清 华 大 学

综 合 论 文 训 练

题目：基于 CUDA 的舰船目标检测算法设计

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) 系统提供了一种全天候的遥感手段，可以在雷达波束照射下生成高分辨率的地物图像，目前已被广泛应用于海上目标检测与分类。为满足 SAR 图像舰船目标检测高时效性的要求，本文共实现了四种基于 CPU+GPU 异构架构的高效目标检测方法，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 协同并行极化白化滤波器算法，该方法估计局部海杂波的协方差矩阵，并用其融合各个极化通道散射信息，得到一副相干斑抑制图像，对重构图像应用 CFAR 检测器得到最终检测结果。实验结果表明，该方法有效，并在检测时间上获得了显著的提升，明显优于传统的 CPU 平台。

2) 对于 SAR 图像，采用了对数混合高斯模型来描述幅值 SAR 图像中的非负海杂波分布，并采用最大期望 (EM) 方法来有效估计海杂波分布参数，根据事先给定的虚警率采用牛顿迭代法得到 CAFR 检测阈值。该方法在 NVIDIA TITAN V GPU 上的实验结果表明，相比于传统 CPU 平台，该方法在检测效率上获得了数十倍的提升

3) 实现了基于 GPU 的反射对称性极化 SAR 图像舰船目标检测方法，该方法利用了海洋和人造金属物体反射对称性的差异，对散射矩阵中的 HH 通道与 HV 通道的相关性进行度量，构造了反射对称检测量。该检测量符合 K 分布，采用矩估计的方法对 K 分布参数进行估计，最后应用 CFAR 检测器得到检测结果。

4) 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。该方法计算了每个像元与其周围 3x3 邻域的极化协方差矩阵的差值，由此得到极化协方差差异矩阵以改善局部区域的船-海对比度。为了充分利用极化协方差差异矩阵中的极化与强度特征，计算极化协方差差异矩阵的香浓熵，并应用阈值进行分割，得到最终检测结果。实验结果表明：相较于 PWF 方法，该方法检测准确率获得了有效的提升。

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, four 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 using reflection-symmetric polarization features based on GPU is implemented. This method uses the difference in reflection symmetry between ocean and man-made metal objects and measure the correlation between the HH channel and HV channel in the scattering matrix to construct the reflection symmetry quatity. The detection quantity conforms to the K distribution. The method of moment estimation is used to estimate the K distribution parameters. Finally, the CFAR detector is used to obtain the detection result.

4)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 result. 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　带 English 的标题 1
1.1　封面相关 1
1.2　字体 1
1.3　表格样本 2
1.3.1　基本表格 2
1.3.2　复杂表格 3
1.3.3　其它 7
1.4　定理环境 8
1.5　参考文献 11
1.6　公式 12
第 2 章　极化白化滤波器舰船目标检测 13
2.1　引言 13
2.2　海杂波统计特性 13
2.3　极化白化滤波器 14
2.4　自适应 PWF 舰船检测算法 15
2.5　基于 GPU 的 PWF 算法实现 17
2.5.1　GPU 算法设计与优化 17
2.5.2　多 GPU 协同 18
2.6　实验结果与加速比测试 18
2.7　小结 20
第 3 章　基于混合对数正太模型 SAR 图像目标检测 21
3.1　引言 21
3.2　对数混合正太模型 21
3.3　海杂波分布参数估计 22
3.4　应用 LMM 模型进行 CFAR 舰船检测 23
3.5　GPU 算法优化 24
3.6　LMM 实验结果 26

3.7 小结 28
第 4 章 基于 PCDM 的极化 SAR 图像舰船目标检测 29
4.1 引言 29
4.2 PCDM 理论背景 29
4.2.1 极化 SAR 散射表征与 SPAN 理论 29
4.2.2 极化协方差差异矩阵 30
4.3 基于 PCDM 的舰船目标检测算法 31
4.4 基于 GPU 的 PCDM 算法设计 33
4.5 应用 LMM 模型进行 CFAR 舰船检测 35
4.6 GPU 算法优化 36
4.7 LMM 实验结果 38
4.8 小结 39
插图索引 41
表格索引 42
公式索引 43
致 谢 45
声 明 46
附录 A 外文资料原文 47
A.1 Single-Objective Programming 47
A.1.1 Linear Programming 48
A.1.2 Nonlinear Programming 49
A.1.3 Integer Programming 50
附录 B 外文资料的调研阅读报告或书面翻译 51
B.1 单目标规划 51
B.1.1 线性规划 51
B.1.2 非线性规划 52
B.1.3 整数规划 52
附录 C 其它附录 53
在学期间参加课题的研究成果 54

主要符号对照表

HPC	高性能计算 (High Performance Computing)
cluster	集群
Itanium	安腾
SMP	对称多处理
API	应用程序编程接口
PI	聚酰亚胺
MPI	聚酰亚胺模型化合物，N-苯基邻苯酰亚胺
PBI	聚苯并咪唑
MPBI	聚苯并咪唑模型化合物，N-苯基苯并咪唑
PY	聚吡咙
PMDA-BDA	均苯四酸二酐与联苯四胺合成的聚吡咙薄膜
ΔG	活化自由能 (Activation Free Energy)
χ	传输系数 (Transmission Coefficient)
E	能量
m	质量
c	光速
P	概率
T	时间
v	速度
劝学	君子曰：学不可以已。青，取之于蓝，而青于蓝；冰，水为之，而寒于水。木直中绳。輮以为轮，其曲中规。虽有槁暴，不复挺者，輮使之然也。故木受绳则直，金就砺则利，君子博学而日参省乎己，则知明而行无过矣。吾尝终日而思矣，不如须臾之所学也；吾尝跂而望矣，不如登高之博见也。登高而招，臂非加长也，而见者远；顺风而呼，声非加疾也，而闻者彰。假舆马者，非利足也，而致千里；假舟楫者，非能水也，而绝江河，君子生非异也，善假于物也。积土成山，风雨兴焉；积水成渊，蛟龙生焉；积善成德，而神明自得，圣心备焉。故不积跬步，无以至千里；不积小流，无以成江海。骐

骥一跃，不能十步；驽马十驾，功在不舍。锲而舍之，朽木不折；锲而不舍，金石可镂。蚓无爪牙之利，筋骨之强，上食埃土，下饮黄泉，用心一也。蟹六跪而二螯，非蛇鳝之穴无可寄托者，用心躁也。——荀况

第 1 章　带 English 的标题

这是 ThuThesis[?] 的示例文档，基本上覆盖了模板中所有格式的设置。建议大家在使用模板之前，除了阅读《ThuThesis 用户手册》，这个示例文档也最好能看一看。

小老鼠偷吃热凉粉；短长虫环绕矮高粱①。

1.1　封面相关

封面的例子请参看 `cover.tex`。主要符号表参看 `denotation.tex`，附录和个人简历分别参看 `appendix01.tex` 和 `resume.tex`。里面的命令都很直观，一看即会②。

1.2　字体

苏轼（1037-1101），北宋文学家、书画家。字子瞻，号东坡居士，眉州眉山（今属四川）人。苏洵子。嘉佑进士。神宗时曾任祠部员外郎，因反对王安石新法而求外职，任杭州通判，知密州、徐州、湖州。后以作诗“谤讪朝廷”罪贬黄州。哲宗时任翰林学士，曾出知杭州、颍州等，官至礼部尚书。后又贬谪惠州、儋州。北还后第二年病死常州。南宋时追谥文忠。与父洵弟辙，合称“三苏”。在政治上属于旧党，但也有改革弊政的要求。其文汪洋恣肆，明白畅达，为“唐宋八大家”之一。其诗清新豪健，善用夸张比喻，在艺术表现方面独具风格。少数诗篇也能反映民间疾苦，指责统治者的奢侈骄纵。词开豪放一派，对后代很有影响。《念奴娇・赤壁怀古》、《水调歌头・丙辰中秋》传诵甚广。

坡仙擅长行书、楷书，取法李邕、徐浩、颜真卿、杨凝式，而能自创新意。用笔丰腴跌宕，有天真烂漫之趣。与蔡襄、黄庭坚、米芾并称“宋四家”。能画竹，学文同，也喜作枯木怪石。论画主张“神似”，认为“论画以形似，见与儿

① 韩愈（768-824），字退之，河南河阳（今河南孟县）人，自称郡望昌黎，世称韩昌黎。幼孤贫刻苦好学，德宗贞元八年进士。曾任监察御史，因上疏请免关中赋役，贬为阳山县令。后随宰相裴度平定淮西迁刑部侍郎，又因上表谏迎佛骨，贬潮州刺史。做过吏部侍郎，死谥文公，故世称韩吏部、韩文公。是唐代古文运动领袖，与柳宗元合称韩柳。诗力求险怪新奇，雄浑重气势。

② 你说还是看不懂？怎么会呢？

童邻”；高度评价“诗中有画，画中有诗”的艺术造诣。诗文有《东坡七集》等。存世书迹有《答谢民师论文帖》、《祭黄几道文》、《前赤壁赋》、《黄州寒食诗帖》等。画迹有《枯木怪石图》、《竹石图》等。

易与天地准，故能弥纶天地之道。仰以观於天文，俯以察於地理，是故知幽明之故。原始反终，故知死生之说。精气为物，游魂为变，是故知鬼神之情状。与天地相似，故不违。知周乎万物，而道济天下，故不过。旁行而不流，乐天知命，故不忧。安土敦乎仁，故能爱。范围天地之化而不过，曲成万物而不遗，通乎昼夜之道而知，故神无方而易无体。

有天地，然后万物生焉。盈天地之间者，唯万物，故受之以屯；屯者盈也，屯者物之始生也。物生必蒙，故受之以蒙；蒙者蒙也，物之穉也。物穉不可不养也，故受之以需；需者饮食之道也。饮食必有讼，故受之以讼。讼必有众起，故受之以师；师者众也。众必有所比，故受之以比；比者比也。比必有所畜也，故受之以小畜。物畜然后有礼，故受之以履。

履而泰，然后安，故受之以泰；泰者通也。物不可以终通，故受之以否。物不可以终否，故受之以同人。与人同者，物必归焉，故受之以大有。有大者不可以盈，故受之以谦。有大而能谦，必豫，故受之以豫。豫必有随，故受之以随。以喜随人者，必有事，故受之以蛊；蛊者事也。

有事而后可大，故受之以临；临者大也。物大然后可观，故受之以观。可观而后有所合，故受之以噬嗑；嗑者合也。物不可以苟合而已，故受之以贲；贲者饰也。致饰然后亨，则尽矣，故受之以剥；剥者剥也。物不可以终尽，剥穷上反下，故受之以复。复则不妄矣，故受之以无妄。

有无妄然后可畜，故受之以大畜。物畜然后可养，故受之以颐；颐者养也。不养则不可动，故受之以大过。物不可以终过，故受之以坎；坎者陷也。陷必有所丽，故受之以离；离者丽也。

1.3 表格样本

1.3.1 基本表格

模板中关于表格的宏包有三个：booktabs、array 和 longtabular，命令有一个 `\hlinewd`。三线表可以用 booktabs 提供的 `\toprule`、`\midrule` 和 `\bottomrule`。它们与 longtable 能很好的配合使用。如果表格比较简单的话可以直接用命令 `\hlinewd{`⟨*width*⟩`}` 控制。

表 1.1　模板文件。如果表格的标题很长，那么在表格索引中就会很不美观，所以要像 chapter 那样在前面用中括号写一个简短的标题。这个标题会出现在索引中。

文件名	描述
thuthesis.ins	LaTeX 安装文件，DocStrip①
thuthesis.dtx	所有的一切都在这里面②。
thuthesis.cls	模板类文件。
thuthesis-numeric.bst	参考文献 BibTeX 样式文件。
thuthesis-author-year.bst	参考文献 BibTeX 样式文件。
thuthesis.sty	常用的包和命令写在这里，减轻主文件的负担。

① 表格中的脚注
② 再来一个

首先来看一个最简单的表格。表 2.1 列举了本模板主要文件及其功能。请大家注意三线表中各条线对应的命令。这个例子还展示了如何在表格中正确使用脚注。由于 LaTeX 本身不支持在表格中使用 `\footnote`，所以我们不得不将表格放在小页中，而且最好将表格的宽度设置为小页的宽度，这样脚注看起来才更美观。

1.3.2　复杂表格

我们经常会在表格下方标注数据来源，或者对表格里面的条目进行解释。前面的脚注是一种不错的方法，如果不喜欢脚注，可以在表格后面写注释，比如表 1.2。

表 1.2　复杂表格示例 1。这个引用[?]不会导致编号混乱。

y / x	First Half		Second Half	
	1st Qtr	2nd Qtr	3rd Qtr	4th Qtr
East*	20.4	27.4	90	20.4
West**	30.6	38.6	34.6	31.6

注：数据来源《ThuThesis 使用手册》。
*：东部
**：西部

此外，表 1.2 同时还演示了另外两个功能：1）通过 tabularx 的 `|X|` 扩展实现表格自动放大；2）通过命令 `\diagbox` 在表头部分插入反斜线。

为了使我们的例子更接近实际情况，我会在必要的时候插入一些“无关”文

字，以免太多图表同时出现，导致排版效果不太理想。第一个出场的当然是我的最爱：风流潇洒、骏马绝尘、健笔凌云的**李太白**了。

李白，字太白，陇西成纪人。凉武昭王暠九世孙。或曰山东人，或曰蜀人。白少有逸才，志气宏放，飘然有超世之心。初隐岷山，益州长史苏颋见而异之，曰："是子天才英特，可比相如。"天宝初，至长安，往见贺知章。知章见其文，叹曰："子谪仙人也。"言于明皇，召见金銮殿，奏颂一篇。帝赐食，亲为调羹，有诏供奉翰林。白犹与酒徒饮于市，帝坐沉香亭子，意有所感，欲得白为乐章，召入，而白已醉。左右以水颒面，稍解，援笔成文，婉丽精切。帝爱其才，数宴见。白常侍帝，醉，使高力士脱靴。力士素贵，耻之，摘其诗以激杨贵妃。帝欲官白，妃辄沮止。白自知不为亲近所容，恳求还山。帝赐金放还。乃浪迹江湖，终日沉饮。永王璘都督江陵，辟为僚佐。璘谋乱，兵败，白坐长流夜郎，会赦得还。族人阳冰为当涂令，白往依之。代宗立，以左拾遗召，而白已卒。文宗时，诏以白歌诗、裴旻剑舞、张旭草书为三绝云。集三十卷。今编诗二十五卷。——《全唐诗》诗人小传

浮动体的并排放置一般有两种情况：1）二者没有关系，为两个独立的浮动体；2）二者隶属于同一个浮动体。对表格来说并排表格既可以像图 1.3、图 1.4 使用小页环境，也可以如图 1.5 使用子表格来做。图的例子参见第 **??** 节。

表 1.3　第一个并排子表格

111	222
222	333

表 1.4　第二个并排子表格

111	222
222	333

然后就是忧国忧民，诗家楷模杜工部了。杜甫，字子美，其先襄阳人，曾祖依艺为巩令，因居巩。甫天宝初应进士，不第。后献《三大礼赋》，明皇奇之，召试文章，授京兆府兵曹参军。安禄山陷京师，肃宗即位灵武，甫自贼中遁赴行在，拜左拾遗。以论救房琯，出为华州司功参军。关辅饥乱，寓居同州同谷县，身自负薪采梠，餔糒不给。久之，召补京兆府功曹，道阻不赴。严武镇成都，奏为参谋、检校工部员外郎，赐绯。武与甫世旧，待遇甚厚。乃于成都浣花里种竹植树，枕江结庐，纵酒啸歌其中。武卒，甫无所依，乃之东蜀就高適。既至而適卒。是岁，蜀帅相攻杀，蜀大扰。甫携家避乱荆楚，扁舟下峡，未维舟而江陵亦乱。乃溯沿湘流，游衡山，寓居耒阳。卒年五十九。元和中，归葬偃师首阳山，元稹志其墓。天宝间，甫与李白齐名，时称李杜。然元稹之言曰："李白壮浪纵

恣，摆去拘束，诚亦差肩子美矣。至若铺陈终始，排比声韵，大或千言，次犹数百，词气豪迈，而风调清深，属对律切，而脱弃凡近，则李尚不能历其藩翰，况堂奥乎。”白居易亦云：“杜诗贯穿古今，尽工尽善，殆过于李。”元、白之论如此。盖其出处劳佚，喜乐悲愤，好贤恶恶，一见之于诗。而又以忠君忧国、伤时念乱为本旨。读其诗可以知其世，故当时谓之“诗史”。旧集诗文共六十卷，今编诗十九卷。

表 1.5　并排子表格

(a) 第一个子表格

111	222
222	333

(b) 第二个子表格

111	222
222	333

不可否认 LaTeX 的表格功能没有想象中的那么强大，不过只要足够认真，足够细致，同样可以排出来非常复杂非常漂亮的表格。请参看表 1.6。

表 1.6　复杂表格示例 2

Network Topology		# of nodes	# of clients			Server
GT-ITM	Waxman Transit-Stub	600	2%	10%	50%	Max. Connectivity
Inet-2.1		6000				
Xue	Rui	Ni	ThuThesis			
	ABCDEF					

最后就是清新飘逸、文约意赅、空谷绝响的王大侠了。王维，字摩诘，河东人。工书画，与弟缙俱有俊才。开元九年，进士擢第，调太乐丞。坐累为济州司仓参军，历右拾遗、监察御史、左补阙、库部郎中，拜吏部郎中。天宝末，为给事中。安禄山陷两都，维为贼所得，服药阳喑，拘于菩提寺。禄山宴凝碧池，维潜赋诗悲悼，闻于行在。贼平，陷贼官三等定罪，特原之，责授太子中允，迁中庶子、中书舍人。复拜给事中，转尚书右丞。维以诗名盛于开元、天宝间，宁薛诸王驸马豪贵之门，无不拂席迎之。得宋之问辋川别墅，山水绝胜，与道友裴迪，浮舟往来，弹琴赋诗，啸咏终日。笃于奉佛，晚年长斋禅诵。一日，忽索笔作书数纸，别弟缙及平生亲故，舍笔而卒。赠秘书监。宝应中，代宗问缙：“朕常于诸王坐闻维乐章，今存几何？”缙集诗六卷，文四卷，表上之。敕答云，卿伯氏位列先朝，名高希代。抗行周雅，长揖楚辞。诗家者流，时论归美。克成编录，叹息良深。殷璠谓维诗词秀调雅，意新理惬。在泉成珠，著壁成绘。苏轼亦

云："维诗中有画，画中有诗也。"今编诗四卷。

表 1.7　实验数据

测试程序	正常运行时间 (s)	同步时间 (s)	检查点时间 (s)	卷回恢复时间 (s)	进程迁移时间 (s)	检查点文件（KB）
CG.A.2	23.05	0.002	0.116	0.035	0.589	32491
CG.A.4	15.06	0.003	0.067	0.021	0.351	18211
CG.A.8	13.38	0.004	0.072	0.023	0.210	9890
CG.B.2	867.45	0.002	0.864	0.232	3.256	228562
CG.B.4	501.61	0.003	0.438	0.136	2.075	123862
CG.B.8	384.65	0.004	0.457	0.108	1.235	63777
MG.A.2	112.27	0.002	0.846	0.237	3.930	236473
MG.A.4	59.84	0.003	0.442	0.128	2.070	123875
MG.A.8	31.38	0.003	0.476	0.114	1.041	60627
MG.B.2	526.28	0.002	0.821	0.238	4.176	236635
MG.B.4	280.11	0.003	0.432	0.130	1.706	123793
MG.B.8	148.29	0.003	0.442	0.116	0.893	60600
LU.A.2	2116.54	0.002	0.110	0.030	0.532	28754
LU.A.4	1102.50	0.002	0.069	0.017	0.255	14915
LU.A.8	574.47	0.003	0.067	0.016	0.192	8655
LU.B.2	9712.87	0.002	0.357	0.104	1.734	101975
LU.B.4	4757.80	0.003	0.190	0.056	0.808	53522
LU.B.8	2444.05	0.004	0.222	0.057	0.548	30134
EP.A.2	123.81	0.002	0.010	0.003	0.074	1834
EP.A.4	61.92	0.003	0.011	0.004	0.073	1743
EP.A.8	31.06	0.004	0.017	0.005	0.073	1661
EP.B.2	495.49	0.001	0.009	0.003	0.196	2011
EP.B.4	247.69	0.002	0.012	0.004	0.122	1663
EP.B.8	126.74	0.003	0.017	0.005	0.083	1656

要想用好论文模板还是得提前学习一些 TEX/LATEX 的相关知识，具备一些基本能力，掌握一些常见技巧，否则一旦遇到问题还真是比较麻烦。我们见过很多这样的同学，一直以来都是使用 Word 等字处理工具，以为 LATEX 模板的用法也应该类似，所以就沿袭同样的思路来对待这种所见非所得的排版工具，结果被折腾的焦头烂额，疲惫不堪。

如果您要排版的表格长度超过一页，那么推荐使用 longtable 或者 supertabular 宏包，模板对 longtable 进行了相应的设置，所以用起来可能简单一些。表 1.7

就是 longtable 的示例。

1.3.3 其它

如果不想让某个表格或者图片出现在索引里面，请使用命令 `\caption*`。这个命令不会给表格编号，也就是出来的只有标题文字而没有“表 XX”，“图 XX”，否则索引里面序号不连续就显得不伦不类，这也是 LaTeX 里星号命令默认的规则。

有这种需求的多是本科同学的英文资料翻译部分，如果觉得附录中英文原文中的表格和图片显示成“表”和“图”不协调的话，一个很好的办法就是用 `\caption*`，参数随便自己写，比如不守规矩的表 1.111 和图 1.111 能满足这种特殊需要（可以参看附录部分）。

表 1.111　这是一个手动编号，不出现在索引中的表格。

ThuThesis

Figure 1.111　这是一个手动编号，不出现在索引中的图。

薛瑞尼

如果的确想让它编号，但又不想让它出现在索引中的话，目前模板上不支持。

最后，虽然大家不一定会独立使用小页，但是关于小页中的脚注还是有必要提一下。请看下面的例子。

柳宗元，字子厚（773-819），河东（今永济县）人①，是唐代杰出的文学家，哲学家，同时也是一位政治改革家。与韩愈共同倡导唐代古文运动，并称韩柳②。

① 山西永济水饺。
② 唐宋八大家之首二位。

唐朝安史之乱后，宦官专权，藩镇割据，土地兼并日渐严重，社会生产破坏严重，民不聊生。柳宗元对这种社会现实极为不满，他积极参加了王叔文领导的“永济革新”，并成为这一运动的中坚人物。他们革除弊政，打击权奸，触犯了宦官和官僚贵族利益，在他们的联合反扑下，改革失败了，柳宗元被贬为永州司马。

1.4 定理环境

给大家演示一下各种和证明有关的环境：

假设 1.1： 待月西厢下，迎风户半开；隔墙花影动，疑是玉人来。

$$c = a^2 - b^2 \tag{1-1}$$

$$= (a+b)(a-b) \tag{1-2}$$

千辛万苦，历尽艰难，得有今日。然相从数千里，未曾哀戚。今将渡江，方图百年欢笑，如何反起悲伤？（引自《杜十娘怒沉百宝箱》）

定义 1.1： 子曰：「道千乘之国，敬事而信，节用而爱人，使民以时。」

千古第一定义！问世间、情为何物，只教生死相许？天南地北双飞客，老翅几回寒暑。欢乐趣，离别苦，就中更有痴儿女。君应有语，渺万里层云，千山暮雪，只影向谁去？

横汾路，寂寞当年箫鼓，荒烟依旧平楚。招魂楚些何嗟及，山鬼暗谛风雨。天也妒，未信与，莺儿燕子俱黄土。千秋万古，为留待骚人，狂歌痛饮，来访雁丘处。

命题 1.1： 曾子曰：「吾日三省吾身——为人谋而不忠乎？与朋友交而不信乎？传不习乎？」

多么凄美的命题啊！其日牛马嘶，新妇入青庐，奄奄黄昏后，寂寂人定初，我命绝今日，魂去尸长留，揽裙脱丝履，举身赴清池，府吏闻此事，心知长别离，徘徊庭树下，自挂东南枝。

注释 1.1： 天不言自高，水不言自流。

$$\begin{aligned}\varphi(x,z) &= z - \gamma_{10}x - \gamma_{mn}x^m z^n \\ &= z - Mr^{-1}x - Mr^{-(m+n)}x^m z^n\end{aligned}$$

$$\zeta^0 = (\xi^0)^2, \tag{1-3}$$

$$\zeta^1 = \xi^0\xi^1, \tag{1-4}$$

$$\zeta^2 = (\xi^1)^2, \tag{1-5}$$

天尊地卑，乾坤定矣。卑高以陈，贵贱位矣。动静有常，刚柔断矣。方以类聚，物以群分，吉凶生矣。在天成象，在地成形，变化见矣。鼓之以雷霆，润之以风雨，日月运行，一寒一暑，乾道成男，坤道成女。乾知大始，坤作成物。乾以易知，坤以简能。易则易知，简则易从。易知则有亲，易从则有功。有亲则可久，有功则可大。可久则贤人之德，可大则贤人之业。易简，而天下矣之理矣；天下之理得，而成位乎其中矣。

公理 1.1： 两点间直线段距离最短。

$$x \equiv y + 1 \pmod{m^2} \tag{1-6}$$

$$x \equiv y + 1 \mod m^2 \tag{1-7}$$

$$x \equiv y + 1 \quad (m^2) \tag{1-8}$$

《彖曰》：大哉乾元，万物资始，乃统天。云行雨施，品物流形。大明始终，六位时成，时乘六龙以御天。乾道变化，各正性命，保合大和，乃利贞。首出庶物，万国咸宁。

《象曰》：天行健，君子以自强不息。潜龙勿用，阳在下也。见龙再田，德施普也。终日乾乾，反复道也。或跃在渊，进无咎也。飞龙在天，大人造也。亢龙有悔，盈不可久也。用九，天德不可为首也。

引理 1.1：《猫和老鼠》是我最爱看的动画片。

$$\int_a^b \left\{ \int_a^b [f(x)^2 g(y)^2 + f(y)^2 g(x)^2] - 2f(x)g(x)f(y)g(y)\,\mathrm{d}x \right\} \mathrm{d}y$$

$$= \int_a^b \left\{ g(y)^2 \int_a^b f^2 + f(y)^2 \int_a^b g^2 - 2f(y)g(y) \int_a^b fg \right\} \mathrm{d}y$$

行行重行行，与君生别离。相去万余里，各在天一涯。道路阻且长，会面安可知。胡马依北风，越鸟巢南枝。相去日已远，衣带日已缓。浮云蔽白日，游子不顾返。思君令人老，岁月忽已晚。弃捐勿复道，努力加餐饭。

定理 1.1： 犯我强汉者，虽远必诛 ——陈汤（汉）

$$y = 1 \tag{1-9a}$$

$$y = 0 \tag{1-9b}$$

道可道，非常道。名可名，非常名。无名天地之始；有名万物之母。故常无，欲以观其妙；常有，欲以观其徼。此两者，同出而异名，同谓之玄。玄之又玄，众妙之门。上善若水。水善利万物而不争，处众人之所恶，故几于道。曲则全，枉则直，洼则盈，敝则新，少则多，多则惑。人法地，地法天，天法道，道法自然。知人者智，自知者明。胜人者有力，自胜者强。知足者富。强行者有志。不失其所者久。死而不亡者寿。

证明 燕赵古称多感慨悲歌之士。董生举进士，连不得志于有司，怀抱利器，郁郁适兹土，吾知其必有合也。董生勉乎哉？

夫以子之不遇时，苟慕义强仁者，皆爱惜焉，矧燕、赵之士出乎其性者哉！然吾尝闻风俗与化移易，吾恶知其今不异于古所云邪？聊以吾子之行卜之也。董生勉乎哉？

吾因子有所感矣。为我吊望诸君之墓，而观于其市，复有昔时屠狗者乎？为我谢曰："明天子在上，可以出而仕矣！" ——韩愈《送董邵南序》 □

推论 1.1： 四川话配音的《猫和老鼠》是世界上最好看最好听最有趣的动画片。

$$V_i = v_i - q_i v_j, \qquad X_i = x_i - q_i x_j, \qquad U_i = u_i, \qquad \text{for } i \neq j; \tag{1-10}$$

$$V_j = v_j, \qquad X_j = x_j, \qquad U_j u_j + \sum_{i \neq j} q_i u_i. \tag{1-11}$$

迢迢牵牛星，皎皎河汉女。纤纤擢素手，札札弄机杼。终日不成章，泣涕零如雨。河汉清且浅，相去复几许。盈盈一水间，脉脉不得语。

例 1.1： 大家来看这个例子。

$$\begin{cases} \boldsymbol{\nabla} f(\boldsymbol{x}^*) - \sum_{j=1}^{p} \lambda_j \boldsymbol{\nabla} g_j(\boldsymbol{x}^*) = 0 \\ \lambda_j g_j(\boldsymbol{x}^*) = 0, \quad j = 1, 2, \cdots, p \\ \lambda_j \geqslant 0, \quad j = 1, 2, \cdots, p. \end{cases} \tag{1-12}$$

练习 1.1： 请列出 Andrew S. Tanenbaum 和 W. Richard Stevens 的所有著作。

猜想 1.1： *Poincare Conjecture* If in a closed three-dimensional space, any closed curves can shrink to a point continuously, this space can be deformed to a sphere.

问题 1.1： 回答还是不回答，是个问题。

如何引用定理 1.1 呢？加上 `\label` 使用 `\ref` 即可。妾发初覆额，折花门前剧。郎骑竹马来，绕床弄青梅。同居长干里，两小无嫌猜。十四为君妇，羞颜未尝开。低头向暗壁，千唤不一回。十五始展眉，愿同尘与灰。常存抱柱信，岂上望夫台。十六君远行，瞿塘滟滪堆。五月不可触，猿声天上哀。门前迟行迹，一一生绿苔。苔深不能扫，落叶秋风早。八月蝴蝶来，双飞西园草。感此伤妾心，坐愁红颜老。

1.5 参考文献

当然参考文献可以直接写 `\bibitem`，虽然费点功夫，但是好控制，各种格式可以自己随意改写。

本模板推荐使用 BIBTEX，分别提供数字引用（`thuthesis-numeric.bst`）和作者年份引用（`thuthesis-author-year.bst`）样式，基本符合学校的参考文献格式（如专利等引用未加详细测试）。看看这个例子，关于书的[???]，还有这些[???]，关于杂志的[???]，硕士论文[??]，博士论文[??]，标准文件[?]，会议论文[??]，技术报告[?]，电子文献[??]。若使用著者-出版年制，中文参考文献[?]应增加 `key={pinyin}` 字段，以便正确进行排序[?]。另外，如果对参考文献有不如意的地方，请手动修改 `bbl` 文件。

有时候不想要上标，那么可以这样 [**?**]，这个非常重要。

有时候一些参考文献没有纸质出处，需要标注 URL。缺省情况下，URL 不会在连字符处断行，这可能使得用连字符代替空格的网址分行很难看。如果需要，可以将模板类文件中

```
\RequirePackage{hyperref}
```

一行改为：

```
\PassOptionsToPackage{hyphens}{url}
\RequirePackage{hyperref}
```

使得连字符处可以断行。更多设置可以参考 `url` 宏包文档。

1.6 公式

贝叶斯公式如式 (1-13)，其中 $p(y|\boldsymbol{x})$ 为后验；$p(\boldsymbol{x})$ 为先验；分母 $p(\boldsymbol{x})$ 为归一化因子。

$$p(y|\boldsymbol{x}) = \frac{p(\boldsymbol{x}, y)}{p(\boldsymbol{x})} = \frac{p(\boldsymbol{x}|y)p(y)}{p(\boldsymbol{x})} \tag{1-13}$$

论文里面公式越多，TEX 就越 happy。再看一个 amsmath 的例子：

$$\det \boldsymbol{K}(t = 1, t_1, \cdots, t_n) = \sum_{I \in \boldsymbol{n}} (-1)^{|I|} \prod_{i \in I} t_i \prod_{j \in I} (D_j + \lambda_j t_j) \det \boldsymbol{A}^{(\lambda)}(\overline{I}|\overline{I}) = 0. \tag{1-14}$$

前面定理示例部分列举了很多公式环境，可以说把常见的情况都覆盖了，大家在写公式的时候一定要好好看 amsmath 的文档，并参考模板中的用法：

$$\begin{aligned}
&\int_a^b \left\{ \int_a^b [f(x)^2 g(y)^2 + f(y)^2 g(x)^2] - 2f(x)g(x)f(y)g(y)\,\mathrm{d}x \right\} \mathrm{d}y \\
&\qquad\qquad = \int_a^b \left\{ g(y)^2 \int_a^b f^2 + f(y)^2 \int_a^b g^2 - 2f(y)g(y) \int_a^b fg \right\} \mathrm{d}y
\end{aligned}$$

其实还可以看看这个多级规划：

$$\begin{cases}
\max_{\boldsymbol{x}} F(\boldsymbol{x}, y_1^*, y_2^*, \cdots, y_m^*) \\
\text{subject to:} \\
\qquad G(\boldsymbol{x}) \leqslant 0 \\
\qquad (y_1^*, y_2^*, \cdots, y_m^*) \text{ solves problems } (i = 1, 2, \cdots, m) \\
\qquad \begin{cases}
\max_{\boldsymbol{x}} f_i(\boldsymbol{x}, y_1, y_2, \cdots, y_m) \\
\text{subject to:} \\
\qquad g_i(\boldsymbol{x}, y_1, y_2, \cdots, y_m) \leqslant 0.
\end{cases}
\end{cases} \tag{1-15}$$

这些跟规划相关的公式都来自于刘宝碇老师《不确定规划》的课件。

第 2 章　极化白化滤波器舰船目标检测

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

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

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

$$f(\mathbf{X}) = \frac{1}{\Pi^3 \left|\Sigma_c\right|} \exp(-\mathbf{X}^H \Sigma_c^{-1} \mathbf{X}) \tag{2-2}$$

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(·) 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：

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

在上式中 $*$ 代表共轭转置

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

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。

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

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

$$y = \mathbf{X}^H A\mathbf{X} \tag{2-6}$$

在式2-6中，权重矩阵 A 为厄米共轭且正定，为了找到最优权重矩阵 A^*，将式2-5做如下变换，式2-7中，$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 为矩阵 $\Sigma_c A$ 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 $\Sigma_c A$ 为单位阵特征值 $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3$ 时，该比值达到最小。因此 A^*=Σ_c^{-1} 被称作极化白化滤波器。

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

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。

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

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 1000x1000 的海洋场景，在自适应极化白化滤波器方法中，使用大小为 31x31 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

不同强度图像如图2.1所示，从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-海之间的对比对，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。

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

(a) HH 强度图　　(b) SPAN 强度图　　(c) APWF 强度图

图 2.1　HH,SPAN 与 APWF 强度图像

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 [3] 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：

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

式2-9中，ρ 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。

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

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

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}

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

Output: 二值舰船检测结果图像 *result*

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。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 32x32 即每个线程块中包含 1024 个线程，网格大小设计为 16x16。实验中使用的图像大小为 1000x1000，故让一个线程块中共 1024 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 2.2　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，协方差矩阵计算主要涉及一个 3xN 与一个 Nx3 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

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 NVDIA TIATN V 平台上对 APWF 舰船检测方法进行测试，图2.3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4.1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。

(a) SPAN 图　　(b) PWF 检测结果

图 2.3　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	(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　基于混合对数正太模型 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。在本章中我采用混合对数正太模型对强度 SAR 图像中的海杂波进行建模，实质上对数混合正太模型 (lognormal mixture model) 等价于强度 SAR 图像在对数域上的混合高斯模型，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　对数混合正太模型

定义强度 SAR 图像中的像素值 **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 **x** 服从包含 K 个成分的混合对数正太分布。

$$f_x(x) = \sum_{i=1}^{K} \alpha_i \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i x} \exp(-\frac{(\ln x - \mu_i)^2}{2\sigma^2}), x > 0 \tag{3-1}$$

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

$$\sum_{i=1}^{K} \alpha_i = 1, \alpha_i \geqslant 0 \tag{3-2}$$

对随机变量 **x** 做形式变换，另 $Y = \mathbf{x}$，我们可以推导出对于随机变量 Y，其满足的概率密度函数如式3-3所示, 显然随机变量 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太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。

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

3.3 海杂波分布参数估计

在3.2节表明，混合对数正太分布在强度域与混合高斯分布在对数域上等价，因此混合正太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 [4] 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4-11 所示。在该式中 $\phi(y|\mu_k,\sigma_k)$ 为均值为 μ_k, 标准差为 σ_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。

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

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4.4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4-11中进行海杂波分布参数的迭代估计。

图 3.1　采用滑动窗进行自适应杂波参数估计，阴影所示像素用于杂波估计

3.4　应用 LMM 模型进行 CFAR 舰船检测

当采用混合对数正太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4-12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太分布，$F(x)$ 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4-13所示, 迭代停止的条件为 $\left|T_{i+1}-T_i\right|<\delta$ 当满足迭代精度要求后，最终的检测阈值为 $T^*=T_{i+1}$。

$$\mathrm{P}_{FA}=\int_{T}^{+\infty} f(x)dx=1-F(x) \tag{3-5}$$

$$\mathrm{T}_{i+1}=T_i-\frac{F(T_i)+P_{FA}-1}{f(T_i)} \tag{3-6}$$

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4-14。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 2: 基于 LMM 分布的 CFAR 舰船检测算法

Input: HH 通道强度 SAR 图像

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。

foreach 图像中的像素 **do**

  从对数强度图像中根据滑动窗选择海杂波像素值 **y**

  采用 EM 迭代算法计算 LMM 分布参数 μ_i，α_i 与 σ_i

  根据式4-13计算检测阈值 T

  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。

end

Output: 二值舰船检测结果图像 *result*

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

综合前几节所述，使用混合对数正太模型的 CFAR 舰船目标检测流程如算法5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，因此可以将滑动穿参数估计部分在 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 8x8，将线程网格的大小设置为 $(\left\lfloor \frac{w+1}{8} \right\rfloor, \left\lfloor \frac{h+1}{8} \right\rfloor)$。其中 $\lfloor\rfloor$ 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4.5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 $1x10^{-5}$，检测结果如图4.6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)	15.1
LMM-CFAR(GPU 多线程)	GPU(Titan V)	0.73

3.7 小结

本章我们实现了基于混合对数正太分布的恒虚警率 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 检测器的初步结果得到最终的检测二值图像。

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, 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。

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

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

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 极化协防差矩阵。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。

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

在极化协方差矩阵 C 中，将对角线元素之和定义为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，其中 λ_i 为极化协方差矩阵特征值，v_i 为 λ_i 对应的特征向量。

$$\text{SPAN} = C_{11} + C_{22} + C_{33} \tag{4-4}$$

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

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。

$$[LBP_{(x_c,y_c)} = \sum_{i=0}^{n-1} 2^{is(g_i - g_c)}, s(x) = \begin{cases} 1 & x \geqslant 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases} \tag{4-6}$$

类比光学图像中的 LBP 特征，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，而极化协防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，而极化协防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 像素处的极化协防差矩阵，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，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。

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

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防差矩阵，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 **P** 后，首先对 **P** 矩阵应用 SPAN 检测器，即当 $\mathrm{SPAN}_{\mathbf{P}}>T_{\mathrm{SPAN}}$ 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**??**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。

$$\mathrm{PSH} = \frac{|\lambda_3|}{|\lambda_1| + |\lambda_2|} \tag{4-8}$$

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 3: 基于 PCDM 的舰船检测算法

Input: 原始极化 SAR 图像数据

初始化，计算每个像素的协防差矩阵。

foreach 图像中的像素 **do**

  根据协方差矩阵计算该像素对应的极化协方差差异矩阵

  计算该极化协方差差异矩阵的 SPAN 值

  计算极化协方差差异矩阵的基础船高 (PSH) 极化特征

  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。

  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

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3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。

内核函数的设计，首先计算线程所对应的二维索引，将该二维索引与其 3x3 邻域的散射矩阵数据从全局内存复制到线程私有的内存空间中, 之后计算这九个像素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素的协方差矩阵元素。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值和得到极化协方差差异矩阵。首先对该矩阵应用 SPAN 检测器，即计算矩阵对角线元素之和与经验阈值做比较，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 φ 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4所示。得到矩阵的特征值后计算 PSH 计算特征的大小并与经验阈值做比较，如果 PSH 值大于经验分割阈值，则该像素判断为舰船目标像素。主机端等到 GPU 上所有线程核函数执行结束后，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。

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

$$
\begin{pmatrix} a_{pn}^{i+1} \\ a_{qn}^{i+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\varphi & \sin\varphi \\ -\sin\varphi & \cos\varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_{pn}^{i} \\ a_{qn}^{i} \end{pmatrix}, n \neq p, q \tag{4-9}
$$

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

$$
a_{mn}^{i+1} = a_{nm}^{i+1} = a_{mn}^{i}, m \neq p, q; n \neq p, q
$$

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

Algorithm 4: 雅克比迭代计算矩阵特征值

Input: 实对称矩阵 **A**

```
初始化特征向量为单位阵。
while A 非主对角元素绝对值 < 给定阈值 do
    在 A 的非主对角元素中找到最大元素值为 a_pq
    用式4-10计算旋转角度 φ
    用式4-9来对矩阵 A 中的元素进行更新
end
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
```

$$
\begin{aligned}
{\mu_k}^{i+1} &= \frac{\sum_{j=1}^{n} \gamma_{jk} y_j}{\sum_{j}^{n} \gamma_{jk}} \\
{\sigma_k}^{\mathrm{i+1}} &= \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{n} \gamma_{jk}(y_j - {\mu_k}^{i+1})}{\sum_{j}^{n} \gamma_{jk}}} \\
{\alpha_k}^{i+1} &= \frac{\sum_{j}^{n} \gamma_{jk}}{n} \\
\gamma_{jk} &= \frac{{\alpha_k}^{i} \phi(y_j | u_k^i, \sigma_k^i)}{\sum_{k=1}^{K} {\alpha_k}^{i} \phi(y_j | u_k^i, \sigma_k^i)}
\end{aligned}
\tag{4-11}
$$

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4.4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4-11中进行海杂波分布参数的迭代估计。

4.5 应用 LMM 模型进行 CFAR 舰船检测

当采用混合对数正太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4-12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太分布，$F(x)$ 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4-13所示, 迭代停止的条件为 $\left|T_{i+1} - T_i\right| < \delta$ 当满足迭代精度要求后，最终的检测阈值为 $T^* = T_{i+1}$。

$$
\mathrm{P}_{FA} = \int_{T}^{+\infty} f(x) dx = 1 - F(x) \tag{4-12}
$$

$$
\mathrm{T}_{i+1} = T_i - \frac{F(T_i) + P_{FA} - 1}{f(T_i)} \tag{4-13}
$$

Algorithm 5: 基于 LMM 分布的 CFAR 舰船检测算法

Input: HH 通道强度 SAR 图像

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。

foreach 图像中的像素 **do**

  从对数强度图像中根据滑动窗选择海杂波像素值 **y**

  采用 EM 迭代算法计算 LMM 分布参数 μ_i，α_i 与 σ_i

  根据式4-13计算检测阈值 T

  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。

end

Output: 二值舰船检测结果图像 $result$

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4-14。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。

$$F(x) = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{K}\lambda_k[1 + erf(\frac{x-u_i}{\sqrt{2}\sigma_i})] \tag{4-14}$$

综合前几节所述，使用混合对数正太模型的 CFAR 舰船目标检测流程如算法5所示

4.6 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，因此可以将滑动穿参数估计部分在 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 4.3　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 8x8，将线程网格的大小设置为 $(\left\lfloor \frac{w+1}{8} \right\rfloor, \left\lfloor \frac{h+1}{8} \right\rfloor)$。其中 $\lfloor\rfloor$ 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 + block-

Dim.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 4.4　CUDA 线程与检测像素映射关系

4.7　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4.5所示

在检测中我们设置恒虚警为 $1x10^{-5}$，检测结果如图4.6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%。

表 4.1　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)	15.1
LMM-CFAR(GPU 多线程)	GPU(Titan V)	0.73

图 4.5　四张 SIR-C/XSAR 强度图像

4.8　小结

本章我们实现了基于混合对数正太分布的恒虚警率 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。

图 4.6　LMM 检测结果

插图索引

图 2.1　HH,SPAN 与 APWF 强度图像 16
图 2.2　CUDA 执行流程 18
图 2.3　PWF 图像检测结果 19
图 3.1　采用滑动窗进行自适应杂波参数估计，阴影所示像素用于杂波估计 23
图 3.2　CUDA 内存模型 25
图 3.3　CUDA 线程与检测像素映射关系 26
图 3.4　四张 SIR-C/XSAR 强度图像 26
图 3.5　LMM 检测结果 27
图 4.1　PCDM 矩阵计算示意图 31
图 4.2　PCDM 检测流程示意图 32
图 4.3　CUDA 内存模型 37
图 4.4　CUDA 线程与检测像素映射关系 38
图 4.5　四张 SIR-C/XSAR 强度图像 39
图 4.6　LMM 检测结果 40

表格索引

表 1.1 模板文件 3
表 1.2 复杂表格示例 1。这个引用[?] 不会导致编号混乱。 3
表 1.3 第一个并排子表格 4
表 1.4 第二个并排子表格 4
表 1.5 并排子表格.....5
表 1.6 复杂表格示例 2.....5
表 1.7 实验数据 6
表 2.1 不同强度图像 s/m 比值 15
表 2.2 Adaptive PWF 检测结果 19
表 2.3 PWF 不同平台运行时间 19
表 3.1 LMM 算法时间 27
表 4.1 LMM 算法时间 38

公式索引

公式 1-1 ……8
公式 1-2 ……8
公式 1-3 ……8
公式 1-4 ……8
公式 1-5 ……8
公式 1-6 ……9
公式 1-7 ……9
公式 1-8 ……9
公式 1-9a ……9
公式 1-9b …… 10
公式 1-10 …… 10
公式 1-11 …… 10
公式 1-12 …… 10
公式 1-13 …… 12
公式 1-14 …… 12
公式 1-15 …… 12
公式 2-1 …… 13
公式 2-2 …… 13
公式 2-3 …… 14
公式 2-4 …… 14
公式 2-5 …… 14
公式 2-6 …… 14
公式 2-7 …… 15
公式 2-8 …… 15
公式 2-9 …… 16
公式 2-10 …… 16
公式 3-1 …… 21
公式 3-2 …… 21

公式 3-3 22
公式 3-4 22
公式 3-5 23
公式 3-6 23
公式 3-7 24
公式 4-1 29
公式 4-2 29
公式 4-3 30
公式 4-4 30
公式 4-5 30
公式 4-6 30
公式 4-7 31
公式 4-8 31
公式 4-9 34
公式 4-10 34
公式 4-11 35
公式 4-12 35
公式 4-13 35
公式 4-14 36
公式 A-1 48
公式 A-2 48

致　谢

衷心感谢导师 xxx 教授和物理系 xxx 副教授对本人的精心指导。他们的言传身教将使我终生受益。

在美国麻省理工学院化学系进行九个月的合作研究期间，承蒙 xxx 教授热心指导与帮助，不胜感激。感谢 xx 实验室主任 xx 教授，以及实验室全体老师和同学们的热情帮助和支持！本课题承蒙国家自然科学基金资助，特此致谢。

感谢 LaTeX 和 ThuThesis[?]，帮我节省了不少时间。

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　外文资料原文

The title of the English paper

Abstract: As one of the most widely used techniques in operations research, *mathematical programming* is defined as a means of maximizing a quantity known as *bjective function*, subject to a set of constraints represented by equations and inequalities. Some known subtopics of mathematical programming are linear programming, nonlinear programming, multiobjective programming, goal programming, dynamic programming, and multilevel programming[1].

It is impossible to cover in a single chapter every concept of mathematical programming. This chapter introduces only the basic concepts and techniques of mathematical programming such that readers gain an understanding of them throughout the book[2,3].

A.1　Single-Objective Programming

The general form of single-objective programming (SOP) is written as follows,

$$\begin{cases} \max \ \ f(x) \\ \text{subject to:} \\ \qquad g_j(x) \leqslant 0, \quad j = 1, 2, \cdots, p \end{cases}$$

which maximizes a real-valued function f of $x = (x_1, x_2, \cdots, x_n)$ subject to a set of constraints.

Definition A.1： In SOP, we call x a decision vector, and $x_1, x_2, \cdots, x_n$ decision variables. The function f is called the objective function. The set

$$S = \left\{ x \in \mathbf{R}^n \;\middle|\; g_j(x) \leqslant 0,\ j = 1, 2, \cdots, p \right\}$$

is called the feasible set. An element x in S is called a feasible solution.

Definition A.2： A feasible solution x^* is called the optimal solution of SOP if and only if

$$f(x^*) \geqslant f(x) \tag{A-1}$$

for any feasible solution x.

One of the outstanding contributions to mathematical programming was known as the Kuhn-Tucker conditionsA-2. In order to introduce them, let us give some definitions. An inequality constraint $g_j(x) \leqslant 0$ is said to be active at a point x^* if $g_j(x^*) = 0$. A point x^* satisfying $g_j(x^*) \leqslant 0$ is said to be regular if the gradient vectors $\nabla g_j(x)$ of all active constraints are linearly independent.

Let x^* be a regular point of the constraints of SOP and assume that all the functions $f(x)$ and $g_j(x), j = 1, 2, \cdots, p$ are differentiable. If x^* is a local optimal solution, then there exist Lagrange multipliers $\lambda_j, j = 1, 2, \cdots, p$ such that the following Kuhn-Tucker conditions hold,

$$\begin{cases} \nabla f(x^*) - \sum\limits_{j=1}^{p} \lambda_j \nabla g_j(x^*) = 0 \\ \lambda_j g_j(x^*) = 0, \quad j = 1, 2, \cdots, p \\ \lambda_j \geqslant 0, \quad j = 1, 2, \cdots, p. \end{cases} \tag{A-2}$$

If all the functions $f(x)$ and $g_j(x), j = 1, 2, \cdots, p$ are convex and differentiable, and the point x^* satisfies the Kuhn-Tucker conditions (A-2), then it has been proved that the point x^* is a global optimal solution of SOP.

A.1.1 Linear Programming

If the functions $f(x), g_j(x), j = 1, 2, \cdots, p$ are all linear, then SOP is called a *linear programming*.

The feasible set of linear is always convex. A point x is called an extreme point of convex set S if $x \in S$ and x cannot be expressed as a convex combination of two points in S. It has been shown that the optimal solution to linear programming corresponds to an extreme point of its feasible set provided that the feasible set S is bounded. This fact is the basis of the *simplex algorithm* which was developed by Dantzig as a very efficient method for solving linear programming.

Table 1 This is an example for manually numbered table, which would not appear in the list of tables

Network Topology		# of nodes	# of clients			Server
GT-ITM	Waxman Transit-Stub	600	2%	10%	50%	Max. Connectivity
Inet-2.1		6000				
Xue	Rui	Ni	ThuThesis			
	ABCDEF					

Roughly speaking, the simplex algorithm examines only the extreme points of the feasible set, rather than all feasible points. At first, the simplex algorithm selects an extreme point as the initial point. The successive extreme point is selected so as to improve the objective function value. The procedure is repeated until no improvement in objective function value can be made. The last extreme point is the optimal solution.

A.1.2 Nonlinear Programming

If at least one of the functions $f(x), g_j(x), j = 1, 2, \cdots, p$ is nonlinear, then SOP is called a *nonlinear programming*.

A large number of classical optimization methods have been developed to treat special-structural nonlinear programming based on the mathematical theory concerned with analyzing the structure of problems.

清華大学図書館
TSINGHUA UNIVERSITY LIBRARY

Figure 1 This is an example for manually numbered figure, which would not appear in the list of figures

Now we consider a nonlinear programming which is confronted solely with maximizing a real-valued function with domain $\mathbf{R}^n$. Whether derivatives are available or not, the usual strategy is first to select a point in $\mathbf{R}^n$ which is thought to be the most likely place where the maximum exists. If there is no information available on which to base such a selection, a point is chosen at random. From this first point an attempt is made to construct a sequence of points, each of which yields an improved objective function value over its predecessor. The next point to be added to the sequence is chosen by analyzing the behavior of the function at the previous points. This construction continues

until some termination criterion is met. Methods based upon this strategy are called *ascent methods*, which can be classified as *direct methods*, *gradient methods*, and *Hessian methods* according to the information about the behavior of objective function f. Direct methods require only that the function can be evaluated at each point. Gradient methods require the evaluation of first derivatives of f. Hessian methods require the evaluation of second derivatives. In fact, there is no superior method for all problems. The efficiency of a method is very much dependent upon the objective function.

A.1.3 Integer Programming

Integer programming is a special mathematical programming in which all of the variables are assumed to be only integer values. When there are not only integer variables but also conventional continuous variables, we call it *mixed integer programming*. If all the variables are assumed either 0 or 1, then the problem is termed a *zero-one programming*. Although integer programming can be solved by an *exhaustive enumeration* theoretically, it is impractical to solve realistically sized integer programming problems. The most successful algorithm so far found to solve integer programming is called the *branch-and-bound enumeration* developed by Balas (1965) and Dakin (1965). The other technique to integer programming is the *cutting plane method* developed by Gomory (1959).

Uncertain Programming (*BaoDing Liu, 2006.2*)

References

NOTE: These references are only for demonstration. They are not real citations in the original text.

[1] Donald E. Knuth. The TEXbook. Addison-Wesley, 1984. ISBN: 0-201-13448-9

[2] Paul W. Abrahams, Karl Berry and Kathryn A. Hargreaves. TEX for the Impatient. Addison-Wesley, 1990. ISBN: 0-201-51375-7

[3] David Salomon. The advanced TEXbook. New York : Springer, 1995. ISBN:0-387-94556-3

附录 B　外文资料的调研阅读报告或书面翻译

英文资料的中文标题

摘要：本章为外文资料翻译内容。如果有摘要可以直接写上来，这部分好像没有明确的规定。

B.1　单目标规划

北冥有鱼，其名为鲲。鲲之大，不知其几千里也。化而为鸟，其名为鹏。鹏之背，不知其几千里也。怒而飞，其翼若垂天之云。是鸟也，海运则将徙于南冥。南冥者，天池也。

$$p(y|\mathbf{x}) = \frac{p(\mathbf{x}, y)}{p(\mathbf{x})} = \frac{p(\mathbf{x}|y)p(y)}{p(\mathbf{x})} \tag{123}$$

吾生也有涯，而知也无涯。以有涯随无涯，殆已！已而为知者，殆而已矣！为善无近名，为恶无近刑，缘督以为经，可以保身，可以全生，可以养亲，可以尽年。

B.1.1　线性规划

庖丁为文惠君解牛，手之所触，肩之所倚，足之所履，膝之所倚，砉然响然，奏刀騞然，莫不中音，合于桑林之舞，乃中经首之会。

表 1　这是手动编号但不出现在索引中的一个表格例子

<table>
<tr><td colspan="2">Network Topology</td><td># of nodes</td><td colspan="3"># of clients</td><td>Server</td></tr>
<tr><td>GT-ITM</td><td>Waxman Transit-Stub</td><td>600</td><td rowspan="2">2%</td><td rowspan="2">10%</td><td rowspan="2">50%</td><td rowspan="2">Max. Connectivity</td></tr>
<tr><td colspan="2">Inet-2.1</td><td>6000</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Xue</td><td>Rui</td><td>Ni</td><td colspan="3" rowspan="2">ThuThesis</td></tr>
<tr><td colspan="2">ABCDEF</td></tr>
</table>

文惠君曰：“嘻，善哉！技盖至此乎？”庖丁释刀对曰：“臣之所好者道也，进乎技矣。始臣之解牛之时，所见无非全牛者；三年之后，未尝见全牛也；方今之时，臣以神遇而不以目视，官知止而神欲行。依乎天理，批大郤，导大窾，因其固然。技经肯綮之未尝，而况大坬乎！良庖岁更刀，割也；族庖月更刀，折也；

今臣之刀十九年矣，所解数千牛矣，而刀刃若新发于硎。彼节者有间而刀刃者无厚，以无厚入有间，恢恢乎其于游刃必有余地矣。是以十九年而刀刃若新发于硎。虽然，每至于族，吾见其难为，怵然为戒，视为止，行为迟，动刀甚微，謋然已解，如土委地。提刀而立，为之而四顾，为之踌躇满志，善刀而藏之。”

文惠君曰：“善哉！吾闻庖丁之言，得养生焉。”

B.1.2　非线性规划

孔子与柳下季为友，柳下季之弟名曰盗跖。盗跖从卒九千人，横行天下，侵暴诸侯。穴室枢户，驱人牛马，取人妇女。贪得忘亲，不顾父母兄弟，不祭先祖。所过之邑，大国守城，小国入保，万民苦之。孔子谓柳下季曰：“夫为人父者，必能诏其子；为人兄者，必能教其弟。若父不能诏其子，兄不能教其弟，则无贵父子兄弟之亲矣。今先生，世之才士也，弟为盗跖，为天下害，而弗能教也，丘窃为先生羞之。丘请为先生往说之。”

图 1　这是手动编号但不出现索引中的图片的例子

柳下季曰：“先生言为人父者必能诏其子，为人兄者必能教其弟，若子不听父之诏，弟不受兄之教，虽今先生之辩，将奈之何哉？且跖之为人也，心如涌泉，意如飘风，强足以距敌，辩足以饰非。顺其心则喜，逆其心则怒，易辱人以言。先生必无往。”

孔子不听，颜回为驭，子贡为右，往见盗跖。

B.1.3　整数规划

盗跖乃方休卒徒大山之阳，脍人肝而餔之。孔子下车而前，见谒者曰：“鲁人孔丘，闻将军高义，敬再拜谒者。”谒者入通。盗跖闻之大怒，目如明星，发上指冠，曰：“此夫鲁国之巧伪人孔丘非邪？为我告之：尔作言造语，妄称文、武，冠枝木之冠，带死牛之胁，多辞缪说，不耕而食，不织而衣，摇唇鼓舌，擅生是非，以迷天下之主，使天下学士不反其本，妄作孝弟，而侥幸于封侯富贵者也。子之罪大极重，疾走归！不然，我将以子肝益昼餔之膳。”

附录 C　其它附录

前面两个附录主要是给本科生做例子。其它附录的内容可以放到这里，当然如果你愿意，可以把这部分也放到独立的文件中，然后将其 `\input` 到主文件中。

在学期间参加课题的研究成果

个人简历

xxxx 年 xx 月 xx 日出生于 xx 省 xx 县。

xxxx 年 9 月考入 xx 大学 xx 系 xx 专业，xxxx 年 7 月本科毕业并获得 xx 学士学位。

xxxx 年 9 月免试进入 xx 大学 xx 系攻读 xx 学位至今。

发表的学术论文

[1] Yang Y, Ren T L, Zhang L T, et al. Miniature microphone with silicon- based ferroelectric thin films. Integrated Ferroelectrics, 2003, 52:229-235. (SCI 收录, 检索号:758FZ.)

[2] 杨轶, 张宁欣, 任天令, 等. 硅基铁电微声学器件中薄膜残余应力的研究. 中国机械工程, 2005, 16(14):1289-1291. (EI 收录, 检索号:0534931 2907.)

[3] 杨轶, 张宁欣, 任天令, 等. 集成铁电器件中的关键工艺研究. 仪器仪表学报, 2003, 24(S4):192-193. (EI 源刊.)

[4] Yang Y, Ren T L, Zhu Y P, et al. PMUTs for handwriting recognition. In press. (已被 Integrated Ferroelectrics 录用. SCI 源刊.)

[5] Wu X M, Yang Y, Cai J, et al. Measurements of ferroelectric MEMS microphones. Integrated Ferroelectrics, 2005, 69:417-429. (SCI 收录, 检索号:896KM)

[6] 贾泽, 杨轶, 陈兢, 等. 用于压电和电容微麦克风的体硅腐蚀相关研究. 压电与声光, 2006, 28(1):117-119. (EI 收录, 检索号:06129773469)

[7] 伍晓明, 杨轶, 张宁欣, 等. 基于 MEMS 技术的集成铁电硅微麦克风. 中国集成电路, 2003, 53:59-61.

研究成果

[1] 任天令, 杨轶, 朱一平, 等. 硅基铁电微声学传感器畴极化区域控制和电极连接的方法: 中国, CN1602118A. (中国专利公开号)

[2] Ren T L, Yang Y, Zhu Y P, et al. Piezoelectric micro acoustic sensor based on ferroelectric materials: USA, No.11/215, 102. (美国发明专利申请号)

综合论文训练记录表

<table>
<tr><td>学生姓名</td><td></td><td>学号</td><td></td><td>班级</td><td></td></tr>
<tr><td>论文题目</td><td colspan="5"></td></tr>
<tr><td>主要内容以及进度安排</td><td colspan="5">指导教师签字：_____
考核组组长签字：_____
年　　月　　日</td></tr>
<tr><td>中期考核意见</td><td colspan="5">考核组组长签字：_____
年　　月　　日</td></tr>
</table>

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

总成绩：_____

教学负责人签字：_____

年　　月　　日