等价于极化协方差矩阵最小特征值与最大特征值的比值。实验表明低海况的背景杂波与方位向模糊像素的 pedestal height 极化特征值比真实的舰船像素要低很多。

$$\text{PSH} = \frac{|\lambda_3|}{|\lambda_1| + |\lambda_2|} \quad (4-8)$$

基于极化协方差差异矩阵我们重新计算这些极化特征，并将第二特征值考



---

**Algorithm 4:** 基于 PCDM 的舰船检测算法

---

**Input:** 原始极化 SAR 图像数据

- 1 初始化，计算每个像素的协方差矩阵。
- 2 **foreach** 图像中的像素 **do**
  - 3 根据协方差矩阵计算该像素对应的极化协方差差异矩阵
  - 4 计算该极化协方差差异矩阵的 SPAN 值
  - 5 计算极化协方差差异矩阵的基础船高 (PSH) 极化特征
  - 6 将差异矩阵 SPAN 值与经验阈值作比较，如果  $SPAN_{PCDM} > T_{SPAN}$ ，  
则将该像素为舰船像素。
  - 7 将极化特征 PSH 与经验阈值作比较，如果  $PSH_{P(x,y)} > T_{PSH}$ ，则该  
像素为舰船像素
- 8 **end**

**Output:** 最终舰船检测结果 *result*

---

虑在内，新的极化特征命名为 pedestal ship height(PSH)。对于提取的 PSH 极化特征，应用适当的检测阈值，来区分舰船目标与背景杂波像素。整个算法的流程如图4.2所示，算法描述如算法4所示

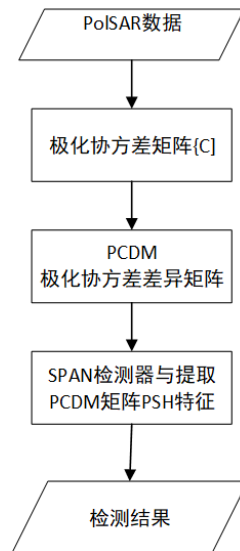


图 4.2 PCDM 检测流程示意图

## 4.4 基于 GPU 的 PCDM 算法设计

前几节描述了基于极化协方差差异矩阵的舰船目标检测算法,在该方法中需要对计算 SAR 图像每一个像素对应的协方差差异矩阵与其极化特征 PSH。在该方法中不同像素对应的极化协方差差异矩阵不同,且极化特征估计相互独立,因此将对每个像素的检测操作一一对应到 GPU 上的每个线程。

线程模块大小设计,本次实验的原始 SAR 图像数据大小为 1000x1000,线程块中的线程以 32 个为一组进行调度,为充分利用流多处理器资源,将线程块大小设计为 32x32。考虑到 GPU 同时并发线程数量的限制与全局内存空间容量,将线程网格大小设计为 16x16,对于线程块中的线程通过其二维线程索引 (threadIDx) 与原始 SAR 图像上的列一一对应,使用线程块索引 (blockIDx) 与原始 SAR 图像的行去对应。我们设计的线程网格数量为 256 小于原始 SAR 图像的行数,因此对 SAR 图像的检测操作将被分配到四个内核中去执行。内核中的线程通过内核序号来找到自己对应的 SAR 图像行索引,四个内核被装载到同一 CUDA 流中在 GPU 上被顺序调度。线程内存空间设计,在 CUDA 架构中不能在核函数中去动态声明较大的内存区域,因此需要在内核执行前由主机分配好线程内存池,然后线程根据自身索引与给定的线程空间大小去找到本线程私有内存空间的起始地址。线程内存空间分析,对于 PCDM 方法,要存储九个像元的散射矩阵信息、协方差矩阵信息与中心像元的极化协方差差异矩阵,综合考虑 PCDM 矩阵计算特征值等其他计算开销,最终我们一个线程所占有的内存空间设置为 8192B。

内核函数的设计,首先计算本线程所对应的二维索引,将该二维索引与其 3x3 邻域对应的 SAR 图像数据从全局内存复制到线程私有的内存空间中,之后计算这九个像元所对应的协方差矩阵并调整为 9x9 大小,该矩阵每一列代表各像元的协方差矩阵元素。将该矩阵的第五列即中心像素的协方差矩阵与其他列依次做差求绝对和得到极化协方差差异矩阵。得到 PCDM 矩阵后,首先对该矩阵应用 SPAN 检测器,即计算矩阵对角线元素之和并与经验阈值做比较,当该 SPAN 值大于经验阈值时,将该像素判别为舰船像素。接下来计算极化协方差差异矩阵的 PSH 极化特征,该特征为 PCDM 矩阵最小特征值与其他两个特征值绝对值之比,因此问题转化为计算极化协方差差异矩阵特征值的问题。PCDM 矩阵为实对称矩阵,计算其特征值采用雅克比迭代的方式,迭代过程的矩阵更新公式如式4-9所示,其中  $\varphi$  通过选择矩阵非对角绝对值最大元素计算得到。具体的算法流程为算法5所示。得到矩阵的特征值后计算 PSH 极化特征的大小并与经

验阈值做比较，如果 PSH 值大于经验阈值，则判断该像素为舰船目标像素。当 GPU 上所有线程核函数执行结束后，主机将检测结果从设备内存拷贝至主机内存，结合 OpenCV 进行图像显示，并保存检测结果。

$$\begin{cases}
 a_{pp}^{i+1} = a_{pp}^i \cos^2 \varphi + a_{qq}^i \sin^2 \varphi + 2a_{pq}^i \cos \varphi \sin \varphi \\
 a_{qq}^{i+1} = a_{pp}^i \cos^2 \varphi + a_{qq}^i \sin^2 \varphi - 2a_{pq}^i \cos \varphi \sin \varphi \\
 a_{pq}^{i+1} = a_{qp}^{i+1} = \frac{1}{2}(a_{qq}^i - a_{pp}^i) \sin 2\varphi + a_{pq}^i \cos 2\varphi
 \end{cases}$$

$$\begin{pmatrix} a_{pn}^{i+1} \\ a_{qn}^{i+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ -\sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_{pn}^i \\ a_{qn}^i \end{pmatrix}, n \neq p, q$$

$$\begin{pmatrix} a_{mp}^{i+1} \\ a_{mq}^{i+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ -\sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_{mp}^i \\ a_{mq}^i \end{pmatrix}, m \neq p, q$$

$$a_{mn}^{i+1} = a_{nm}^{i+1} = a_{mn}^i, m \neq p, q; n \neq p, q$$
(4-9)

$$\tan 2\varphi = \frac{-2a_{pq}}{a_{qq} - a_{pp}}$$
(4-10)

---

**Algorithm 5:** 雅克比迭代计算矩阵特征值

---

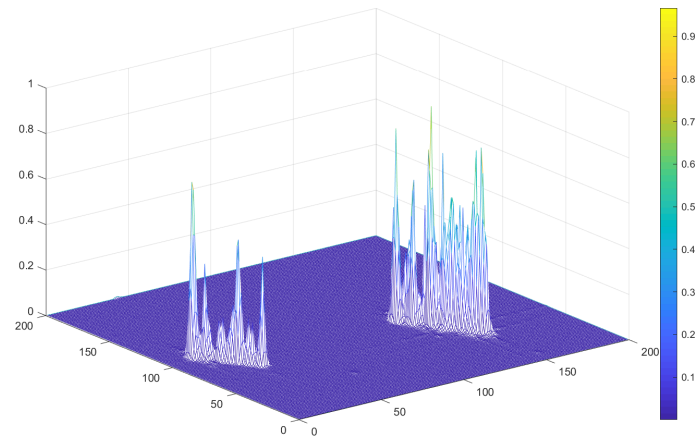
**Input:** 实对称矩阵 **A**

- 1 初始化特征向量为单位阵。
  - 2 **while** **A** 非主对角元素绝对值 < 给定阈值 **do**
  - 3     在 **A** 的非主对角元素中找到最大元素值为  $a_{pq}$
  - 4     用式4-10计算旋转角度  $\varphi$
  - 5     用式4-9来对矩阵 **A** 中的元素进行更新
  - 6 **end**
  - 7 将矩阵特征值按照从大到小的顺序进行排序 **Output:** 矩阵 **A** 的特征值
- 

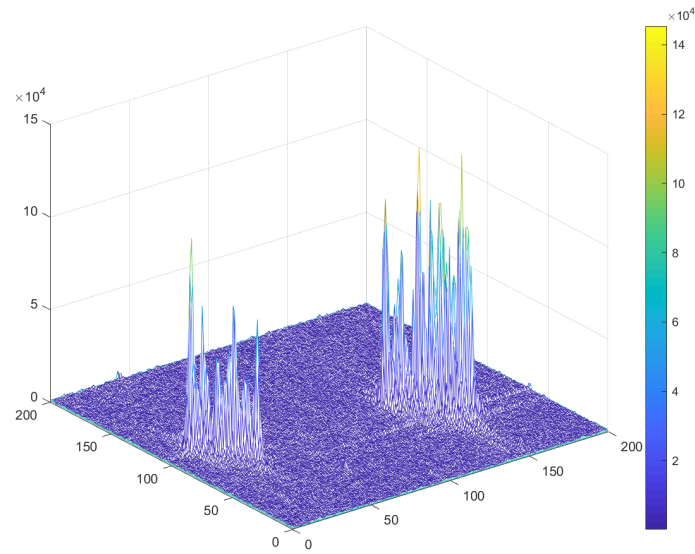
## 4.5 PCDM 算法检测结果

在本次实验中我们使用的是 Radarsat-2 拍摄的远洋极化 SAR 数据，通常舰船目标相对于海平面的后向散射系数更高，具有更高的散射回波功率，因此舰船 SAPN 强度像素值要高于海杂波像素。在 PCDM 方法中充分利用了检测像素与

其邻域像素的空间相干关系，因此基于 PCDM 的 SPAN 图像可以提升船海之间的差异度，有着更强的舰船与海杂波的区分能力，图4.1所示的为 SAR 局部图像切片的 SPAN 图像与 PCDM SPAN 图像的对比。从实验结果上表明，基于 PCDM 的舰船像素与海杂波像素 SPAN 值的对比度相较于基于协方差矩阵的 SPAN 值的对比度更加明显。因此我们选取 PCDM SPAN 最大值与最小值差的千分之五作为分割阈值，从而区分舰船目标与背景杂波。



(a) PCDMSPAN 图



(b) SPAN 图像

图 4.3 PCDNSPAN 图像与 SPAN 图像对比

图像检测结果，本次实验所使用的 GPU 为 TiTAN V，运行显存内存为 12G。基于 MATLAB 的串行算法运行的 CPU 为 Intel(R) i7-9750H，系统内存为 16G。为了验证检测结果的有效性，我们将 PCDM 方法与第二章实现的 PWF 方法进行对比如图4.4所示，从左到右依次为 SPAN 图像，PWF 检测结果，PCDM 检测结

果。从检测结果上来看，PCDM 得到的舰船检测结果与 Pauli 图像更加吻合，舰船边缘相较于 PWF 方法检测结果更加精确。算法的检测性能使用第二章定义的品质因数  $F_1$  来表示即正确检测数量与虚警数量和船只真实数量之和的比值。检测结果如表4.1所示，PCDM 的检测的品质因数高于 PWF 检测方法，可以得出结论 PCDM 算法对于复杂海况的适应能力比 PWF 强，即使面对不同海况依然可以保持高检测精度。

在 PCDM 方法中不需要使用大量的海杂波像素去估计滤波器参数，该算法主要是计算大小为  $3 \times 3$  的极化协方差差异矩阵及其特征值，因此算法在时间与空间性能上都优于极化白化滤波器方法。CPU 串行与 GPU 并行的 PCDM 算法时间如表所示，因为 GPU 设备初始化开销代价所占比重较大，且 CPU 与 GPU 之间需要进行数据拷贝、通信与同步，所以本身在 CPU 上运行时间较短的程序在 GPU 上的加速比会降低。对于大小为  $1000 \times 1000$  的 SAR 图像，经过多次实验测试，并行 PCDM 算法在 Titan V 上的运行的平均时间为 0.69s，串行 MATLAB 方法在 CPU 上的运行时间为 11.37 秒，在时间性能上获得了近 17 倍的提升。

表 4.1 SAR 图像检测结果对比

检测方法	船只数量	总检测数量	正确检测数量	虚警数量	漏报数量	$F_1$
PCDM	118	120	117	3	1	0.967
PWF	118	123	117	6	1	0.943

表 4.2 不同平台算法运行时间对比

检测算法	运行平台	运行时间/s
PCDM(MATLAB)	(Intel(R) i7-9750H CPU)	11.4
GPU 并行 PCDM	GPU(Titan V)	0.67
PWF(C++)	(Intel(R) i9-7920X CPU)	67.4
GPU 多线程 PWF	GPU(Titan V)	2.1
多卡协同 PWF	2 GPU(Titan V)	1.27

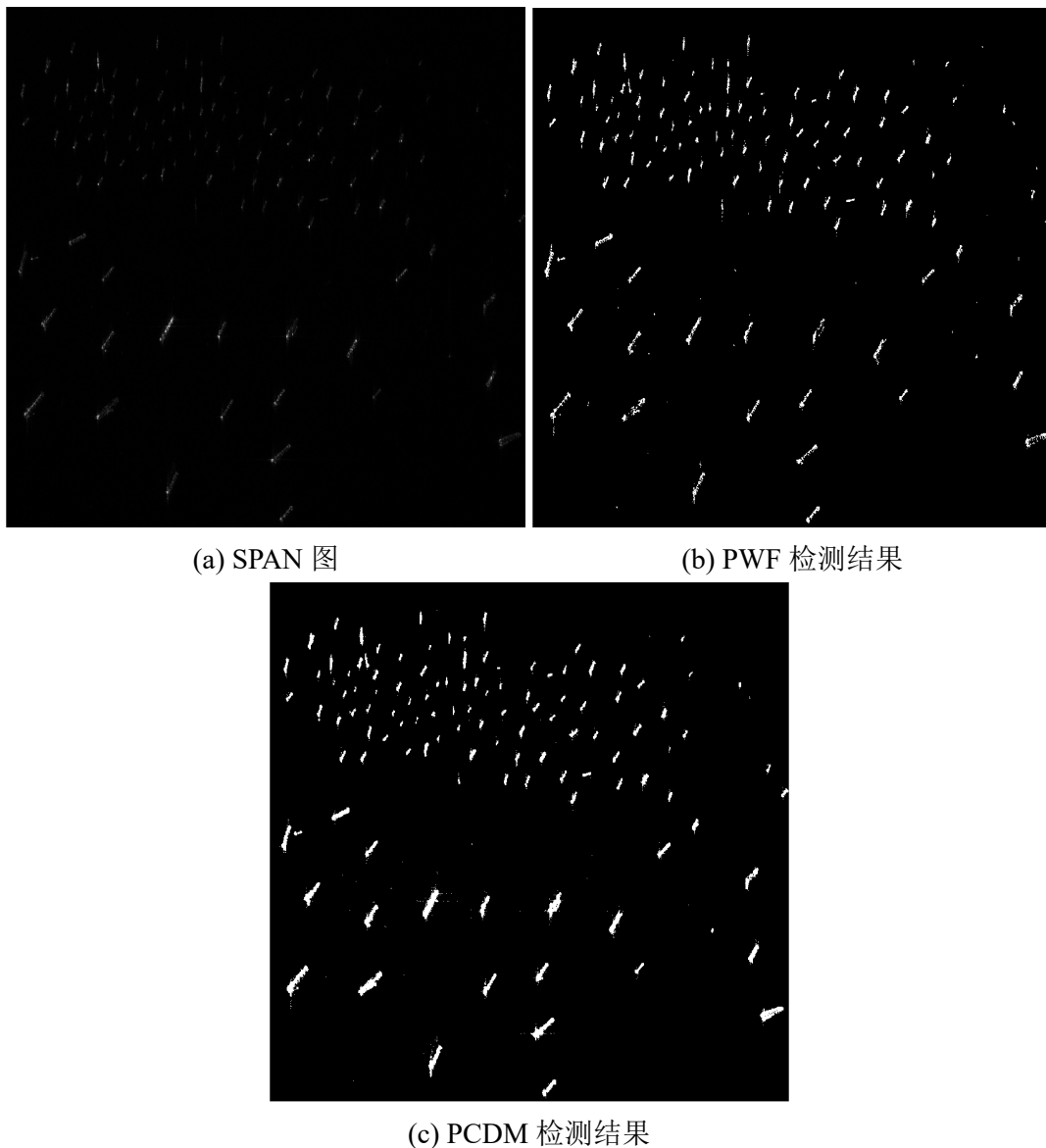


图 4.4 舰船检测结果 (a)SPAN 图像;(b)PWF;(c)PCDM

## 4.6 小结

对于极化 SAR 图像中的舰船目标检测，在本章我们实现了基于极化协方差差异矩阵的舰船检测方法。在该方法中，类比于光学图像检测中的 LBP 特征，我们引出了极化 SAR 图像的极化协方差差异矩阵 (PCDM) 的概念，PCDM 矩阵计算了待检测像素与邻域像素的协方差矩阵差异，充分利用了空间相干信息，提高了舰船目标与背景杂波之间的对比度。接下来我们将 PCDM 矩阵应用于舰船检测，首先使用 PCDM 矩阵的 SPAN 值对船海像素做了一个粗略的划分，然后提取了 PCDM 矩阵的 PSH 极化特征，将该特征用于舰船目标检测，最后联合 SPAN

检测器得到的初步检测结果得到了最终的检测结果。实验结果表明 PCDM 方法可以有效的适应不同的复杂海况，相较于 PWF 算法，在检测精度、时间与空间消耗上都优于 PWF 算法。最后我们实现了基于 GPU 的并行 PCDM 方法，将图像像素对应的 PCDM 矩阵与 PSH 极化特征计算对应到每一个 GPU 线程中去并发执行。相比于串行执行的方式，并行的方法在时间性能上提升了近 20 倍，可以满足实时检测的要求

## 第 5 章 总结与展望

本文针对极化 SAR 图像目标检测算法中存在的计算量大，耗时长等问题提出了基于 CPU+GPU 异构架构的解决方案。本文详细的分析了几种典型的基于分布和基于极化分解的 SAR 图像舰船检测方法，并分离其中可并行执行的部分，实现了基于 GPU 的并行 SAR 图像舰船检测方法，本文完成的工作和创新点主要包括：

1) 实现了基于 GPU 的极化白化滤波器极化 SAR 舰船目标检测算法，采用 GPU 多线程并行计算滑动窗内海杂波对应的极化白化滤波器参数，并计算分割阈值得到检测结果。此外还合理的将数据与任务分配到了多块 GPU 上同时并行计算，使得算法在时间效率进一步提升。2) 实现了基于 GPU 的 LMM 舰船检测方法，该算法将估计海杂波分布参数的部分附加到 GPU 上执行，并对参数迭代的过程使用 GPU 共享内存进行优化，实验结果表明基于 GPU 的 LMM 算法在时间性能上获得了数十倍的提升。3) 实现了基于 GPU 的 PCDM 舰船检测方法，该算法将 PCDM 矩阵与提取 PCDM 矩阵极化特征的计算部分放在 GPU 上并行计算。并行算法在检测时间效率上获得了数十倍的提升，并且对复杂海况具有很好适应性。

本文在基于 GPU 的极化 SAR 图像检测上取得一定的成果，但是受限于时间、数据等原因，未来的工作还可以在以下几个方面展开：

1) 在 PCDM 检测方法中，本文对于极化协方差差异矩阵的 SPAN 值与 PSH 特征采用经验阈值进行分割，可以尝试对这两个极化特征进行统计分析以得到更加精准的自适应阈值，从而提升算法的检测精度。2) 受限于 CUDA 提供的 MATH API，较难实现 Gamma 分布，K 分布等其它海杂波统计模型，之后可以探究可在 GPU 上运算的更多统计分布模型，从而对海杂波分布的拟合效果更加精准。3) 算法基于 linux 系统下的 CUDA 运行环境进行设计，并没有针对 SAR 系统实际的硬件环境进行算法设计，未来可以针对含有嵌入式的 GPU 的 SAR 图像处理系统在算法时间，内存，功耗上做进一步的优化。



## 插图索引

图 1.1	CPU 和 GPU 浮点运算比较 .....	2
图 1.2	论文内容安排 .....	5
图 2.1	CUDA 执行流程 .....	10
图 2.2	PWF 图像检测结果 .....	12
图 3.1	CFAR 滑动窗示意图 .....	16
图 3.2	CUDA 内存模型 .....	18
图 3.3	CUDA 线程与检测像素映射关系 .....	19
图 3.4	四张 SIR-C/XSAR 强度图像 .....	19
图 3.5	LMM 检测结果 .....	20
图 4.1	PCDM 矩阵计算示意图 .....	24
图 4.2	PCDM 检测流程示意图 .....	25
图 4.3	PCDNSPAN 图像与 SPAN 图像对比 .....	28
图 4.4	舰船检测结果 (a)SPAN 图像;(b)PWF;(c)PCDM.....	30

## 表格索引

表 2.1	不同强度图像 s/m 比值 .....	8
表 2.2	Adaptive PWF 检测结果 .....	12
表 2.3	PWF 不同平台运行时间 .....	12
表 3.1	LMM 算法时间 .....	20
表 4.1	PCDM 检测结果 .....	29
表 4.2	PCDM 算法运行时间对比 .....	29

## 公式索引

公式 2-1 .....	6
公式 2-2 .....	6
公式 2-3 .....	7
公式 2-4 .....	7
公式 2-5 .....	7
公式 2-6 .....	7
公式 2-7 .....	8
公式 2-8 .....	8
公式 2-9 .....	9
公式 2-10 .....	9
公式 3-1 .....	14
公式 3-2 .....	14
公式 3-3 .....	15
公式 3-4 .....	15
公式 3-5 .....	16
公式 3-6 .....	16
公式 3-7 .....	17
公式 4-1 .....	22
公式 4-2 .....	22
公式 4-3 .....	23
公式 4-4 .....	23
公式 4-5 .....	23
公式 4-6 .....	23
公式 4-7 .....	24
公式 4-8 .....	24
公式 4-9 .....	27
公式 4-10 .....	27

## 致 谢

衷心感谢我的导师杨健教授在本次毕业设计中对我的精心指导和帮助。杨老师是我的班主任，这四年的大学生活中他在学习与科研工作等方面对我提出了很多针对性的建议和帮助。进入实验室的这一年时间，在与老师与学长的交流中，我的学术科研能力获得了很大的提升。

感谢金侃、王洪淼、林惠平、朱庆涛、陈航、张涛等师兄对我毕业设计的指导和帮助，当我面临算法设计上的困难时感谢你们的建议让我获得了获得了更多的知识与更宽广的设计思路。

感谢我的父母，感谢他们一直的辛勤付出与支持。因为疫情，此次毕设大部分工作都在家中完成，感谢他们这段时间在生活上的对我的关心与照料。

## 声 明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，独立进行研究工作所取得的成果。尽我所知，除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人享有著作权的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。

签 名：\_\_\_\_\_ 日 期：\_\_\_\_\_

## 附录 A 外文资料的调研阅读报告或书面翻译

### 基于变分贝叶斯推断的极化 SAR 舰船检测

摘要：

A.1 介绍

A.2 极化 SAR 图像概率统计模型

A.3 变分贝叶斯推断

A.4 实验与结果

A.5 结论

综合论文训练记录表

学生姓名		学号		班级	
论文题目					
主要内容以及进度安排	<div>指导教师签字：_____</div> <div>考核组组长签字：_____</div> <div>年 月 日</div>				
中期考核意见	<div>考核组组长签字：_____</div> <div>年 月 日</div>				

指导教师评语	<div>指导教师签字：_____</div> <div>年      月      日</div>
评阅教师评语	<div>评阅教师签字：_____</div> <div>年      月      日</div>
答辩小组评语	<div>答辩小组组长签字：_____</div> <div>年      月      日</div>

总成绩：\_\_\_\_\_

教学负责人签字：\_\_\_\_\_

年      月      日