

中图分类号: TP391
学科分类号: 081001

论文编号: 1028704 10-0013

硕士学位论文

基于高分辨率 SAR 图像打击效果评估 研究与实现

研究生姓名	宛苏成
学科、专业	通信与信息系统
研究方向	SAR 图像处理
指导教师	张弓教授

南京航空航天大学

研究生院 信息科学与技术学院

二〇一〇年一月

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics
The Graduate School
College of Information Science and Technology

Research and implementation of high resolution SAR image battle damage assessment

A Thesis in

Communication and information System

by

Wan Sucheng

Advised by

Prof. Zhang Gong

Submitted in Partial Fulfillment

of the Requirements

for the Degree of

Master of Engineering

January, 2010

承诺书

本人声明所呈交的硕士学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得南京航空航天大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。

本人授权南京航空航天大学可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。

（保密的学位论文在解密后适用本承诺书）

作者签名：_____

日 期：_____

摘 要

随着军事科学技术的发展,打击效果评估技术越来越受到各国政府机构及科研工作者的关注和重视。合成孔径雷达由于其全天候、全天时等优点,非常符合打击效果评估对实时性的要求。因此,基于高分辨率 SAR 图像的打击效果评估在军事应用中具有十分重要的作用和意义。

本文结合某国防预研项目,重点研究了打击效果仿真和基于复杂场景的 SAR 图像仿真,通过分析基于 SAR 图像理解的打击效果评估相关技术,提出了 SAR 图像打击效果评估算法,并基于这些方法实现了 SAR 图像的打击效果评估系统。主要工作概括如下:

- 1、打击效果仿真建模和 SAR 图像仿真研究。针对打击效果评估研究中缺乏打击后图像资源的情况,提出了一种打击效果仿真算法。通过碎片中心分布模型、碎片生成模型和碎片灰度变化模型,控制弹药毁伤产生的碎片数量、形状和灰度变化,实现打击效果仿真。针对高分辨率 SAR 图像打击效果评估研究中缺乏指定区域 SAR 图像的情况,根据 SAR 成像原理和相干斑噪声产生原理,基于复杂场景的电磁后向散射系数分布进行 SAR 图像仿真。
- 2、基于 SAR 图像理解的打击效果评估相关技术研究。在打击效果仿真和 SAR 图像仿真技术的基础上,设计了基于 SAR 图像的打击效果评估系统研究方案。主要对图像配准、CFAR 检测、变化检测、Otsu 相关方法的图像分割等技术做了系统的研究。
- 3、基于变化检测的高分辨率 SAR 图像打击效果评估算法的研究。现有的基于目标特征对比的 SAR 图像打击效果评估方法对评估目标的类型有较高的要求,限制了算法的实际应用。因此,本文提出了一种实用的高分辨率 SAR 图像打击效果评估方法,通过图像配准、变化检测、阈值分割,得到不同等级的毁伤区域分割结果。
- 4、高分辨率 SAR 图像打击效果评估系统的设计实现。本文用 Visual C++ 6.0 和 Oracle /SQL Sever 9i 数据库将打击效果仿真、SAR 图像仿真、图像配准和打击效果评估四个模块综合到“SAR 图像打击效果评估系统”中。

关键词: 打击效果评估, SAR 图像, 打击效果仿真, SAR 图像仿真, 图像配准, 变化检测

Abstract

With the development of military science and technology, BDA technique becomes more important in modern warfare. Great attention has been paid to this field by governments and researchers. Synthetic aperture radar meets the Real-time requirements of BDA because of its all-day, all-weather capabilities. So BDA based on SAR image is very important in military application.

In this thesis, according to the defense pre-research fund, techniques of battle damage simulation and SAR image simulation of complicated region was studied. On the basis of analyzing the key techniques of image processing in BDA, we proposed a method for SAR image BDA, these algorithms are applied to achieve a SAR image BDA system. The main content of this thesis are summarized as follows:

1. Research on battle damage simulation and SAR image simulation. The lack of after-strike images makes research on BDA harder. A algorithm was proposed to solve this problem. Through the number, shape, and intensity of fragments controlled by the fragment distribution model, fragments generation model and intensity change model, battle damage simulation was realized. Sometimes, there are no SAR images in designated region. According to the principle of SAR imagery and speckle theory, SAR image simulation method based on backscattering coefficient distribution of complicated region was studied to provide simulated SAR images.
2. Some related image processing techniques about image-based BDA was studied. On the basis of battle damage simulation and SAR image simulation techniques, a research case about BDA system was designed. Then, some key techniques related to BDA: image registration, CFAR target detection, change detection, image segmentation using Otsu methods, are deeply analyzed and studied.
3. SAR image BDA method based on change detection. The existing algorithm based on target feature comparison has more demanding on the target type. It greatly limits the application of this algorithm. A practical method was proposed. Segmented regions with different damage level were provided by using image registration, change detection, threshold segmentation.
4. Design and realization of the SAR image BDA system. In this system, four modules including battle damage simulation, SAR image simulation, image registration, battle damage assessment are realized using Visual C++6.0 and Oracle /SQL Sever 9i.

Keywords: BDA, SAR image, battle damage simulation, SAR image simulation, image registration, change detection.

目 录

第一章 绪论	1
1.1 打击效果评估的研究背景与意义	1
1.2 打击效果评估国内外研究进展	3
1.2.1 国内外研究进展	3
1.2.2 待解决的问题	5
1.3 本文的主要研究工作	6
第二章 打击效果仿真及 SAR 图像仿真	8
2.1 打击效果仿真	8
2.1.1 打击效果仿真需要解决的问题	8
2.1.2 打击效果仿真算法	10
2.2 SAR 图像仿真	14
2.2.1 SAR 成像原理	14
2.2.2 SAR 图像仿真一般方法	14
2.2.3 基于复杂场景的 SAR 图像仿真	16
2.3 实验结果及分析	19
2.3.1 打击效果仿真实验及结果分析	19
2.3.2 SAR 图像仿真实验及结果分析	21
2.4 总结	23
第三章 SAR 图像打击效果评估的关键技术	24
3.1 基于 SAR 图像的打击效果评估系统方案	24
3.2 SAR 图像打击效果评估的图像处理关键技术	25
3.2.1 基于特征变化的 SAR 图像打击效果评估图像处理关键技术	25
3.2.2 基于变化检测的 SAR 图像打击效果评估相关技术	29
3.2.3 毁伤评估	33
3.3 基于 SAR 图像的打击效果评估研究中待解决的问题	34
3.4 总结	34
第四章 基于变化检测的 SAR 图像打击效果评估研究	35
4.1 图像配准	35
4.2 变化检测	36

4.3 打击效果评估	37
4.4 评估实验及结果分析	38
4.5 总结	45
第五章 SAR 图像打击效果评估系统的设计与实现	46
5.1 系统总体设计结构	46
5.1.1 总体框架设计	46
5.1.2 系统软硬件平台	47
5.2 系统基本功能及具体实现	48
5.3 系统设计总结	51
第六章 全文总结及研究展望	52
6.1 全文总结	52
6.2 研究展望	52
参考文献	54
致 谢	59

图表清单

图 1.1 基于光学图像的打击效果评估流程.....	5
图 1.2 基于高分辨率 SAR 图像的打击效果评估流程.....	5
图 2.1 毁伤程度分布.....	9
图 2.2 碎片中心分布图.....	11
图 2.3 分辨单元中的散射体示意图.....	18
图 2.4 打击效果仿真流程.....	19
图 2.5 光学机场图像的打击效果仿真.....	20
图 2.6 SAR 图像建筑物目标的打击效果仿真.....	20
图 2.7 仿真前后差值结果图.....	21
图 2.8 SAR 图像仿真流程图.....	22
图 2.9 SAR 图像仿真预处理.....	23
图 2.10 SAR 图像仿真结果.....	23
图 3.1 SAR 图像打击效果评估系统研究方案.....	24
图 3.2 DP-CFAR 处理框图.....	26
图 3.3 广义多时相 SAR 图像变化检测流程图.....	32
图 4.1 变化检测流程.....	37
图 4.2 不同打击等级仿真效果图.....	39
图 4.3 配准结果图.....	40
图 4.4 配准后机场跑道 SAR 图像.....	41
图 4.5 打击前后的待检测区域.....	41
图 4.6 直接差值结果.....	42
图 4.8 进一步的均值滤波结果.....	42
图 4.10 实验 2 的打击效果评估结果.....	44
图 4.11 实验 3 的打击效果评估结果.....	44
图 5.1 软件系统结构图.....	46
图 5.2 软件操作流程图.....	47
图 5.3 打击效果评估系统界面.....	48
图 5.4 打击效果仿真对话框.....	49
图 5.5 SAR 图像仿真对话框.....	49
图 5.6 选择控制点.....	50
图 5.7 配准后图像.....	50
图 5.8 选择评估区域.....	51
图 5.9 评估结果.....	51
表 4.1 配准结果.....	38

注释表

BDA: Battle Damage Assessment 打击效果评估
SAR: Synthetic aperture radar 合成孔径雷达
DEM: Digital Evaluation Model 数字地面模型
RCS: Radar Cross Section 雷达散射截面
RANSAC: Random Sample Consensus 随机采样一致集

第一章 绪论

1.1 打击效果评估的研究背景与意义

随着现代科学技术的发展，人类社会生活中的一个特殊的领域-战争发生了较大的改观。战争形态逐渐由机械化向信息化演变。一大批逐步形成的高技术群体，如信息技术、生物技术、新材料技术、新能源技术、空间技术、海洋开发技术等，已经迅速渗透到经济、军事和社会生活的各个领域，并以空前的规模飞速发展着。各种高、精、尖技术兵器的投入使用，日益改变着旧有的战争样式，并使战争的样式呈高技术特征。

从近几年发生的世界局部战争可以看出，现代高技术战争具有传统战争无法比拟的突出特征，主要表现在^[1]：1) 空地海天一体化作战，多兵种协同作战；2) 广泛使用各种新式武器，战役具有明显的决战性和战略性；3) 电子战、火力战、机动战广泛应用；4) 非线性作战将成为主体，战役交战重心将从前沿争夺变为纵深较量；5) 战争的突发性强，进程短促，投入高、消耗大、效益显著；6) 打击的重点目标发生变化，空袭作战增多，地面交战相对减少，远距离火力战增多，近战机会相对减少。

1995 年，我国著名科学家钱学森首次提出，“现阶段和即将到来的战争形式为核威慑下的信息化战争”。现代高技术战争将围绕信息的搜集、处理、分发、防护而展开，信息化战争成为高技术战争的基本形态，夺取和保持控制信息权成为作战的中心和焦点。在 2005 年对伊拉克的战争中，我们可以看到美军已具备在短时间内连续迅速精确打击任何目标的能力。在每一轮打击完成后，快速反应，迅速做出下一轮打击决策。在这一过程中，打击效果评估扮演着至关重要的角色。打击效果评估作为信息化战争中信息处理的一个重要环节和关键技术，融合了雷达、卫星等图像信号的分析处理和地面谍报人员搜集的情报的综合处理等多项技术，对决策后续战役行动、加速战役进程、节约战争成本具有十分重要的作用。

打击效果评估(Battle Damage Assessment, 简称 BDA)，又称目标毁伤效果评估，是指对某一军事目标或区域进行火力攻击后，通过一定的侦查手段，获取敌方的毁伤信息，通过比较目标被打击前、后的信息，对打击对象的毁伤情况进行评估，以判断是否达到打击目的，是否还需组织下一波打击的过程^[2]。海湾战争后，美国参谋长联席会议对打击效果评估做了如下定义：及时、准确的评估因运用军事力量（包括致命的和非致命的）而造成的预定敌方目标的毁伤效果。打击效果评估是近年来刚刚兴起的一个研究领域，可用于各种武器系统，包括陆上，海上，空中，和一些特殊的武器系统，由于其在军事上的重要意义和良好应用前景，已经受到各国政府及很多研究人员的高度关注。

及时、准确地进行打击效果评估，能够最大限度地优化火力，提高战役资源的利用效率，

避免贻误战机或造成战役资源浪费。现代战争中，作战指挥员必须准确查明打击效果，适时做出效果评估，及时组织后续打击。在首次打击之中和打击之后，需要利用多种侦察手段和渠道，适时、准确查明打击的实际效果、敌方兵力部署的变化及修复情况，不断修正随后的打击目标、打击方法和打击重点，并组织部队迅速做好再次打击的准备。充分利用首次打击的效果对修正目标进行再次打击，尽量缩短与首次打击的时间间隔，在敌人尚未恢复之前，迅速组织行动，以保持和扩大联合火力打击的效果。再次打击通常应重点对已遭到一定程度毁伤的主要目标实施连续打击，以求彻底摧毁或长时间压制；在主要目标被摧毁的情况下，根据战场情况的发展变化，依据作战任务和作战重心，恰当地控制后续火力打击的节奏，直至达成预期目的。美军在 20 世纪 90 年代末以来的几场局部战争中都综合使用了多种手段，来对打击的效果进行评估。在每一次空中打击之后，美军都利用侦察卫星、各型战略战术侦察机、地面战术侦察部队和谍报人员对打击目标进行详细侦察，并及时对侦察卫星和侦察机拍摄的目标毁伤照片和图像进行处理。这种综合全面的评估系统，特别是航天侦察的利用，极大地提高了打击的有效性和反应速度。总之，适时、准确的打击效果评估对决策后续战役行动、加速战役进程、节约战争成本具有十分重要的作用。

在打击效果评估中，目标毁伤信息的收集是打击效果评估的基础。多手段、全方位、多平台的侦查信息以及由武器系统提供的大量实时、准确的战场情报对打击效果评估起着重要作用。一般战场目标信息的收集包括天基侦查、空基侦查、地面侦查、水下侦查，以及特种部队侦查和谍报侦查等方式。美国打击效果评估信息主要通过侦查卫星、战略侦察机、无人机、主站平台配备的侦查设备以及弹载侦查系统等来获取。

一般而言，打击效果评估中的信息处理工作，主要是针对打击前后目标区域的图像信息，结合目标的相关功能和参数信息，和谍报人员提供的相关情报信息进行综合分析处理，以获得目标被打击后的毁伤情况。毁伤情况一般包括：无毁伤、轻微毁伤、中度毁伤、严重毁伤、完全摧毁^[3]。根据文献[4]的舰船打击效果评估数学模型一文中的相关概念，我们认为：后续打击效果评估技术的研究要能够对被打击目标的不同部位指示出不同的毁伤程度，根据目标不同部位的重要性，综合各部位各自毁伤程度指示出目标的整体毁伤情况，并以图、表或简单数据等形式提供给专业分析人员和战场指挥官，作为下一步军事行动计划的参考。

打击效果评估是一项极具挑战而又意义重大的工作。一套完整的打击效果评估系统包括打击前后信息的搜集和传输，打击前后信息的精确分析和正确处理，根据评估结果指挥地面部队或自动调用武器系统对目标进行后续打击。而这套流程又是一个循环往复，不断优化调整更新的过程。在实际战场上，对目标的第一次打击可能偏离目标的关键位置，没有对目标造成致命毁伤，这时就需要根据评估结果对导弹等武器的发射参数做出相应调整，继续打击，直至目标完全摧毁或丧失其功能。

1.2 打击效果评估国内外研究进展

1.2.1 国内外研究进展

打击效果评估起始于第一次世界大战，当美国空军执行完轰炸任务后，他们几乎没有反馈任何有关目标的毁伤信息。但是空军的决策者和指挥官们需要知道轰炸的效果。以便制定下一步的作战计划，所以他们开始向执行轰炸任务的飞机机组人员索取轰炸任务报告，以及轰炸过程中拍摄到的目标毁伤照片。打击效果评估从此诞生。

第二次世界大战中，美军的打击效果评估不断发展，开发了各种侦查技术和图像处理技术用于目标毁伤信息的收集和处理。到越南战争时期，其分析技术逐渐趋于成熟，并不断开发各种分析程序，以满足不同层次的战斗需求。但是这一时期的打击效果评估主要是靠人工进行判图，对判图员的训练是一个长期而且昂贵的过程。一个优秀的卫星图片判图员往往需要几年的培训时间，并且每天判图数目很少。

美军打击效果评估技术的发展一直落后于其武器装备的发展脚步。海湾战争中，由于高新技术武器的运用，使得落后的信息收集、处理技术及评估程序难以及时、准确的对目标毁伤信息进行收集、分析及处理，从而难以满足战场指挥官对打击效果评估的需求，制约了美军及其盟军的各项军事行动。由于海湾战争时间太短，各种新的评估技术、评估程序和评估的组织机构还没来得及走向成熟，海湾战争就很快结束了。海湾战争后美军意识到其 BDA 分析存在的缺陷，所以成立了专门的机构进行 BDA 分析研究，并不断调整其 BDA 分析组织机构。

现今，美国采用机器判图与人工判图结合的方法，往往在军事打击后几个小时以内就可以判断出军事打击的效果，效率上提高了很多。美英目前采用较多的是可见光波段，SAR 雷达成像以及红外传感器综合分析评估。这种建立在比较目标打击前后成像分析基础上的评估系统是现代高技术信息化战争的基本条件。美英在科索沃战争中就曾使用 RQ-1 掠夺者无人侦察机拍摄目标攻击前后的图像，评估武器攻击效果。2001 年 2 月美英空军使用 AGM-154A 炸弹对伊拉克防空设施的空袭行动中，也使用了上述侦察机对打击后的目标进行侦察，采用图像分析的方法，分析了 AGM-154A 炸弹的攻击效果，并得出评估结果，并且评估结果受到美国五角大楼官员的肯定。而阿富汗战争中，塔利班政权在美军全方位，全天候的侦察及有效的打击下，部队无法集中，往往在集结过程中就被击溃或者其战略意图已被识破。美军在军事行动中采取了反复轰炸、全天候侦察、及时评估打击效果等高新技术手段，大量使用了图像分析对目标打击效果进行评估的技术，在近年来的每场局部战争中都取得了较好的效果。

据美国军方报道，美国国防部高级研究计划署(DARPA)正在负责一个“实时打击效果评估(R/T BDA)”的项目。这个项目将研发新的技术，以从雷达获取的图像中，实现对机动目标的打击效果自动评估。他们将努力使作战指挥员能更加及时、准确地对打击效果进行评估，尤其

是对机动目标。设此项目的另一个特别的目的是实现战时目标摧毁可能性的评估，以决定是立即进行后续攻击还是就此停住，以免不必要的武器浪费。由于大规模作战中，靠人工分析战场照片往往都会有时间上的滞后，这就导致执行战斗任务时没办法根据实时的打击效果对攻击力量进行最佳分配。R/T BDA 项目要研究的高级算法将根据目标的毁伤评估在足够短的时间内提供决策分析，以允许在必要的情况下立即做出继续攻击的决定。

国内关于打击效果评估的研究工作起步较晚，技术相对落后。虽然相关的技术和算法还不成熟，但是因为其重要的研究价值，得到了军方高层的重视，已经专门成立了相关国防预研项目进行打击效果评估研究。由于军事保密的原因，我们无法借鉴国外的相关技术，必须走自主研发的道路。目前，部分研究者通过仿真、网络或者其他途径获得少量的遥感、光学等打击前后图像，在打击效果评估领域进行了有意义的探索，并取得了一定的研究成果。其中华中科技大学的周成平、马波、席大春、骆渊等人在机场、桥梁、航母图像打击效果评估方面做了深入的研究，对国内打击效果评估领域的技术发展起到了推动作用。文献^[2]通过对机场图像的配准、机场跑道区域提取，设计机场跑道打击效果评估准则，在很大程度上实现了针对机场的打击效果评估的自动化与智能化。文献^[5]系统分析了美军航母的相关基本架构，通过深入研究航母轮廓的自动匹配方法和航母打击效果评估的建模基础，设计实现了航母打击效果评估的软件系统。文献^[6]以国内一些主要桥梁图像为研究对象，深入探讨桥梁关键部位的提取和匹配方法，设计实现了桥梁打击效果评估的专家知识库系统。文献^[7]将合成孔径雷达图像应用到打击效果评估领域，通过仿真得到建筑物的打击后 SAR 图像，对仿真前后 SAR 图像进行目标检测、目标分割、特征提取，得到打击前后的目标特征向量，再根据目标特征变化情况判断其毁伤程度，给出最终的评估结果。文献^[4]和^[8]则针对海战场目标打击效果评估进行研究，对于尚处于理论研究阶段的海上目标打击效果评估有积极的参考意义。文献^[9]提出了一种基于 ISAR 的空中目标打击效果评估方法，并通过实验仿真验证了利用 ISAR 评估目标打击效果方法的可行性。

综上所述，国内打击效果评估的相关研究已经囊括了机场、桥梁、舰船、重要建筑物等感兴趣军事目标。从评估目标来看，主要包括：

- 1) 陆上目标的打击效果评估；
- 2) 海上目标的打击效果评估；
- 3) 空中目标的打击效果评估。

从研究方法、手段来看，主要包括：

- 1) 基于光学图像的打击效果评估；
- 2) 基于遥感图像的打击效果评估；
- 3) 基于其他信息的打击效果评估。

目前，基于图像的打击效果评估技术主要包括光学图像的打击效果评估和 SAR 图像打击效

果评估两个方面，其评估的流程分别如图 1.1 和 1.2 所示^{[7][10]}。光学图像由于其高分辨率、高清晰度和符合人眼视觉特性等诸多优点，很早就应用于打击效果评估领域。合成孔径雷达由于其具有全天时、全天候，不受天气变化的影响等优点，极大的补充了光学和红外等图像的不足，使得 SAR 图像在打击效果评估领域有着良好的应用前景，也越来越受到各界的广泛关注。

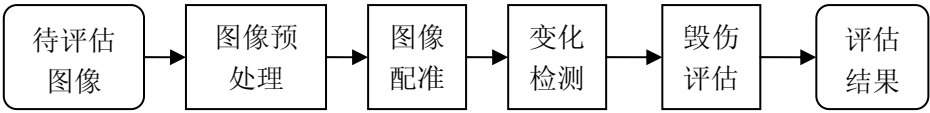


图 1.1 基于光学图像的打击效果评估流程

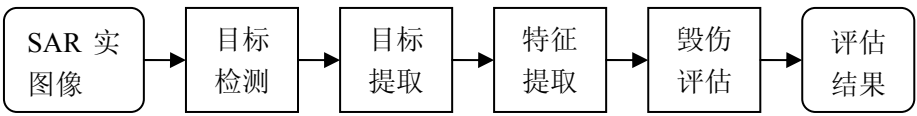


图 1.2 基于高分辨率 SAR 图像的打击效果评估流程

1.2.2 待解决的问题

打击效果评估技术与武器装备系统紧密相连，涵盖了雷达、卫星、图像处理以及其他的一些技术方法，美国在这方面的研究相对领先，国内的打击效果评估水平也在不断提升。随着科学技术的不断发展，新技术不断应用于军事领域，武器装备不断推陈出新，而原有的武器系统的性能也不断提升。因此，打击效果评估技术也必须随着军事技术的发展而不断改进、提高。目前，国内关于打击效果评估领域的研究，在人力和物力上都已经初具规模，并且取得了一定的成果。但是，这一领域无论是国外还是国内都存在一些亟待解决的关键问题：

一、在评估信息的收集方面，目前主要是通过侦察卫星、无人侦察机成像获得。军事侦察卫星要受到卫星过境时间限制，为了对打击目标进行侦察，决策者必须将对目标的攻击时间定为卫星能够覆盖整个战场的时间相同步，这样常常会错失良好的战机。同时当敌军计算好卫星过境时间时，会做好充分的战斗准备或者重要目标的隐藏。无人侦察机相对侦察卫星更为灵活。但是大多数无人侦察机成像清晰度低，使得后期的打击效果评估更加困难。另外，现在的一些新式武器能够准确击中目标内部的重要部位，使目标丧失功能，限于瘫痪状态或者被完全摧毁，但是在目标外部留下很少损伤的痕迹，使得基于图像的打击效果评估方法变得非常困难。并且，如何分辨敌方伪造的毁伤信息，也是打击效果评估在信息收集过程中的一大难点。同时，针对打击效果评估的研究工作，由于缺乏足够的打击后图像，使得打击效果评估研究进展缓慢。

二、在对图像信息的处理方面，打击效果评估技术需要结合许多具体的图像低层、中层的应用处理研究。例如图像预处理、配准、方位校正、变化检测、目标检测、图像分割、特征提取等。各个具体的图像处理技术可能已经很成熟，但是每项技术都有其具体应用领域或适用方

面。如图像的去噪处理包括光学图像、红外遥感图像、SAR 雷达图像的去噪，不同类型的图像去噪处理都有其不同的适用算法，其他图像的应用研究也具有上述问题。如何综合这些技术方法选择合适的处理技术为打击效果评估所用，并且保证评估系统对各种类型的图像信息都适用，成为基于图像理解的打击效果评估研究的重点和难点。

三、打击评估标准需要随武器系统性能的提高而改进更新。文献^[11]介绍的评估方法最终目标是找到目标被毁伤区域，其功能跟图像变化检测技术相近。文献^{[7][12]}则对建筑物遥感图像进行毁伤评估，并提供目标的毁伤数据结果给评估者，评估者通过数据分析目标的毁伤程度。文献^[2]对机场图像进行打击效果评估，评估结果要求指示被打击机场是否能够继续供飞机起降。可见，随着打击效果评估技术研究的不断深入，评估的结果也趋向于细化、合理，方便评估者的进一步分析研究。但是如何使得评估结果能够适用于一般的非专业的评估人员，使得操作者能够在短期内和不要求掌握评估技术内部细节的情况下很快熟悉评估系统的操作，分析评估结果，根据评估结果得到正确的目标毁伤情况信息，需要相关研究人员的进一步努力。

综上，虽然打击效果评估技术的研究随着各方的重视程度加大而不断深入，但是这一领域还存在着许多待解决的关键性问题，需要更多的人力和物力投入到这一领域的研究中来。

这里值得指出的是：SAR 是一种主动微波相干成像雷达，具有全天候、全天时、远距离和极强的穿透力等相对光学、红外遥感成像的优点，在军事侦查和监视中有着不可估量的应用价值。基于 SAR 图像的打击效果评估，由于其结合了 SAR 的这种全天时、全天候的优点，能够解决光学成像方式只能白天成像和受气候条件影响较大的限制，充分满足现代战争中打击效果评估的及时性要求，具有重要的研究意义。美国的“R/T BDA”项目就充分利用了 SAR 图像的优点，并结合其他信息进行打击效果评估。国内方面，北航的付文宪于 03 年提出了基于目标检测及特征对比的 SAR 图像打击效果评估方法，为 SAR 图像领域的打击效果评估研究起到了推动作用。

1.3 本文的主要研究工作

结合某国防预研项目，本文研究了关于 SAR 图像的一些基本应用处理方法，针对高分辨率 SAR 图像打击效果评估中图像处理及评估准则方面存在的一些问题展开工作。从 SAR 图像的处理方法和其实用性角度着手，通过仿真，解决了现有打击效果评估中缺乏打击后图像和 SAR 图像的困难。以此为基础，进一步对不同 SAR 系统获得的图像进行打击效果评估的算法研究，并设计实现了一个较为实用、准确的打击效果评估系统。具体研究内容包括以下几个方面：

一、打击效果仿真建模和 SAR 图像仿真研究。由于在打击效果评估研究中，能够获得的打击后图像资源极度缺乏，所能找到得也仅仅是网上泄露的几幅美军 90 年代以来在几场局部战争中拍摄到的打击后图像，无法满足打击效果评估研究的需求。本文通过分析战场目标毁伤效

果的特点,建立目标毁伤效果的仿真模型,并对打击效果仿真后的光学图像进行 SAR 图像仿真,得到相应的打击效果 SAR 仿真图像,进而为后续的打击效果评估研究提供素材,缓解打击效果评估研究对打击前后图片的大量需求和实际研究中严重缺乏真实打击图片之间的矛盾。

二、 基于图像理解的打击效果评估相关图像处理方法的研究。结合打击效果仿真和 SAR 图像仿真技术,设计了基于 SAR 图像的打击效果评估系统研究方案。根据方案,对图像配准、目标检测、变化检测、图像分割等相关图像处理技术做了深入研究。在对相关技术方法做出介绍后,充分分析了现有的基于目标特征对比的 SAR 图像打击效果评估方法存在的一些问题。

三、 SAR 图像打击效果评估算法研究。现有的 SAR 打击效果评估算法在基于面状人造目标的打击效果评估方面取得了很好的效果,能够比较准确的给出目标的毁伤结果。然而在对非面状或者较大的面状目标如机场 SAR 图像打击效果评估方面还有待进一步研究。本文研究了基于变化检测的 SAR 图像打击效果评估方法。在不能通过图像分割提取目标区域的情况下,仍能较为准确的评估出目标的毁伤情况。

四、SAR 图像打击效果评估系统的设计实现。根据软件设计和使用的实际情况,将打击效果仿真、SAR 图像仿真、图像配准和打击效果评估四个模块集成为“打击效果评估系统”。并通过与数据库的图像检索功能接合,实现在海量图像中根据打击前或者打击后图像迅速检索到对应的打击后或者打击前图像,作进一步的打击效果评估。

第二章 打击效果仿真及 SAR 图像仿真

基于高分辨率 SAR 图像的打击效果评估研究中,最理想的情况是目标区域打击前后的 SAR 图像同时存在。实际研究中则主要存在以下几种情况:

- 一、打击前后目标区域 SAR 图像都存在。
- 二、存在同一目标区域不同成像时间、不同成像系统获得的两幅打击前 SAR 图像。这种情况下需要对其中一幅 SAR 图像进行打击效果仿真。
- 三、存在同一目标区域的一幅光学图像和一幅 SAR 图像。这种情况下则需要对光学图像进行 SAR 图像仿真。如果两幅图像均为打击前图像,需要进一步对其中一幅图像做打击效果仿真。
- 四、存在同一目标区域的两幅打击前光学图像。这种情况下可以直接进行基于光学图像的打击效果评估,或者在 SAR 图像仿真和打击效果仿真之后,进行基于 SAR 图像的打击效果评估。

因此,本章针对已有的光学图像、SAR 图像进行打击效果仿真研究,以适用于后续的高分辨率 SAR 图像打击效果评估。

2.1 打击效果仿真

目前,关于打击效果评估的研究主要是基于仿真图像和实测图像数据两个方面。文献^[11]利用 Irma 软件仿真得到打击前后的激光雷达图像。文献^[7]通过对 SAR 图像中的建筑物进行人工处理,得到毁伤后的 SAR 图像,进而对打击效果进行评估。这两种仿真方法都能够为评估算法的研究提供实验数据。但是这种实验数据相对于其他研究者来说一般是不可重现的,不利于对比研究,而且在实验数据需求量较大的情况下,仿真工作非常耗时。文献^[12]则是通过网络搜索得到少量美军在近几年的几场局部战争中拍摄到的打击效果图像。利用这些图像同样可以进行打击效果评估,但是由于其实验数据太少,对于评估算法的鲁棒性和适用范围方面无法验证,其设计的评估算法在面对新数据时可能失效。

因此,本文从计算机图形学的角度出发,提出适用于战场毁伤效果的打击效果仿真算法。

2.1.1 打击效果仿真需要解决的问题

打击效果仿真技术需要考虑弹药的威力,弹药的毁伤效果和被打击目标的材质情况。不同类型的弹药其威力和毁伤效果均不相同,而同一类型的弹药打击在不同材质构造的目标上造成的毁伤效果也不相同。因此,打击效果仿真技术的研究,需要结合各种类型弹药对不同材质目

标的实际毁伤效果，通过毁伤的实际数据设计仿真算法。即，打击效果仿真算法应当针对特定类型的弹药而言的，每种弹药都有其对应的打击效果仿真算法。

可见，打击效果仿真技术涵盖了图像处理、爆破学、武器弹药学和材料物理等多门学科知识，仿真算法的研究工作是一项巨大的工程，在短期内存在着无法解决的难题。首先，弹药的毁伤效果图片及其他毁伤数据资料由于保密性的原因并不公开。其次打击效果图像的获取是一个长期累积的过程。在现有条件下，针对打击效果仿真和打击效果评估研究，专门在某一时段、某一区域，进行目标轰炸，并获取打击效果图像，其代价过于昂贵。为了最优化利用各项资源，一般每次飞行包括了打击效果评估在内的几个甚至几十个实验项目及其他任务。这些问题的存在，使得打击效果仿真和打击效果评估研究都非常困难。

根据打击效果仿真技术目前的研究现状，本文目的为设计一个可以模拟毁伤效果的仿真算法，仿真结果要能够作为打击效果评估的研究素材，在视觉上也要具有一定的真实性。基于这两点要求，本文对目标被打击后的毁伤效果情况做出分析，通过弹药打击等级和目标材质等级简化弹药和目标的类型。目标被打击后，其毁伤分布情况如图 2.1 所示。对图 2.1 有以下两点说明：

1) 打击中心点的毁伤最严重，离打击中心越远，毁伤越轻，超过一定范围后，毁伤可以忽略不计。

2) 毁伤分布曲线给出的是毁伤的总体分布，反映的是离打击中心不同距离的毁伤的平均情况，在离打击中心相同的距离上的实际毁伤情况是随机的。

这两点保证了仿真结果具有一定的可信性和随机性。本文主要通过控制碎片的数量、分布、大小和灰度变化来模拟目标区域被打击后的毁伤效果。具体方法为：通过建立碎片分布模型来控制毁伤的总体分布，保证分布情况符合图 2.1 的第一点说明；提出碎片形状生成算法并建立灰度变化模型使得碎片的形状、大小、灰度变化都随机，即保证具体某点的毁伤情况符合图 2.1 的第二点说明；并且，每个模型都受到仿真参数的控制。

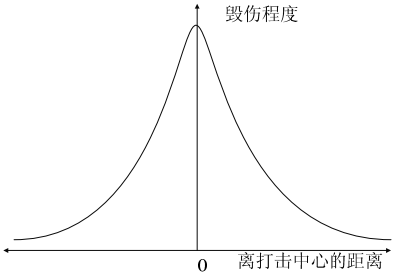


图 2.1 毁伤程度分布

因此，进行打击效果仿真必须要考虑和解决以下几个问题：（1）仿真参数；（2）碎片分布；（3）碎片形状；（4）碎片灰度变化。

2.1.2 打击效果仿真算法

2.1.2.1 仿真参数：毁伤程度

仿真参数包括弹药威力和目标材质。

目标受弹药打击后产生的外形变化，反映在图像中即为目标区域及目标周围像素的灰度改变。这种灰度变化应该受到弹药威力的影响，不同当量级、不同类型的弹药所造成的毁伤程度不同。

打击目标的材质不同，对应的毁伤效果也不一样。田野等泥土材质的目标（实际作战中，泥质建筑成为目标的可能性很小）为粉碎性毁伤。弹药在目标区域爆炸形成近似圆形的弹坑，弹坑大小与弹药威力有关。混凝土结构的目标是碎和裂两种毁伤效果的组合，即碎裂毁伤。毁伤效果表现为：在打击中心区域内产生粉碎性毁伤，像素的灰度变化各自独立，灰度变化的剧烈程度与弹药威力有关；在打击中心区域外产生大量围绕打击中心随机分布的碎片，碎片的大小及其灰度变化的剧烈程度与弹药威力及该碎片到打击中心的距离有关。金属结构的目标受打击后会产生形变毁伤，毁伤效果表现为在打击中心的金属区产生一定程度的形变，而在非金属区，则产生前述的碎裂毁伤效果。

同一材质的目标，由于原料构造、建筑方式和使用时间不同，其抗打击能力也不相同。

本文主要对混凝土等碎裂毁伤的目标的打击效果进行仿真。根据目标场景被打击后的物理特性，综合弹药威力和目标材质，可以得到打击仿真的参数，即毁伤程度 σ 。毁伤程度应当与弹药威力成正比，即弹药威力越大，毁伤越严重；与目标材质成反比，即目标材质越坚固，毁伤越轻。如式(2-1)所示：

$$\sigma = l_{hit} / l_{res} \quad (2-1)$$

其中 l_{hit} 是打击等级，即弹药威力等级， l_{res} 是目标材质等级。

2.1.2.2 碎片中心分布模型

从物理学的角度来看，毁伤即是目标在炸药爆炸产生的急剧压力突变情况下解体成大量碎片的过程，每个碎片在爆炸产生的能量作用下偏离原位置，形成以打击点为中心向外逐渐扩散的某种随机分布。

在一幅待打击仿真的图像中，碎片分布位置应该遵循以下三点：(1)具有随机性；(2)受打击威力控制；(3)与碎片到打击中心的距离有关。具体表述为：在某点是否有碎片为一概率事件，服从两点分布；离打击中心愈近的点，该点是碎片中心的概率愈大，离打击中心点愈远，该点是碎片中心的概率愈小；毁伤程度越大，成为碎片的点数越多；毁伤程度越小，成为碎片的点数越少。

本文设定图像中每个点都有相应的状态，形成状态矩阵 X ， X 中的每个元素 $X(i, j)$ 的状

态属于状态集 $\{0,1\}$ 。当某点的状态为 0 时，表示该点不是碎片；当某点的状态为 1 时，表示该点是碎片，参与后续的碎片生成。公式（2-2）和公式（2-3）给出了确定图像中每点状态的方法。具体为：

$X(i, j)$ 为图像中 (i, j) 点的状态， $X(i, j)=1$ 表示 (i, j) 点为碎片中心， $X(i, j)=0$ 表示 (i, j) 点非碎片中心。 $X(i, j)$ 的值由式(2-2)确定。

$$X(i, j)=1-INT[rand+1-p(i, j)] \quad (2-2)$$

其中 $rand$ 是一个随机数生成器，产生 0 到 1 之间的一个随机数； INT 是取整符号； $p(i, j)$ 为事件 $X(i, j)=1$ 的概率，与 (i, j) 点到打击中心的距离及毁伤程度相关，为一高斯函数。如式(2-3)所示：

$$p(i, j)=\exp\left(\frac{-R(i, j)^2}{k \cdot \sigma}\right) \quad (2-3)$$

其中 $R(i, j)$ 为 (i, j) 点到打击中心的距离， σ 为毁伤程度，参数 k 用来调节 $p(i, j)$ 的曲线分布，其大小决定了碎片数量和碎片分布密度。本文取 $k=1500$ 。

图 2.2 为打击等级 1 级目标材质等级 2 级的碎片中心分布图。图中黑点表示此点为碎片，在矩阵 X 中标记为 1。可以看到，碎片分布基本满足本节开始时提出的三点要求，并且在打击中心附近的碎片非常密集。

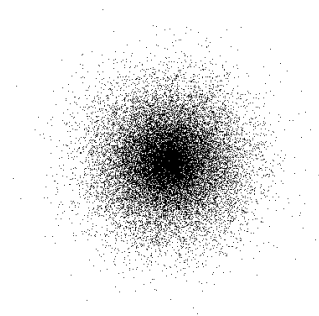


图 2.2 碎片中心分布图

2.1.2.3 碎片形状模型

在得到碎片分布矩阵 X 后，遍历 X 中所有元素，对状态为 1 的点进行碎片生成，形成大小形状都随机的碎片。

文献^[13]通过实验指出，岩体爆破后的矿块碎片在照片上的投影形状基本为三角形、四边形和五边形，并且在实验所记录的 168 个矿块投影中，四边形占 80.36%。因此，本文通过外接矩形法生成随机四边形和三角形。方法为在一个大小随机的矩形每个边随机选取一点，连接四点，形成碎片。当矩形相邻两边的随机点同时选中两边的交点时，碎片是三角形。具体的碎片生成步骤如下：

- 1) 根据毁伤程度和碎片到打击中心的距离, 确定给定点处碎片的外接矩形大小。本文设定外接矩形的面积 S 服从正态分布 N , 即:

$$S \sim N(u_s, \sigma) \quad (2-4)$$

u_s 为 S 的均值, 且设定: $u_s = r$ 。

- 2) 根据 S 随机确定矩形的一个边长 a , 再由 S/a 得到矩形的另一边长 b 。这里假定 a, b 倾向于相等, 即矩形倾向于正方形。即 a 服从正态分布, 均值为 \sqrt{S} , 方差与毁伤程度有关, 本文取 0.5σ 。
- 3) 在边长为 a, b 的矩形的每个边上随机选取 1 个点, 得到四个随机点。
- 4) 采用计算机图形学中的数值微分直线生成法^[14]连接四个点。

2.1.2.4 碎片灰度变化模型

在图像中, 碎片作为一个小的整体, 是由部分相邻像素组合而成的, 其形状由像素点的组合方式决定。爆炸前所有碎片紧密组合形成目标, 爆炸后目标分解, 形成上述的碎片分布。

每个碎片的反射面相对于入射波的角度不同, 其反射强度不同。碎片内部灰度值的改变可以理解为碎片反射面相对于原反射面发生改变, 变化的剧烈程度与毁伤程度及碎片离打击中心的距离有关。某次打击的毁伤程度越大, 碎片离打击中心的距离越近, 其灰度变化就越剧烈; 毁伤程度越小, 碎片离打击中心越远, 其灰度变化就越小。需要注意的是, 碎片内部各点之间的灰度相对不变。

本文通过均匀分布^[15] U 取随机数的方法来描述碎片灰度变化的结果, 如式 (2-5) 所示,

$$I'(i, j) \sim U(m, n) \quad (2-5)$$

式中 $I'(i, j)$ 为打击后碎片中心点灰度值, (m, n) 为 $I'(i, j)$ 的取值范围, m, n 的大小由式 (2-6)、(2-7) 确定。式 (2-6)、(2-7) 中 v 为调节变化范围的参数, 受毁伤程度和碎片中心到打击中心的距离控制。 v 的变化函数如式 (2-8) 所示。式中参数 k_1 用来调节 v 的大小, 也即间接调节 $I'(i, j)$ 的取值范围。 k_1 的取值过大, 会使得毁伤区域大部分点的灰度变化都在 (0, 255) 范围内, 导致碎片的灰度变化剧烈程度与距离有关的条件失效; k_1 的取值过小, 则使得碎片的灰度变化较小甚至不变, 打击仿真效果不明显。综合以上两点, 经过实验证明, k_1 取值在 100 到 200 之间仿真效果较佳。本文取 $k_1 = 150$ 。

$$m = I(i, j) - v \quad (2-6)$$

$$n = I(i, j) + v \quad (2-7)$$

$$v = k_1 \cdot \sigma^2 / r \quad (2-8)$$

由于内部各点之间的灰度相对不变, 可以直接考虑碎片中心点的灰度变化, 再将其变化量赋给其他点。

2.1.2.5 算法优化及仿真结果修正

经过前几节的处理，已经可以得到初步的仿真结果，但是仍需对算法做进一步的优化，减少仿真时间，并对初步仿真结果做修正，得到最终的打击仿真图像。

如图 2.2 图所示，在打击中心附近，碎片中心点非常密，基本上每个点都是碎片中心。因此在仿真实现时，可以设定阈值 T ，对于距打击中心小于 T 的点直接进行灰度变化，而不作碎片生成。这种处理方法不但缩短了仿真时间，而且完全不影响最后的打击效果。

阈值 T 的选取与图像分辨率、毁伤程度及目标大小相关。阈值 T 选择过大，会出现明显的圆形分界，导致仿真失实；阈值 T 选择过小，则会增大计算量，提高仿真时间。因此，仿真前应粗略估计产生粉碎性毁伤的区域大小，进而选择相应的阈值 T 。一般 T 值取 5 到 15 范围内效果较理想。本文实验中取 $T = 8$ 。

在计算完整个图像中所有碎片的新灰度后，部分点的灰度超出了 $(0, 255)$ 的范围，必须进行灰度调整，将得到的新图像灰度值限定在 0 到 255 范围内。如果 $I'(i, j) > 255$ ，令 $I'(i, j) = 255$ ；如果 $I'(i, j) < 0$ ，令 $I'(i, j) = 0$ 。最后显示打击仿真图像。

到此即完成了打击效果仿真的算法设计。如果仿真对象为 SAR 图像，则仿真结束；如果仿真对象为光学图像，则需要进一步的 SAR 图像仿真。

2.1.3 打击效果仿真技术标准的探讨

由于打击效果评估研究是近年来刚刚兴起的一个研究领域，打击效果仿真技术的研究是基于打击效果评估的技术需求而出现的，相关研究也才刚刚起步。本文在提出打击效果仿真算法的同时，对仿真方法的技术标准也做出探讨。

基于图像的打击效果仿真技术主要包括打击等级和目标材质等级两个仿真参数标准的确定：

1) 打击等级标准的确定

弹药的类型不同，其打击目的、打击威力及打击效果均不相同。将一枚“战斧”巡航导弹装上常规弹头和装上核弹头相比，其打击威力和打击效果截然不同。打击目标的部位不同，造成目标的毁伤程度也不相同。如导弹命中目标与否对目标造成的毁伤程度截然不同。即使命中目标，命中目标的部位不同，对目标造成的毁伤程度也不相同。因此，单一的仿真算法无法对每种弹药的毁伤效果都进行仿真，必须确立打击等级的参数标准，保证仿真技术具有普适性。

文献[3]指出，目标的毁伤程度可以分为 5 级，即：无毁伤、轻微毁伤、中度毁伤、严重毁伤和完全毁伤。为保证各级毁伤效果均能仿真实现，根据弹药的打击威力和目标的毁伤程度标准，本文将打击等级标准定为 5 级，与目标毁伤程度的划分标准相对应。1 级为最低打击，5 级最高打击。

2) 目标材质等级标准的确定

根据打击效果仿真算法中对目标材质的分析,对于同一材质的目标,构造方式,使用时间不同,其抗打击能力均不相同。我国的《混凝土结构设计规范》规定混凝土的强度分为 14 个等级,各等级的强度不同。但是混凝土等级标准是针对建筑设计制定的,并不适用于打击效果仿真领域。同理,金属和泥土也存在强度问题,不同金属的金属强度不同,不同土质的泥土其强度也不相同。本文综合以上三种材质特性,初步将目标材质等级标准定为 3 级,1 级材质抗打击能力最弱,3 级材质抗打击能力最强。

以上标准是根据仿真效果所做的初步设定,旨在为打击效果评估研究提供毁伤效果图。在打击效果评估研究的后期,随着真实打击后图像资源的大量积累以及毁伤评估研究的深入,会根据实际毁伤图像的打击效果对之前设定的仿真参数标准和仿真算法做进一步的修正和改进。

2.2 SAR 图像仿真

2.2.1 SAR 成像原理

合成孔径雷达系统通过向观测地带发射电磁波,然后接收观察地域反射的回波信号,根据这些回波信号计算得到观测带地表各散射单元的雷达后向散射系数,并按照它们各自的距离—方位位置进行显示。只有真实的反映出这些散射系数的特征,所成的合成孔径雷达图像才有意义。如果用 x 表示方位向的位置, y 表示距离向的位置,合成孔径雷达图像用 $\sigma_0(x, y)$ 表示,回波信号地表各散射单元的雷达后向散射系数用 $\sigma(x, y)$ 表示,则 SAR 成像系统相当于一个冲激响应函数 $h(x, y)$ 。整个成像过程可以表示为:

$$\sigma_0(x, y) = \sigma(x, y) \otimes h(x, y) \quad (2-9)$$

这样 SAR 成像问题可认为是已知系统的输出和系统的响应函数来求解系统输入的求逆问题,即根据具体的 SAR 信号模型和成像算法的实现来精确的获得该 SAR 系统的系统响应函数。实际处理中,采用对 SAR 回波信号进行距离和方位两个方向上进行匹配滤波,可以精确测定固定目标的距离和方位,从而获取分辨率很高的二维地貌图像。

2.2.2 SAR 图像仿真一般方法

SAR 图像仿真根据不同的划分方法有不同的分类。

从仿真方法的角度看,可以分为^[16,17]: 1、基于回波成像原始信号的模拟; 2、基于成像模型的功能模拟; 3、基于图像的模拟。

第一种方法是从雷达成像的原理出发,根据回波模型求取地物目标每个雷达可分辨单元的回波信号,而后经过 SAR 成像算法获得模拟目标或区域的 SAR 图像。这种模拟方法,能够真实地还原出 SAR 成像的过程,便于进一步深入挖掘和利用图像数据进行 SAR 全系统的设计和

验证^[18]。

第二种方法，即基于成像模型的功能模拟，是利用 SAR 几何成像模型，和适当的后向散射模型获得地面的雷达截面模拟图。其中 SAR 成像的几何模型是通过距离方程和多普勒方程的联立求解获得的，解这个方程组后就可以实现 DEM 上的点与图像上的像素之间的对应关系^[19]。为了使模拟图像更加真实，也需要为雷达截面图添加乘性噪声。这种模拟的主要目的是模拟 SAR 图像的几何特征和辐射特征，中间过程不需要回波信号的模拟。

第三种方法，即基于图像的模拟，常常被认为是第二种模拟方法的子类，它是利用一幅真实 SAR 图像的后向散射系数信息模拟其他成像参数下的图像^[20,21]。

从仿真对象的角度看，可以分为^[22]：1、基于点目标、多点目标的 SAR 图像仿真；2、基于目标三维模型的 SAR 图像仿真；3、基于复杂场景的 SAR 图像仿真。本文根据这种分类方法进行讨论，并主要研究了基于复杂场景的 SAR 图像仿真方法。

点目标、多点目标的成像仿真

SAR 的点目标模拟是 SAR 系统设计、验证、及成像算法结果分析的一个关键步骤，是多点目标与分布式目标模拟的基础。要对点目标进行仿真，需要在 SAR 的成像机理的基础上，对点目标进行模拟，得到点目标的模拟数据，再对该数据进行成像处理，得到点目标的成像结果。要对点目标进行模拟，则必须结合具体的 SAR 系统的参数，参数的确定对点目标模拟非常重要。

多点目标成像仿真是对点目标成像仿真的扩展，它基于点目标仿真，但是在成像仿真中要考虑到不同距离波门中点的成像，因此具有一定的复杂性。多点目标成像仿真方法通常用来验证、分析成像算法，通过成像前后每个点目标的成像结果，点目标间的相对位置变化对成像算法进行修正，改进。因此，多点目标的成像仿真是 SAR 图像仿真研究中非常重要的一个方面。

文献[22]根据 SAR 回波信号模型，通过对点目标的具体分析，完成了点目标回波信号的数据模拟，根据回波信号得到仿真成像结果。并且在点目标仿真的基础上，给出了多点目标的回波信号的具体分析和成像的方法流程。

基于目标三维模型的成像仿真

相对于点目标及点阵目标仿真，实现二维及三维目标的原始数据仿真时，数据处理过程是复杂的，而且需要在保证计算效率和目标形状描述精度的情况下，考虑如何建立目标的三维模型。主要的建模对象包括军事目标的三维模型和自然场景的三维模型。

军事目标的建模和 SAR 图像仿真研究，由于其特殊的国防背景影响和支持，一直是 SAR 图像仿真研究中的热点和前沿。主要包括对飞机、坦克、舰船、航母等的建模和 SAR 图像仿真研究。

自然场景同固定的人造目标相比，具有复杂多变的特点，无法用一般的建模方法模拟出其多变和随机的特性。目前国内的文献中，关于自然地形背景的 SAR 图像仿真研究，主要是建立

在已获得真实地形数据基础上进行的^[23-28]，例如对这些数据作分形插值后进行图像仿真。文献[22]则采用分形的方法对典型地形的自然场景进行建模，得到其后向散射系数图，对后向散射系数图进行相干斑噪声仿真，再进行回波模拟和成像处理，得到仿真 SAR 图像。但是，其得到的地形是满足某种特殊要求下的随机地形。

基于复杂场景的 SAR 图像仿真

SAR 图像不仅仅局限于军事目标和典型的地形地貌，如城市区域 SAR 图像，机场 SAR 图像等。一般 SAR 图像反映的是复杂场景地域的后向散射系数的分布。对于具体某一区域来说，其场景的后向散射系数分布是未知的，无法直接对该区域进行 SAR 图像仿真。因此，基于复杂场景的 SAR 图像仿真具有其现实意义和应用价值。

2.2.3 基于复杂场景的 SAR 图像仿真

点目标、多点目标的 SAR 图像仿真是成像算法研究的重要基础。军事目标模型和典型地形模型的 SAR 图像仿真方法为进一步开展基于模型的目标识别研究提供基础，另外对 SAR 系统的设计及性能分析也具有重要的参考意义。

但是，在复杂场景 SAR 图像仿真情况下，后向散射系数的二维分布是由各种不同目标和背景的散射系数组合而成的，使得基于点目标的 SAR 图像仿真方法和基于目标三维模型的 SAR 图像仿真方法失效。因此，本文根据复杂场景后向散射系数的二维分布仿真对应的 SAR 图像。仿真中的关键问题可以归结为以下三点：1、场景后向散射系数的模拟；2、SAR 图像相干斑噪声的仿真；3、SAR 图像分辨率的计算。

一、后向散射系数分布

一般情况下，后向散射系数模拟仿真技术主要有三种：（1）根据目标的电磁特性和几何属性直接求得后向散射系数；（2）根据实验测得的经验公式和目标的几何属性，求取目标的后向散射系数，其中的经验公式是指局部入射角和后向散射系数的关系；（3）根据实际 SAR 图像的统计特性，分析其对应的后向散射系数的统计分布特征，并进行随机采样求得后向散射系数。这三种求解方法视具体目标不同而各不相同。

基于特定军事目标的三维模型 SAR 图像仿真，可以根据第一种和第二种方法求得其对应的后向散射系数。基于典型地形地貌目标的 SAR 图像仿真，可以根据第三种方法求得对应的后向散射系数，也可以通过分形的方法对典型地形地貌进行三维建模，仿真得到对应的后向散射系数。

可惜的是，这三种方法均不能得到复杂场景的后向散射系数分布图。在复杂场景情况下，通过经验公式、目标几何属性、目标电磁特性的方式获得场景内每个目标，每种物质的后向散射系数，这种方式工作量太大，明显不可取。目前，各种重要的军事目标的电磁特性、几何属

性以及实测经验公式的研究是 SAR 图像仿真研究领域的一个重要方面,而对于其他目标的相关研究则是一项耗时耗力的工程。根据 SAR 图像统计特性或者地形分形建模的方法可以得到典型的随机地形的后向散射系数^[22],但是无法与真实复杂场景的后向散射系数对应。可见,通过以上三种方式均不能获得复杂场景的后向散射系数分布图。

基于项目的迫切需求(仿真复杂场景的 SAR 图像以供后续打击效果评估研究使用)和问题的实际难度,本文采取了一个折中的方式:将复杂场景区域的光学图像经过适当的调整近似作为该区域的后向散射系数分布图。由于光学图像和 SAR 图像的成像方式存在显著的不同,同一目标在 SAR 图像中的灰度值反映了其电磁后向散射系数的大小,而在光学图像中表示的是其对光波的反射强度。因此,在仿真前,需要根据主要目标的电磁后向散射特性与光学反射特性的不同,对待仿真的光学图像中的主要目标用经验灰度值进行修正,实现光学图像到复杂场景电磁后向散射系数分布的映射,为进一步的 SAR 仿真做准备。待修正的主要目标是机场跑道和金属等。由于机场跑道在 SAR 成像过程中存在镜面反射现象,使得其在 SAR 图像中的灰度相对于其他的目标和背景较低,呈灰黑色。而在光学图像中,机场跑道一般为亮白色区域。因此,在成像仿真前,需要将机场跑道区域校正为灰度较低的区域。同理,金属目标由于其较强的电磁后向散射系数,使得其在 SAR 图像中成为强散射目标,灰度值较大。而在光学图像中,金属目标的灰度值是根据其外部所涂的颜色决定,SAR 成像仿真前也需要对其做出修正。

本文采用的修正方法为区域增长法^[29]。区域生长是指从某个像素出发,按照一定的准则,逐步加入邻近像素,当满足一定的条件时,区域生长终止。光学图像中待修正的目标一般都是具有一定大小的面目标,目标内区域与目标外区域的灰度值差别较大。因此,通过在待修正的区域内选择一个初始种子点,给出生长准则(比如:与该点灰度差别不大于 20)以及修正后的经验灰度值(比如:机场跑道的灰度值可以选择 0~50 之间,而金属目标建议选择 200 左右),即可得到待仿真场景对应的近似电磁后向散射系数分布。

根据 SAR 成像原理可知,SAR 图像为 SAR 成像系统的冲击响应函数与场景后向散射系数分布的卷积,如式(2-9)所示。当 $h(x, y) = \delta(x, y)$ 时, $\sigma_0(x, y) = \sigma(x, y)$ 。即,只有当 $h(x, y)$ 为 δ 函数时,雷达图像才是场景后向散射系数的正确复现。合成孔径雷达系统的设计正是为了使其系统函数 $h(x, y)$ 尽可能接近 δ 函数,以使得雷达图像尽可能逼真地反映场景后向散射系数的真实情况。

从这个角度来看,通过对光学图像中的主要目标区域的灰度修正,得到复杂场景区域的近似后向散射系数分布,即已经得到仿真结果 SAR 图像。但是,由于 SAR 的相干成像原理,为了使得仿真图像与真实图像相似,对于复杂场景区域的 SAR 图像仿真,还需要考虑到相干斑噪声的仿真及 SAR 图像的分辨率因素。

二、图像相干斑噪声产生机理^[22]

相干斑噪声的产生机理是：由于入射波长远小于雷达分辨单元的尺寸，因此在一个雷达分辨单元中是存在多个散射点，如图 2.3 所示。从而雷达发射的相干电磁波在这些散射点之间发生相长或相消干涉，造成整个分辨单元内散射系数的随机起伏，这种随机起伏反映在 SAR 图像就是相干斑噪声。真实 SAR 图像中都存在着相干斑噪声的影响。相干斑噪声一方面严重影响了 SAR 图像的质量和分辨率，另一方面又是 SAR 图像的固有特征，因此相干斑噪声的仿真具有其现实意义。

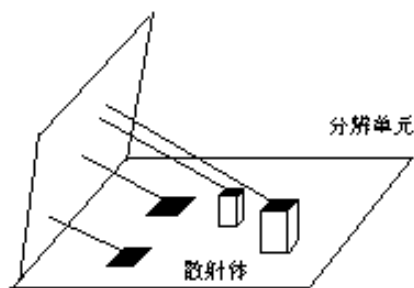


图 2.3 分辨单元中的散射体示意图

相干斑噪声仿真方法一般为：在一个雷达分辨单元中模拟出多个点散射单元，再将这多个散射单元随机分布于分辨单元上进行矢量叠加。本文结合复杂场景 SAR 图像仿真的实际情况，根据相干斑噪声产生机理，仿真相干斑噪声。具体仿真方法为：

在后向散射系数分布矩阵中加入随机相位信息，模拟散射单元反射的回波信号矢量叠加后产生的相位改变，得到包含相位信息的后向散射系数分布。如式（2-10）所示

$$\sigma'(x, y) = \sigma(x, y) \exp(j\theta) \quad (2-10)$$

其中 $\sigma'(x, y)$ 是包含相位信息的雷达复图像， θ 为 (x, y) 点对应的随机相位。通过对雷达复图像 $\sigma'(x, y)$ 进行低通滤波后，提取滤波结果的幅度信息，即得到了对应 SAR 图像仿真结果。而低通滤波器的带宽选择则跟 SAR 图像和仿真前光学图像的分辨率有关。

三、SAR 图像分辨率

由于 SAR 图像相对于光学图像来说，其分辨率较低。而对 SAR 图像的打击效果评估，最好是在相同分辨率情况下进行。因此，需要降低光学图像的分辨率。

图像高频主要反映图像的细节，图像低频则主要反映图像的轮廓特征。对图像做低通滤波处理能够滤除图像的高频信息，保留图像的低频信息，即保留了图像的轮廓特征，使图像变模糊，也即降低了图像的分辨率。这里需要考虑的一个问题是：光学图像分辨率、SAR 图像分辨率与低通滤波器的关系。本文通过实验仿真的方法，得到式（2-11）：

$$\frac{\omega}{h \times w} = \frac{1}{(o_{res} / s_{res} + 2) / 3} \quad (2-11)$$

其中 ϖ 为二维低通滤波器带宽， h 为光学图像高度， w 为光学图像宽度， o_{res} 为光学图像的分辨率， s_{res} 为仿真结果所需要的 SAR 图像分辨率。在已知光学图像分辨率和仿真所需要的 SAR 图像分辨率的情况下，就可以得到低通滤波器的带宽。随后对具有随机相位信息的雷达复图像 $\sigma'(x, y)$ 做带宽为 ϖ 的低通滤波操作，即可得到仿真结果 SAR 图像。

为了后续的系统设计与实现的方便，在式 (2-11) 中，令

$$o_{res} / s_{res} = b \tag{2-12}$$

其中 b 为图像的模糊比参数。在对仿真结果 SAR 图像的分辨率没有要求的情况下，通过引入图像模糊比参数 b ，也可以得到仿真 SAR 图像。

2.3 实验结果及分析

2.3.1 打击效果仿真实验及结果分析

根据第 2.1 节打击效果仿真的算法描述，打击效果仿真实验主要由三个模块组成：第一个模块为碎片位置分布；第二个模块为碎片形状生成；第三个模块为碎片灰度变化。如图 2.4 所示。

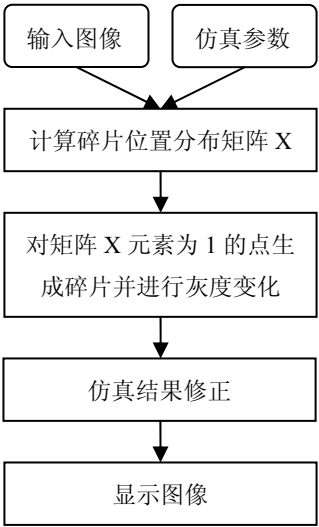


图 2.4 打击效果仿真流程

根据打击效果仿真流程，本文以 Microsoft Visual C++ 6.0 为实验平台，分别对机场跑道光学图像和建筑物 SAR 图像进行打击效果仿真。图 2.5 为对某机场跑道的光学图像进行不同打击等级 2 级目标材质等级的打击效果仿真结果图。其中图 (a) 为某机场局部跑道的原始光学图像，图 (b) 和图 (c) 为该机场跑道光学图像的 2 级和 3 级打击效果。图 2.6 为对建筑物的真实 SAR 图像进行 1 级、2 级、3 级打击，目标材质等级 1 级的打击效果仿真结果。其中图 (a) 为原始 SAR 图像，图 (b) 为 1 级打击仿真结果图，图 (c) 为 2 级打击结果图，图 (d) 为 3 级打击

结果图。



图 2.5 光学机场图像的打击效果仿真

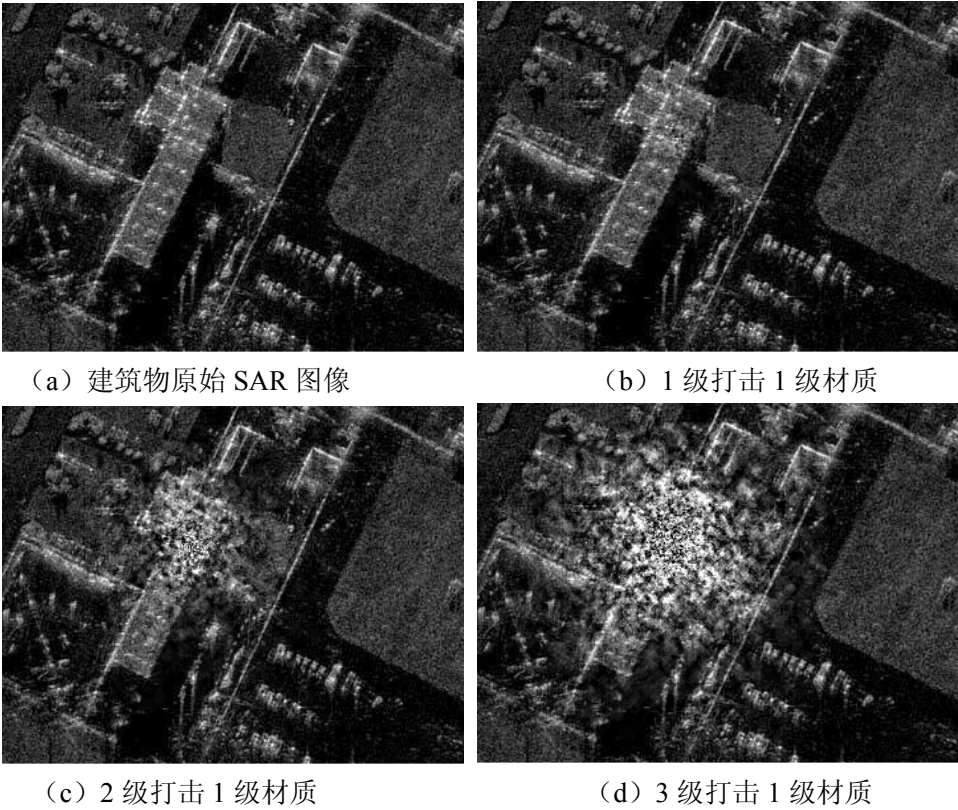


图 2.6 SAR 图像建筑物目标的打击效果仿真

由实验结果可见，不同打击等级对建筑物造成的毁伤程度不同。打击不但造成了建筑物的几何畸变，而且改变了毁伤区域的纹理特征。毁伤效果符合要求，且目视效果逼真。图 2.7 为对图 2.6 的 c 图和 a 图作差值的三维图。可以明显的看出，毁伤的总体分布为从打击中心向外围逐渐减弱，而具体的毁伤变化情况则是随机的。完全符合 2.1.1 节的关于毁伤分布图的两点解释。

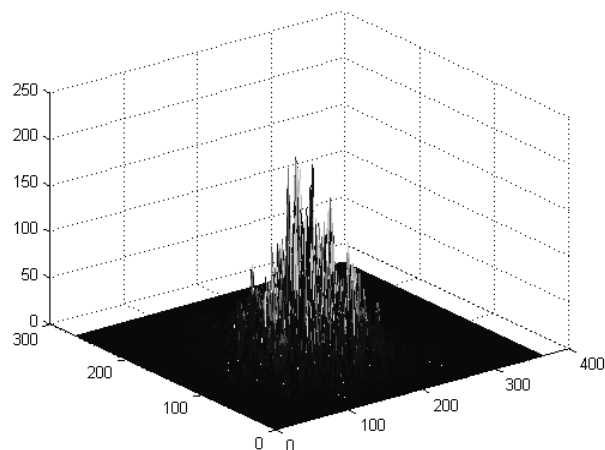


图 2.7 仿真前后差值结果图

在打击效果仿真过程中，还需要注意以下两点：

1) 待打击仿真的图像必须具有较高的分辨率，以达到打击仿真的效果。待仿真图像分辨率不同，其每个像素对应的实际目标尺寸不同。对于分辨率较低的图像，几个像素即代表了打击目标的整个区域。这种情况下打击仿真算法失效。

2) 在实际仿真过程中，只关心图像中的目标区域的仿真结果，对距离目标区域较远的毁伤情况可以忽略。而且图像非常大的情况下，对整幅图进行打击仿真耗时却意义不大。本文在实验仿真过程中只选取待打击仿真的目标区域，仿真算法只对选中区域的图像数据进行打击仿真。

2.3.2 SAR 图像仿真实验及结果分析

根据 2.2 节的 SAR 图像仿真算法分析，SAR 图像仿真的程序流程为：

(1) 图像预处理。通过区域生长算法，对图像中的主要目标（如机场跑道，重要金属目标等）根据其对雷达电磁波的散射强度大小(或者其在 SAR 图像中的灰度特性)进行相应的灰度调整。

(2) 图像模糊比计算。这里的图像模糊比计算，可以根据 SAR 图像仿真结果图的分辨率要求，分为以下几种情况：

- i. 不需要知道仿真 SAR 图像的分辨率。这种情况下，可以程序设置默认的图像模糊比。根据默认图像模糊比确定滤波器的带宽，通过低通滤波，降低光学图像（或复杂场景后向散射系数分布修正结果图）的分辨率。
- ii. 要求 SAR 图像分辨率为某个确定值。如果待仿真的光学图像分辨率已知，则可以根据式 (2-12) 求得图像模糊比。如果待仿真光学图像的分辨率未知，则必须计算光学图像的分辨率，再根据式 (2-12) 得到图像模糊比。其中计算光学图像分辨率的方法为：选中光学图像中的某个目标，根据该目标在图像中所占像素的长宽，并结合其实际长

宽的估计值，根据式（2-13）得到光学图像的分辨率。

$$o_{res} = \sqrt{(h/h_1) \cdot (w/w_1)/1.3} \quad (2-13)$$

其中， h 、 w 分别为真实目标的宽度和长度， h_1 、 w_1 分别为图像中目标所占像素的宽度和长度。

（3）相干斑噪声仿真。根据式（2-10）对预处理结果中的每个点都加入随机相位信息，得到复雷达图像。

（4）降低分辨率。在第（2）步操作中已经得到了图像模糊比，根据式（2-11）计算得到二维低通滤波器的带宽，对预处理结果图进行低通滤波，即得到了仿真结果 SAR 图像。

实验的具体流程如图 2.8 所示。

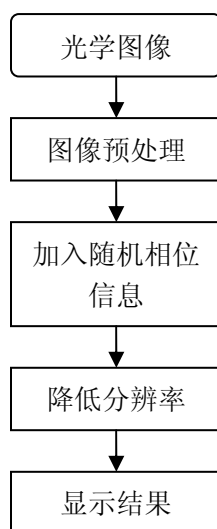


图 2.8 SAR 图像仿真流程图

图 2.9 是根据流程图进行实验仿真得到的部分实验结果图。其中(a)图为某机场原始光学图像。(b)图为区域生长法预处理结果图。可见，机场跑道区域基本从亮白色区域修正为灰黑色，符合机场跑道在 SAR 图像中的灰度特性。图 2.10(a)为直接根据默认图像模糊比参数(1.2)仿真得到的 SAR 图像。通过人眼观察可见，SAR 图像仿真结果与真实 SAR 图像非常相似，并且图像中的重要目标区域（机场跑道）已经通过预处理方式改变其在 SAR 图像中的灰度特性。为了进一步强调仿真前预处理操作的重要性，图 2.10(b)给出了未经过预处理操作的 SAR 图像仿真结果，与图 2.10(a)进行对比。可以明显的看到，作为一幅 SAR 图像，该图中的机场跑道区域灰度特性严重失实，不能作为后续的其他应用处理。

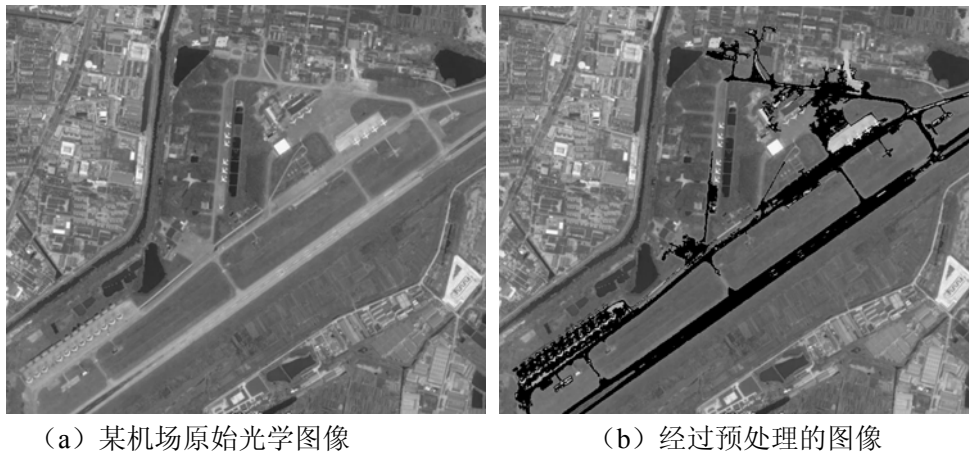


图 2.9 SAR 图像仿真预处理

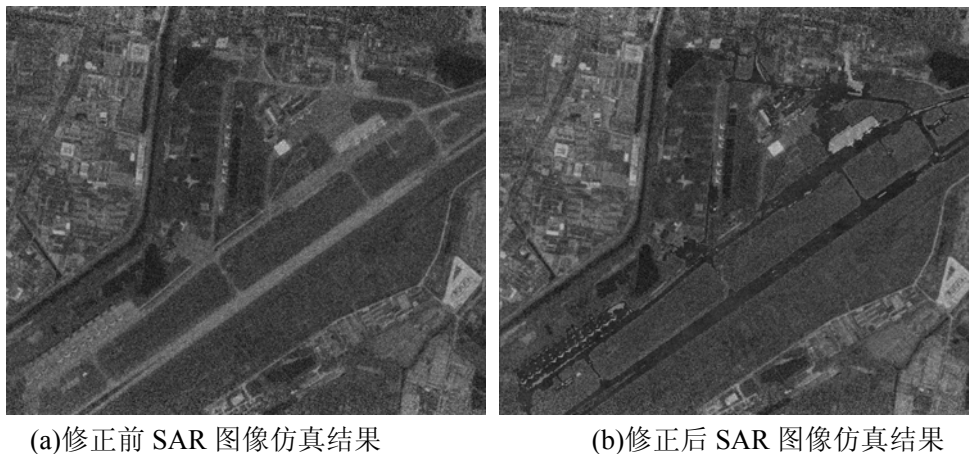


图 2.10 SAR 图像仿真结果

2.4 总结

本章针对打击效果评估系统中缺乏打击后图像的问题，进行打击效果仿真研究，提出了一种打击效果仿真算法，并就打击效果仿真的技术标准问题作了相应的探讨。该仿真方法可以解决打击后图像资源紧缺的问题，打击效果仿真的实验表明：仿真图像的毁伤分布与理论分析的结果相符，并且仿真效果逼真，符合人眼对弹药打击效果的感性认识。在得到打击效果仿真图像后，进一步就待评估目标区域只存在光学图像，而缺少对应的 SAR 图像的情况，进行 SAR 图像仿真研究。通过系统研究 SAR 成像原理和 SAR 图像仿真的一般方法，并分析复杂场景目标区域 SAR 图像实际仿真中存在的困难，提出了基于复杂场景的 SAR 图像仿真方法。实验结果表明：通过光学图像仿真得到的 SAR 图像效果逼真，由于通过预处理操作，解决了一些重要目标在光学图像和 SAR 图像中表现的不同灰度特性，为后续研究提供了一定的基础。

第三章 SAR 图像打击效果评估的关键技术

基于图像理解的打击效果评估，融合了各种图像的中、低层处理。图像的中、低层处理的好坏也决定了打击效果评估结果的准确与否。本章根据现有的 SAR 图像打击效果评估技术，提出了基于 SAR 图像打击效果评估系统的研究方案，并介绍了 SAR 图像打击效果评估过程中用到的各种图像处理技术和相应的算法。最后充分分析了现有的 SAR 图像打击效果评估方法存在的问题。

3.1 基于 SAR 图像的打击效果评估系统方案

文献[10]在总结了已有的评估流程方法的基础上，提出了打击效果评估的一般性流程，如图 1.1 所示。其中的关键技术包括：图像配准、变化检测和毁伤评估。具体针对不同传感器获得的图像在评估流程中会增加、更改或者简化某些处理步骤。评估的各个阶段根据图像类型的不同所采用的实现方法或图像处理算法也会不同。文献[7]根据 SAR 图像的特点，以 SAR 图像的目标特征信息提取为基础，提出了基于高分辨率 SAR 图像的打击效果评估方法，评估流程如图 1.2 所示。目前，这种评估方法，为很多以研究目标特征变化为毁伤评估方法的文献所采用 [4,5,6,7,8,12,30,31]。

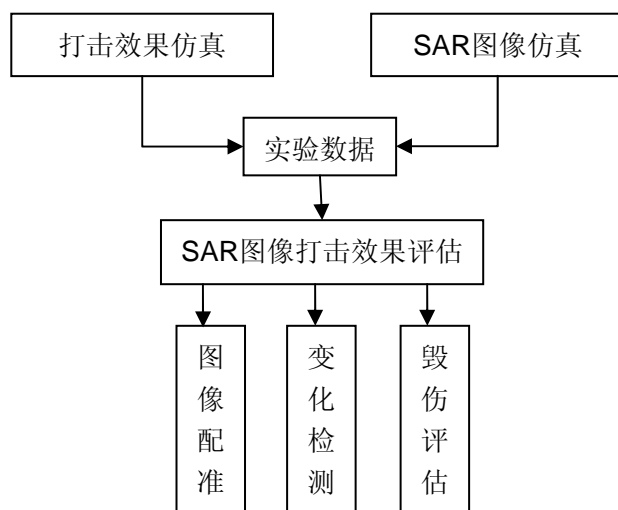


图 3.1 SAR 图像打击效果评估系统研究方案

由于基于目标特征变化的打击效果评估方法对于目标特征提取的依赖性很大，目标分割和特征提取的准确性决定了后续毁伤评估结果的准确程度，使得评估算法的实用性受到限制，也使得算法在实际应用中具有很大的局限性。因此，本文根据项目的实际需求，设计了基于 SAR

图像的打击效果评估系统研究方案,如图 3.1 所示。其中打击效果仿真和 SAR 图像仿真为 SAR 图像打击效果评估研究提供实验数据。SAR 图像打击效果评估方法主要是基于算法的实际效果和应用范围考虑,同时参考了光学图像的打击效果评估方法。

3.2 SAR 图像打击效果评估的图像处理关键技术

3.2.1 基于特征变化的 SAR 图像打击效果评估图像处理关键技术

文献[7]通过目标特征提取和特征对比的方式,实现了SAR图像中军事目标的打击效果评估。该文献是目前国内唯一一篇关于SAR图像打击效果评估的文章。本文结合图1.2对该文献中评估方法所用到的SAR图像处理的关键技术进行深入研究,并对相关处理阶段可能用到的改进算法进行介绍。

3.2.1.1 目标检测

SAR 图像中的目标检测和分割是 SAR 图像目标识别、打击效果评估的基础。由于 SAR 图像不同于光学图像,首先不能很好地描述目标的轮廓和细节;其次 SAR 图像目标对方位角特别敏感。因此,对不同的目标及不同照射方位下所形成的 SAR 图像,其背景散射强度与目标散射强度各不相同。所以,如何从 SAR 图像中提取目标有效信息一直是 SAR 图像解译的难点。目标检测与分割的质量直接影响目标的识别和变化检测,在这方面,美国林肯实验室取得了大量的研究成果,具有代表性的是 Novak 提出的基于高斯分布的双参数恒虚警率(DP-CFAR)算法和 Kaplan 提出的使用广义分形(Extended Fractal, EF)特征检测算法,该方法较 DP -CFAR 相比降低了虚警率,但运算速度、实时性不及 DP-CFAR 算法。因此,这里主要介绍了 DP-CFAR 检测算法。

恒虚警率(CFAR)检测是雷达自动目标检测的一个重要组成部分,它的实质是针对不同背景来调整虚警概率到指定的等级^[32,33]。CFAR 检测技术可以作为从SAR 图像中提取目标的第一步骤,是进一步对目标进行识别的基础。因此它必须将图像中的可能目标都提取出来,在满足恒虚警率的条件下,做到不丢失目标和尽可能地滤除杂波。

CFAR 检测技术的关键是确定自适应的阈值。我们假设 $p(x)$ 为雷达杂波分布模型的概率

密度函数,令 $F(x) = \int_0^x p(t)dt$ 。通过求解方程

$$1 - P_{fa} = \int_0^{I_c} p(x)dx \quad (3-15)$$

可以得到阈值 I_c , 其中 P_{fa} 为虚警概率,通常选 10^{-5} 或 10^{-6} 。对于给定的 P_{fa} , 可以通过二分法近似地得到方程的解 I_c :

寻找一个正整数,满足

$$F(I) \leq 1 - P_{fa} \text{ 且 } F(I+1) > 1 - P_{fa} \quad (3-16)$$

则此时的 I 就为阈值 I_c 。由式 (3-15) 可知, CFAR 检测首先要确定杂波分布模型。

在服从高斯分布的杂波中, 双参数恒虚警的检测规则为

$$\frac{D(i, j) - \hat{\mu}_D}{\hat{\sigma}_D} \geq S \quad (3-17)$$

其中, D 为检测点灰度值, $\hat{\mu}_D$ 和 $\hat{\sigma}_D$ 是杂波功率均值和方差估计, S 为检测阈值。

在服从韦布尔和对数正态分布的杂波中双参数恒虚警检测统计量可以改进为

$$\begin{cases} Y = \lg D \\ d = \frac{Y - E(Y)}{\sqrt{\text{var}(Y)}} \end{cases} \quad (3-18)$$

其中, D 为检测点灰度值, $E(Y)$ 和 $\text{var}(Y)$ 是杂波功率均值 (尺度参数) 和方差 (形状参数) 估计。

设定恒虚警检测规则为

$$\begin{cases} d < S, \text{ 判决检测单元是背景杂波} \\ d \geq S, \text{ 判决检测单元为目标} \end{cases} \quad (3-19)$$

进行 DP-CFAR 处理时, 要在 SAR 图像上局部明亮的小区域中选取候选目标, 以候选目标为处理像元中心点, 考虑到待测目标尺寸的影响, 再在其附近选取环状窗口, 其半径等于待测目标尺寸大小, 其宽度可视情况选择一个或多个像素。如图 3.2 所示, 先在窗口四周内侧计算杂波统计量估计 (均值和均方差), 然后利用恒虚警检测规则对窗口中心像元进行处理, 处理完之后, 再右移到后一个像元位置上, 重复进行上述操作直到做完整幅图像为止。其中, 模型边缘单元用来计算杂波的均值和标准差, 保护区域的存在使得目标的存在并不影响杂波估计, 模型尺寸的大小要随分辨率和感兴趣区域内的目标类型而变化, 使用环状窗口可以使检测单元与杂波估计单元之间留有一定的保护区域, 以确保目标本身像素点不会影响到杂波估计。

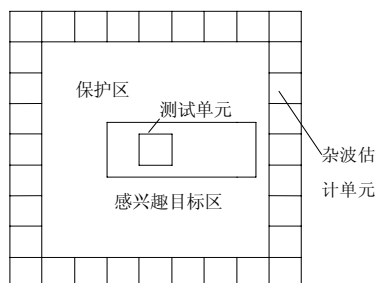


图 3.2 DP-CFAR 处理框图

3.2.1.2 目标提取

图像分割是图像处理中的重要步骤。目标检测、特征提取、目标识别等很多应用,都依赖于图像分割的质量。准确、快速的分割方法是保证打击效果评估实时性的必要条件。阈值法^[34,35]是图像分割中的一大类常用方法,其直观性和易实现性使它在图像分割中得到了广泛应用。阈值法利用图像中目标与背景在灰度特性上的差异,通过选取合适的灰度阈值来分割图像。目前已有几十种阈值选取算法,比较经典的算法有:双峰法、Otsu法、最大熵法、最小错误法等。Otsu法是图像阈值分割中的经典算法之一,在图像处理中得到广泛的应用。不久前,国防科大的朱俊等人,针对原始2维Otsu法直方图区域划分上的缺陷和运算速度慢的缺点,提出了一种适用于SAR图像的Otsu改进算法,并且取得了很好的分割效果^[36]。本文着重研究了Otsu算法在SAR图像中的应用。

Otsu算法

Otsu方法利用图像的1维灰度直方图,以目标和背景类间方差最大为阈值选取准则,所以又称最大类间方差法。

设图像的灰度范围为 $\{0, 1, \dots, l-1\}$, 选择阈值 t 将其分为两类: $C_0: \{0, 1, \dots, t\}$, $C_1: \{t+1, t+2, \dots, l-1\}$ 。对图像直方图归一化, 则有概率分布

$$p_i = n_i / N, \quad p_i \geq 0, \quad \sum_{i=0}^{l-1} p_i = 1 \quad (3-20)$$

其中 N 为总像素, n_i 为灰度为 i 的像素数。则 $C_j (j=0,1)$ 类的出现概率 w_j 及均值 u_j 分别为:

$$\begin{cases} w_0 = P_r(C_0) = \sum_{i=0}^t p_i = w(t) \\ w_1 = P_r(C_1) = \sum_{i=t+1}^{l-1} p_i = 1 - w(t) \end{cases} \quad (3-21)$$

$$\begin{cases} u_0 = \sum_{i=0}^t ip_i / w_0 = u_t / w_t \\ u_1 = \sum_{i=t+1}^{l-1} ip_i / w_1 = \frac{u_T - u_t}{1 - w_t} \end{cases} \quad (3-22)$$

其中 $w(t) = \sum_{i=0}^t p_i$, $u(t) = \sum_{i=0}^t ip_i$, $u_T = \sum_{i=0}^{l-1} ip_i$, 可以证明:

$$w_0 u_0 + w_1 u_1 = u_T, \quad w_0 + w_1 = 1 \quad (3-23)$$

C_0 和 C_1 类的方差可由式求得:

$$\begin{cases} \sigma_0^2 = \sum_{i=0}^t (i-u_0)^2 p_i / w_0 \\ \sigma_1^2 = \sum_{i=t+1}^{l-1} (i-u_1)^2 p_i / w_1 \end{cases} \quad (3-24)$$

两类的类间方差 σ_B^2 为:

$$\sigma_B^2 = w_0(u_0 - u_T)^2 + w_1(u_1 - u_T)^2 \quad (3-25)$$

最佳阈值 t 应使类间方差最大, 即

$$t = \underset{0 \leq t \leq l-1}{\text{Arg Max}}(\sigma_B^2) \quad (3-26)$$

根据阈值 t 将图像分为背景和目标, 结合形态学图像处理技术, 对分割后的二值图像进行腐蚀、膨胀操作, 滤除小区域, 并对提取的目标区域进行区域填充, 即可得到完整的目标区域。这种方法需要待分割图像的背景和目标分布特性具有较大的差异, 对直方图为双峰的图像分割效果较理想。

2维Otsu及其改进算法^[36-39]

Otsu法在图像质量较好的情况下, 可以取得令人满意的效果。但当图像的噪声较强时, 由于该方法仅仅考虑了像素自身灰度, 而没有考虑周围像素, 即没有充分利用像素间的相关性和统计信息, 因此噪声的存在会极大地影响分割效果。针对这一问题, 有人在原1维Otsu法的基础上提出了2维Otsu法, 该方法以像素灰度和邻域均值组合的2维向量表示2维直方图, 既考虑了像素自身灰度信息, 也考虑了像素的邻域空间灰度信息, 抗噪性有了很大增强。该方法的缺点是计算量以指数快速增长, 因此又有人对2维直方图提出了不同的区域划分方法和阈值选取准则, 以降低2维Otsu法的计算量。国防科技大学朱俊等人通过分析含有相干斑噪声的SAR图像二维直方图的特性, 提出了一种更适合实际SAR图像模型的阈值选取准则, 对于SAR图像中的目标, 分割结果良好。

3.2.1.3 特征提取^[40-43]

特征提取主要是针对基于目标区域提取的打击效果评估方法而言。主要包括目标的几何特征和纹理特征。

SAR 图像中目标几何特征主要描述了散射点的分布范围和分布规律, 反映了目标在外观上的几何大小, 它包括质量、直径、长短轴比例、转动惯量。其中, 质量为给定区域内强度超过某一门限的像素数占该区域所有像素数的比例; 直径为横穿该区域最大的长度; 归一化转动惯量描述了该区域上 RCS 的分布情况。长短轴比例为区域的最短轴和最长轴之比。

纹理特征描述了散射点强度的变化规律和变化程度, 反映了目标内在的纹理结构, 它包括标准对数偏差、加权饱和度和分形尺寸。其中, 标准对数偏差描述了给定区域内的强度波动,

即 RCS 变化。如雷达回波能量用 $P(r, a)$ 表示, 则标准对数偏差为

$$\sigma = \sqrt{\frac{S_2 - S_1^2 / N}{N - 1}} \quad (5-13)$$

其中, $N = \sum_{r, a \in \text{给定区域}} 1$, 即为区域总的点数;

$$S_1 = \sum_{r, a \in \text{给定区域}} 10 \log_{10} P(r, a) \quad (5-14)$$

$$S_2 = \sum_{r, a \in \text{给定区域}} (10 \log_{10} P(r, a))^2 \quad (5-15)$$

加权饱和度为部分具有最大强度散射点的能量占区域总能量的比例, 其计算如下:

$$\eta = \frac{\sum_{K\% \text{ 各最强的点}} P(r, a)}{\sum_{\text{所有点}} P(r, a)} \quad (5-16)$$

选取 $K = 5$ 。分形尺寸描述了给定区域内最强散射点的空间分布规律。由分形尺寸的定义可知孤立的一组点其分形大小为 0; 而一条线的分形大小为 1; 任何规则平面的分形大小为 2。建筑物的 SAR 图像是一系列点、线、面的组合, 经过摧毁后原来的平面可能会分解为更多的孤立点和线、变形, 从而导致分形大小发生变化, 所以, 其变化反映了目标被摧毁的程度。

3.2.2 基于变化检测的 SAR 图像打击效果评估相关技术

本文在 SAR 图像打击效果评估系统研究方案中, 提出基于变化检测的方法进行打击效果方法。算法主要包括图像配准、变化检测、毁伤评估等关键技术。

3.2.2.1 图像配准

1) 配准定义^[44,45]

图像配准是确定同一场景、不同时间、不同视点或者不同成像方式的两幅图像之间的几何变换参数的技术。它依据一些相似性度量来决定图像间的变换参量, 使从不同传感器、不同视角、不同时间获取的同一场景获取的两幅或多幅图像, 变换到同一坐标系下, 在像素层上达到最佳匹配的过程。在任何一个大型的图像应用系统中, 不可避免的会牵涉到图像配准问题。它是计算机视觉、模式识别、图像融合、运动目标检测、打击效果评估等应用中的一项关键技术。

在图像配准的过程中, 需要注意的地方有很多, 主要可以归结为以下几个方面:

I) 相似性度量: 相似性测度的选择是图像配准中最重要的步骤之一, 它决定如何确定匹配位置, 其配准的程度最后转化为匹配或不匹配。

II) 搜索策略: 搜索策略是选定搜索空间, 找到配准的最佳位置的位置集。在很多情况下,

减少测量的数量非常重要，误匹配位置越多，计算量就越大，问题就越严重。在有些情况下，可以利用一些可以得到的信息去掉不可能匹配的搜索子空间，从而达到减少计算量的目的。

III) 图像重采样：根据搜索到的匹配点集确定图像的一种几何变换，进行图像重采样。

2) 配准转换类型

对于所有图像配准技术最根本的问题是找到适当的图像转换或映射类型以正确匹配两幅图像。常见的配准转换类型包括仿射（affine）、投影（projective）、透视（perspective）、多项式（polynomial），在医学诊断等特殊应用中还有失真（fuzzy）和概率（probabilistic）转换等。

仿射：由平移、旋转及比例缩放组合成的刚性全局变换。一般由相同视角不同位置拍摄造成。其变换公式为：

$$\begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_x \\ t_y \end{pmatrix} + s \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \end{pmatrix} \quad (3-7)$$

其中 t_x 和 t_y 为平移量， θ 为旋转角度， s 为缩放尺度。

更一般的 2D 仿射变换公式为：

$$\begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{13} \\ a_{23} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \end{pmatrix} \quad (3-8)$$

透视：由 3D 到 2D 的投影造成，表现为越远离镜头图像越小，物体在 2D 图像上的坐标由其在 3D 上的坐标和镜头焦距决定。转换公式为：

$$x_t = \frac{-fx_0}{z_0 - f} \quad y_t = \frac{-fy_0}{z_0 - f} \quad (3-9)$$

其中 f 为焦距， x_0 ， y_0 ， z_0 为 3D 下的坐标。

投影：在上一种情况下，如果场景平面相对于图像平面有倾斜，则需要投影转换。转换公式为：

$$x_t = \frac{a_{11}x_p + a_{12}y_p + a_{13}}{a_{31}x_p + a_{32}y_p + a_{33}} \quad y_t = \frac{a_{21}x_p + a_{22}y_p + a_{23}}{a_{31}x_p + a_{32}y_p + a_{33}} \quad (3-10)$$

多项式：有其他形式的变形或关于镜头几何方面的信息不足时最常用的全局转换类型。多项式一般均在三次以下，以保证在达到转换要求的同时不会有太高的计算复杂度。

局部转换：不同于以上的全局转换，局部转换可运用于复杂 3D 场景的透视形变、传感器造成的非线性形变、被拍摄物体的移动和变形以及其他区域性特定因素。方法主要包括分段插值法（如样条法），或基于模型的技术（如弹性形变或目标-运动模型）。

3) 图像配准方法^[44,45,46]

图像配准的方法大致可以分为三类：基于灰度信息的图像配准方法、基于特征的图像配准方法和基于变换域的图像配准方法。

基于灰度信息的图像配准方法是利用两幅图像的某种统计信息作为相似性判别标准,采用适当的搜索算法得到令相似性判别标准最大化的图像转换形式,以达到图像配准的目的。该方法的主要特点是实现比较简单,但应用范围较窄,不能直接用于校正图像的非线性形变,对噪声较为敏感,而且在最优变换的搜索过程中往往需要巨大的运算量。基于灰度信息的图像配准方法研究中,现在较多采用的是图像的互信息相似性测度^[47-49]。

基于特征的图像配准方法是当前研究的热点^[50]。其最大的优点是能将对整个图像进行的分析转化为对图像特征的分析,从而大大减小了图像处理过程的运算量,对灰度变化、图形变形以及遮挡等都有较好的适应能力。常用到的图像特征有:特征点(包括角点、高曲率点等)、直线段、边缘、轮廓、闭合区域特征结构以及统计特征如矩不变量、重心等等^[51,52]。

目前关于特征点的提取方法已经很成熟,包括harris算子、susan算子以及通过边缘检测得到边缘曲率最大点的特征点提取方法等等。基于特征点的图像配准技术是目前图像配准领域的主要方法之一^[53-62]。1999年D.G.Lowe提出提取局部特征的SIFT算子。SIFT算子对旋转、尺度缩放、亮度变化保持不变性,对视角变化、仿射变换、噪声也保持一定程度的稳定性,成为基于特征的图像配准研究领域的热点。基于特征点匹配的另一个难题是两幅图像间的同名点匹配问题,即选择相似性测度和搜索策略问题。已报道的解决点匹配问题的方法包括松弛法,模拟退火法,Hausdorff距离及相关方法,相对距离直方图聚集束检测法,RANSAC法等。基于特征点的图像配准方法为了保证配准成功,一般要求能够提取出数量足够的特征点,从而也限制了配准算法的应用范围。

基于边缘特征和区域特征的图像配准方法是在图像分割和边缘检测基础上发展起来的^[63-69]。分割和检测的结果好坏也决定了图像配准成功率和精度。很多图像分割方法都可以用来做图像配准需要的边缘轮廓和区域的检测,比如Canny边缘提取算子、拉普拉斯-高斯算子(LOG)、动态阈值技术和区域增长等等。尽管方法很多且各具特点,但并没有任何一种方法能对所有种类的图像都能获得最佳效果,大多数的分割技术都是依赖于图像本身的。

基于变换域的图像配准方法主要是傅氏变换配准法^[70,71]。图像的旋转,平移,比例变换都能在傅里叶变换频域中反映出来,利用变换域方法能够获得一定程度的抵抗噪声的鲁棒性,同时傅里叶变换可以采用FFT的方法提高执行的速度。另外,傅氏变换由于有成熟的快速算法和易于硬件实现,因而在算法实现上也具有独特的优势。但由于这一方法受限于傅立叶变换的不变性质,只适用于在傅立叶变换中有相应定义形式(如旋转、平移等)的图像转换中,一般应用于仿射变换的图像配准中,对于图像转换形式较复杂的情况则无能为力。

目前,将上述三种图像配准方法相互结合的配准方法成为配准领域研究的主流^[72,73]。其中,基于小波的图像配准算法通过将图像变换到小波域,进而在小波域内进行特征点提取并进行匹配获得了很好的效果。将小波变换结合其他搜索匹配算法成为图像配准领域的另一研究热点。

而近年来，基于NSCT变换的配准算法也开始在文献中有所涉及。

3.2.2.2 变化检测^[74]

图像变化检测技术旨在检测同一地点不同时间的图像之间发生的变化。变化检测技术在环境监测、土地利用、农作物生长状况监测、森林采伐监测、灾情估计、打击效果评估等方面有着非常广泛的应用。

近年来，随着SAR成像技术的日益成熟，成像质量的不断提高，基于SAR图像变化检测研究受到了越来越广泛的关注。广义的SAR图像变化检测过程比较复杂，涉及SAR图像配准、变化区域辨识和检测结果分析三个步骤，流程如图3.3所示。图像配准是使多时相SAR图像在空间位置、图像比例等要素上都趋于一致。狭义的SAR图像变化检测是指在多时相SAR图像配准完成的基础上辨别和分析变化情况的过程。

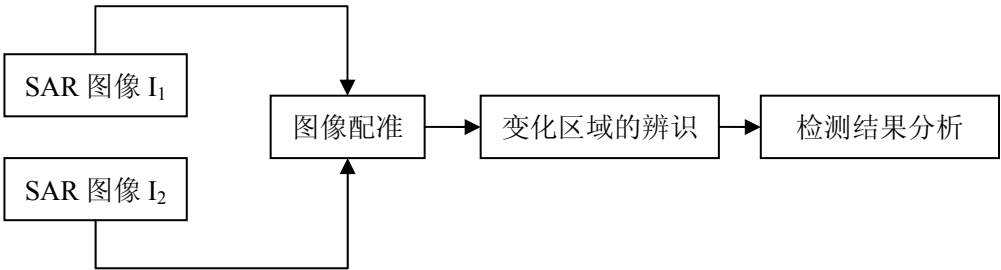


图 3.3 广义多时相 SAR 图像变化检测流程图

SAR图像的变化检测方法基本上可以分为图像阈值法和图像分类法两大类。图像阈值法变化检测研究中，主要是根据像素值,提取有关变化性质的信息以找出我们感兴趣的变化,但要求精确的时域标准化和图像配准，通常采用的策略是广义最小误差准则，这这类准则是在Kittler和Illing worth提出的最小误差阈值法理论上发展起来的。图像分类法变化检测直接给出了有关地物性质的信息,因而受配准及时域标准化结果的影响小,但是所使用的分类器的准确度对它们的影响很大。经典的图像分类技术主要包括：MRF模型、隐马尔可夫链（hidden Markov chain,HMC）模型、模糊集理论等。

本文主要研究了图像阈值法的变化检测。适用于这一类型的变化检测方法很多，基本检测方法有图像差值法、图像比值法、相关系数法等等。

图像差值法：

图像差值法对多时相图像中对应像素的灰度值进行相减,结果图像代表了两幅图像的变化。对差值图像进行统计处理,计算差值图像的均值和标准差。如果差值图像中像素的灰度值满足式(3-11)，就认为该像素发生变化。

$$I(x, y) - m \geq T_d \times STD \quad (3-11)$$

其中 m 为差值图像均值, STD 为差值图像标准差, T_d 为门限值。由于用对应像素灰度值直接相减的效果很差, 一般都取窗口, 用窗口均值代替窗口中心像素的灰度值进行计算。

图像比值法:

图像比值法计算已配准的多时相图像对应像素的灰度值的比值, 如果在一个像素上没有发生变化, 则比值接近1, 如果在此像素上发生变化, 则比值远大于或远小于1。图像比值法和图像差值法处理过程相似, 只是最后对窗口均值求比值而不是求差值。当比值图像中的像素灰度值满足式(3-12)时, 就认为该像素发生变化。

$$I(x, y) \geq T_h \quad \text{或} \quad I(x, y) \leq T_l \quad (3-12)$$

其中 T_l 和 T_h 为分别代表低门限和高门限。

相关系数法:

相关系数法计算图像中对应像素灰度的相关系数, 结果代表了两幅图像中对应像素的相关性。一般是取窗口, 计算两幅图像中对应窗口的相关系数, 来表示窗口中心像素的相关性。如果相关系数值接近1 则说明相关性很高, 该像素没有变化; 反之, 则说明该像素发生了变化。通过式(3-13) 得到相关系数, 如果相关系数 r 满足式(3-14), 就认为该像素发生变化, T_r 为门限值。其中 n 为一个窗内所有像素的个数, \bar{i} , \bar{j} 分别为待配准图像和基准图像的相应窗内像素灰度的平均值。

$$r_{xy} = \frac{\sum_{m=1}^n (i_m - \bar{i})(j_m - \bar{j})}{\sqrt{\sum_{m=1}^n (i_m - \bar{i})^2} \sqrt{\sum_{m=1}^n (j_m - \bar{j})^2}} \quad (3-13)$$

$$r \leq T_r \quad (3-14)$$

3.2.3 毁伤评估

毁伤评估是打击效果评估最重要也是最关键的一个环节, 前期的图像配准、目标提取、特征提取等处理都是为毁伤评估做准备的, 而评估前期的图像处理方法也决定了评估方法的选择。评估方法的选择, 评估结果的好坏直接关系到后续的战役行动计划, 影响后续战役进程的发展。目前主要的评估方法包括两类, 即以毁伤区域指示为目的的打击效果评估和以目标毁伤程度指示为目的的打击效果评估。

文献[11]以提取毁伤区域为目的, 通过图像配准、变化检测等操作, 实现对激光雷达仿真图像的毁伤区域精确提取。随着各种图像处理技术的发展, 打击效果评估技术的研究也越来越

深入，评估准则也逐渐趋于以感兴趣军事目标的变化情况为对象。文献[5-7]等通过目标提取、特征提取的处理手段，通过对比打击前后目标特征的变化情况，分析目标的毁伤程度，实现目标的毁伤评估。

3.3 基于 SAR 图像的打击效果评估研究中待解决的问题

基于图像理解的打击效果评估技术是以图像处理技术为基础的。关于打击效果评估整个领域存在的一些问题，已经在本文绪论部分做了详细的介绍。本节就 SAR 图像的打击效果评估中存在的一些具体问题做出介绍。

一、SAR 图像打击效果评估的方法。基于图像理解的打击效果评估，没有现成的理论和方法。目前，基于光学遥感图像的打击效果评估技术已经有了深入的研究，一些算法、流程能够对不同目标类型的图像进行评估。SAR 图像的打击效果评估方法主要是基于目标特征的对比评估。这种方法要求能够通过前期处理方式提取出待评估的目标区域。但是不同的目标在 SAR 图像中的表现特性不同，对其提取需要用到的图像分割算法也不同。

文献[7]给出的目标提取算法虽然能够提取出目标区域，但是由于采用了空间二维匹配滤波算法，在要求目标的方向精度较高或者图像较大的情况下，运算量极大。如果采用 Otsu 分割算法结合形态学处理方法，可以很快的分割出目标，但是待分割的目标必须与背景差异较大。对于其他类型的目标则不适用。如对于车队的打击效果评估必须要修改基于单一目标的打击效果评估算法，或者分别对车队中的每一辆车分别进行评估。这在车队较小的情况下可以在短时间内得到评估结果。而当车队较大时，则是一项耗时的工作。对于机场跑道的打击效果评估，则必须修改评估算法中的目标提取方法，并且评估准则的设定也要做调整。

二、SAR 图像打击效果评估结果的表示。文献[7]通过对目标进行特征提取，以打击前后的目标的对应特征以及特征矢量间的二次距离^[43]作为评估最终结果，并指出：打击前后的特征变化不大的情况下，目标基本上不受摧毁。但是，该文并没有明确提出如何对特征变化的大小进行量化。即特征变化小于某个数值时，可以认为变化由噪声干扰造成；特征变化在某个区间的情况下，可以认为目标受到中等毁伤或者其他毁伤。文献[11]则以变化毁伤区域作为评估的最终结果，评估结果简洁明了，但是不能反映进一步的毁伤信息。

3.4 总结

本章综合打击效果仿真和 SAR 图像仿真方法，提出了基于 SAR 图像打击效果评估系统的研究方案。系统研究 SAR 图像打击效果评估中相关图像处理的关键技术，并就部分关键技术的目前发展情况，最新研究进展做出简单的介绍。通过对打击效果评估方法的深入研究分析，指出现有的基于特征对比的 SAR 图像打击效果评估算法所存在的问题。

第四章 基于变化检测的 SAR 图像打击效果评估研究

根据现有 SAR 图像打击效果评估算法中存在的问题,本文提出基于变化检测的高分辨率 SAR 图像打击效果评估算法。算法对不同传感器,不同时间获得的 SAR 图像进行配准、变化检测,得到变化区域,通过多级阈值对变化区域进行毁伤等级划分,得到毁伤评估结果。实验证明,该算法能够对机场、建筑物等陆上多种类型的军事目标 SAR 图像进行打击效果评估,可以保证目标区域在未遭受打击的情况下,评估的毁伤等级在一级以内,即目标无毁伤或者轻微毁伤。评估结果简洁明了,符合爆炸毁伤程度的从外围到中心逐渐减弱的分布趋势。

4.1 图像配准

随着合成孔径雷达的研制成功,已经有很多专家学者一直致力于 SAR 图像配准领域的研究,并且取得了大量的研究成果,但是 SAR 图像高精度自动配准技术至今仍是 SAR 图像处理领域的一个难题。

本文充分研究了基于特征的 SAR 图像配准相关算法,发现现有基于特征的高精度自动配准算法耗时太长,而且每种算法只针对某一类或几类的 SAR 图像有效,无法满足后续打击效果评估的实时性和算法鲁棒性要求。如基于区域特征匹配的 SAR 图像配准算法要求图像的区域信息比较丰富,能够从待配准的 SAR 图像中分割出数量足够的相似性区域(最少 3 个)。基于角点特征匹配的方法能够根据需要提取出数量足够的待匹配特征点,但是由于 SAR 图像相干斑噪声的影响,很多特征点为干扰点,为后续的点匹配带来了很大的困难。基于 SIFT 特征的图像配准技术是目前图像配准领域的研究热点,它通过提取图像中的 SIFT 关键点描述符,实现图像的配准。由于每个 SIFT 关键点描述符一般为 128 维的向量,在 SIFT 关键点较多的情况下会极大的增加特征提取及后续特征匹配的计算量,使得图像配准的时间显著增长。

目前,应用于实际图像处理系统中的配准技术还是以人工结合机器的半自动配准方法为主。如美国 ERDAS 公司开发的 ERDAS IMAGINE 遥感图像处理系统。文献[75]基于 ERDAS IMAGINE 软件系统,通过手动选取控制点的方法,实现了不同时相的两幅遥感图像的配准。另外,matlab 编程软件中也有人工配准的相关模块。

由于后续的打击评估算法完全能够承受小角度的偏差和几个像素以内的平移误差,对图像的配准精度要求并不高。因此,本文采用人工选择控制点的方法对打击前后图像进行配准。一般认为待配准的两幅 SAR 图像满足仿射变换关系。通过人工选取特征点,计算仿射变换参数,根据仿射变换参数重采样图像,实现打击前后图像的配准。虽然多了人为干预过程,但是省去了搜索匹配这个相当耗时的步骤,且操作简单,配准结果稳定可靠。具体配准方法如下:

- I) 在打击前图像上选取 3 个特征点, 要求特征点较明显, 易于在打击后图像上找到其对应的点;
- II) 在打击后图像上选择相应的特征点;
- III) 将两组点代入仿射变换模型, 计算仿射变换参数;
- IV) 根据仿射变换参数, 对打击后图像进行重采样, 得到已配准的图像。

4.2 变化检测

基于 SAR 图像的打击效果评估, 从广义上来看, 也属于变化检测的范畴, 它需要在检测到打击前后 SAR 图像的变化毁伤区域的基础上, 根据毁伤评估准则做进一步的处理。因此, SAR 图像变化检测是基于 SAR 图像的打击评估过程中非常重要的一步。

这里需要指出的一点是: 基于目标特征变化的 SAR 图像打击效果评估, 是通过检测出打击前后的感兴趣区域的目标特征变化, 达到变化检测的目的, 最后根据特征变化的大小, 确定目标的毁伤程度的过程。因此, 从概念上讲, 基于目标特征变化的 SAR 图像打击效果评估也存在变化检测的问题, 其中的目标特征提取和对比分析应当属于变化检测中的分类法。

一般情况下, SAR 图像的变化检测之前, 需要对图像进行降噪处理: 降斑算法既要能有效地减少斑点, 同时对图像的细节和区域边界的陡峭程度都要有很好的保持能力。增强 Lee 滤波器由于其较好的细节保持性能, 在 SAR 图像变化检测中应用广泛。但是, 对于滤波器窗口尺寸的选择要根据具体图像斑点噪声的强度来确定。对于斑点噪声强度较大的图像, 滤波器的窗口尺寸需要稍大一些, 滤波次数也要多一些; 对于斑点噪声强度较小的图像, 滤波窗口的尺寸要相应减小, 滤波次数也要相应减少。

基于打击效果评估研究中 SAR 图像变化检测的特殊性, 打击评估前要求能够尽可能的保持毁伤区域的全部信息, 而滤波操作不可避免的会导致图像信息的改变, 这很可能会给评估带来大的误差。即: 经过滤波操作后, 会一定程度的减弱或增强目标区域的毁伤程度。另外, 增强 Lee 滤波在实际应用中, 需要根据图像的斑点噪声强度确定滤波器窗口的尺寸和滤波的次数, 人工干预过程较多, 不利于变化检测算法投入实际应用。因此, 本文的变化检测不对图像进行降噪处理, 而是直接采用差值法进行变化检测^[76,77], 并且通过检测点的领域内部的统计信息(均值)降低图像斑点噪声对变化检测结果的影响。

由于对打击毁伤区域的检测同地震灾害、植被变化等存在较大的不同。目标遭受打击后, 其毁伤区域较为集中, 毁伤形状是近圆形的随机分布, 毁伤程度服从中心到外围变化逐渐减弱的分布。在通过阈值分割得到变化检测结果后, 根据目标毁伤的分布特点, 利用形态学滤波处理, 可以得到准确的变化毁伤区域。变化检测流程如图 4.1 所示。

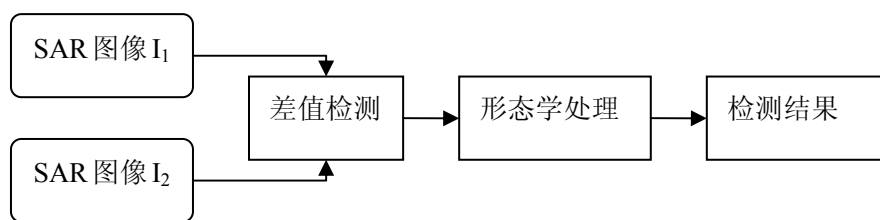


图 4.1 变化检测流程

具体算法步骤为：

- I) 计算配准后的两幅图像对应位置点的差值，得到差值结果图。对应点的灰度值取该点 5×5 领域内像素的均值。
- II) 对差值结果做进一步的均值滤波，减小图像噪声的影响。
- III) 对均值滤波结果根据式 (3-11) 进行阈值分割，阈值 T_d 取 1，得到初步的变化检测结果。
- IV) 对初步的变化检测结果进行形态学膨胀、腐蚀操作，通过区域标记法滤除小区域，得到真实变化毁伤区域。

4.3 打击效果评估

文献[7]的评估图像为人工手动仿真前后的 SAR 图像，不存在图像配准问题和不同传感器噪声的影响，实验条件较为理想化。并且当评估对象不是面状强反射目标时，评估算法失效，或者评估结果存在很大误差。因此，针对以上情况，并综合考虑 3.3 节分析的关于 SAR 图像打击效果评估中存在的有关问题，本文根据图像配准和差值变化检测的结果，通过多级阈值分割的方法设计了相应的毁伤评估准则，对 SAR 图像进行打击效果评估。毁伤评估准则如下：

- 1 级毁伤： $1.5\sigma > I(x, y) \geq \sigma$ （无毁伤或者轻微毁伤）
- 2 级毁伤： $2\sigma > I(x, y) \geq 1.5\sigma$ （轻微毁伤或者中度毁伤）
- 3 级毁伤： $2.5\sigma > I(x, y) \geq 2\sigma$ （中度毁伤或者严重毁伤）
- 4 级毁伤： $I(x, y) \geq 2.5\sigma$ （严重毁伤或者完全毁伤）

其中 $I(x, y)$ 为 (x, y) 点的领域均值的差值结果， σ 为差值图像的标准差。由于误差的存在，各级毁伤分别对应 2 种毁伤效果。对各级分割结果通过形态学膨胀腐蚀、区域标记、区域填充等操作，滤除小区域，填充区域内部小的空洞。

最后，对分割结果做出判断。真实的毁伤结果通过阈值分割之后，应该服从中心到外围毁

伤等级逐渐降低的一种分布，并且毁伤区域趋于近似圆的某种随机形状。而无毁伤的结果通过阈值分割之后，由于获取图像传感器的差异、图像噪声、配准精度、以及不同时期拍摄区域存在的一些细小的变化等，都会造成分割出现高于一级毁伤的情况。但是其分布随机，且一般均为小的区域，不连通成大范围的毁伤区域。由于一级毁伤为最大可能毁伤范围或区域，包含真实的轻微毁伤及图像灰度差异造成的结果，高等级毁伤区域一定在一级毁伤区域内。因此，这里根据一级毁伤的区域大小判定评估区域是否遭到打击，根据高等级毁伤区域的大小判定毁伤的总体情况。

4.4 评估实验及结果分析

配准实验及结果分析

图 4.2(a)(b)是同一区域、不同传感器、不同时间拍摄机场跑道部分区域的 SAR 图像，其他 4 幅图像是对(b)图的 2 级、3 级、4 级、5 级打击 2 级目标材质的仿真效果图。图像大小均为 512×512 。由于分辨率不同，图像虽然对应同一区域，但是对应区域的大小不同。图 4.3 是各幅图像的手动配准结果。配准结果参数如表 4.1 所示。各个配准参数的意义为（以图 4.3（b）的配准参数为例）：横向平移 78.86 表示(b)图配准前相对于(a)图的在横向上向右平移了 78.86 个像素，纵向平移-19.96 表示(b)图配准前相对于(a)图在横向上向上平移了 19.96 个像素，横向尺度 0.91 表示同一个目标在(b)图中对应的横向像素个数与目标在(a)图中对应的横向像素个数之比，纵向尺度 0.74 表示同一个目标在(b)图中对应的纵向像素个数与目标在(a)图中对应的纵向像素个数之比，旋转角度 0.79 表示(b)图相对于(a)图顺时针旋转了 0.79 度。通过配准结果图可见，打击前后（本图打击后图像未受打击）图像的主要区域已经基本对应，已经为后续的打击效果评估做好准备。

表 4.1 配准结果

配准参数	横向平移（像素）	纵向平移（像素）	横向尺度	纵向尺度	旋转角度
图 4.3(b)	78.86	-19.96	0.91	0.74	0.79
图 4.4(c)	84.78	-19.37	0.90	0.75	0.21
图 4.4(d)	86.79	-18.49	0.88	0.73	0.84
图 4.4(e)	83.56	20.36	0.88	0.75	0.43
图 4.4(f)	83.77	-19.83	0.90	0.75	0.61
图 4.4(a)	-86.37	29.94	1.10	1.32	0.43

由于配准前两幅图像的分辨率不同，如果将高分辨率图像向低分辨率图像匹配的话，配准结果图像的部分区域不能够在原高分辨率图像中找到对应的区域，导致配准结果存在部分区域像素没有图像信息，默认灰度为 0。因此，本文在没有特殊说明的情况下，是将低分辨率图像向高分辨率图像匹配。图 4.4 给出了将图 4.2 的(a)图向(b)图配准的结果，可见打击前图像底部

没有图像信息。另外，由于配准精度的影响，配准结果存在几个像素的误差，图像边缘区域不能很好的对齐，如果对两幅图像直接相减，会使得边缘区域差值结果很大，影响毁伤评估。因此，后续的评估算法和毁伤评估准则必须能够承受或者克服配准误差的影响。

为了给后续的打击效果评估提供素材，这里对图 4.1(b)进行不同等级的打击效果仿真，并配准，仿真结果如图 4.2 所示，配准结果如图 4.3 所示。通过表 4.1 的配准参数可见，手动配准为像素级精度，而且由图 4.3 的配准结果可知，图像中的区域在像素级精度内能够很好的对齐。

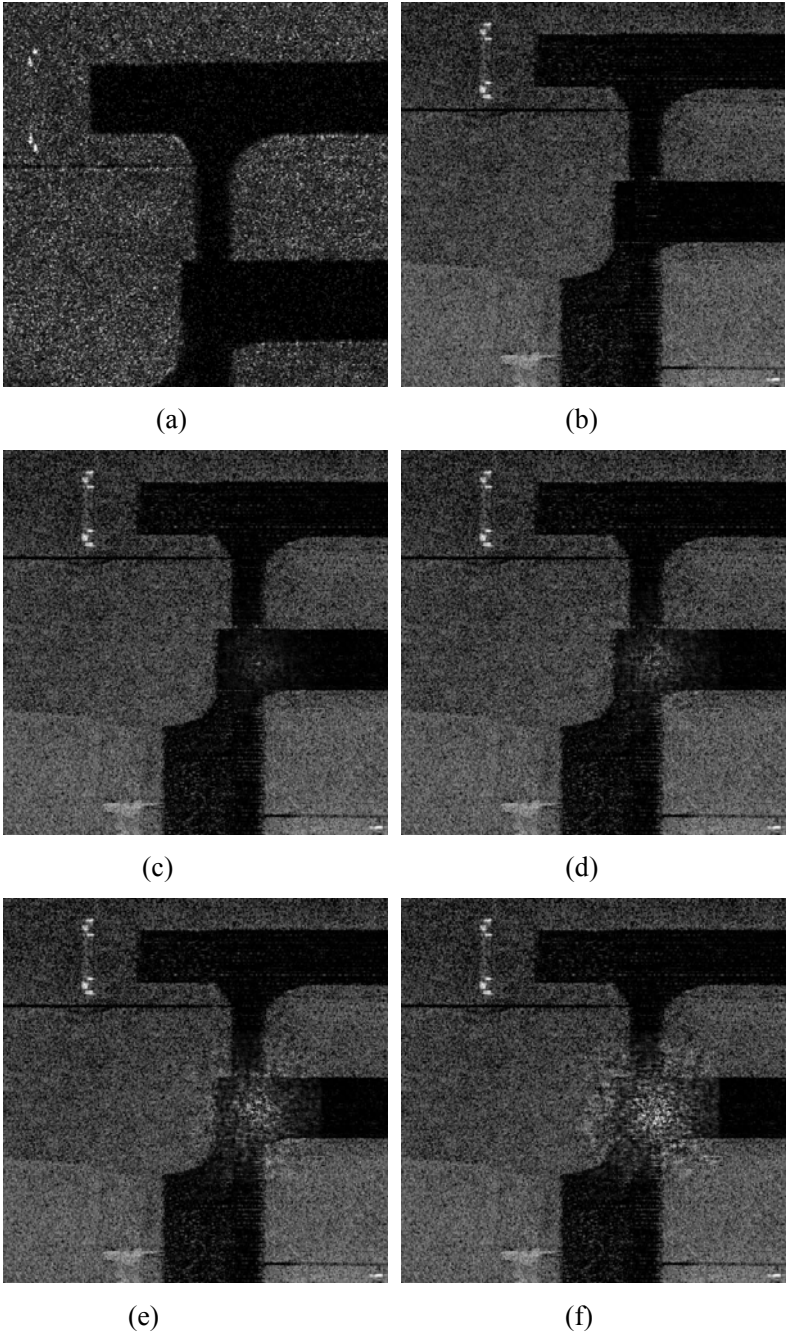


图 4.2 不同打击等级仿真效果图

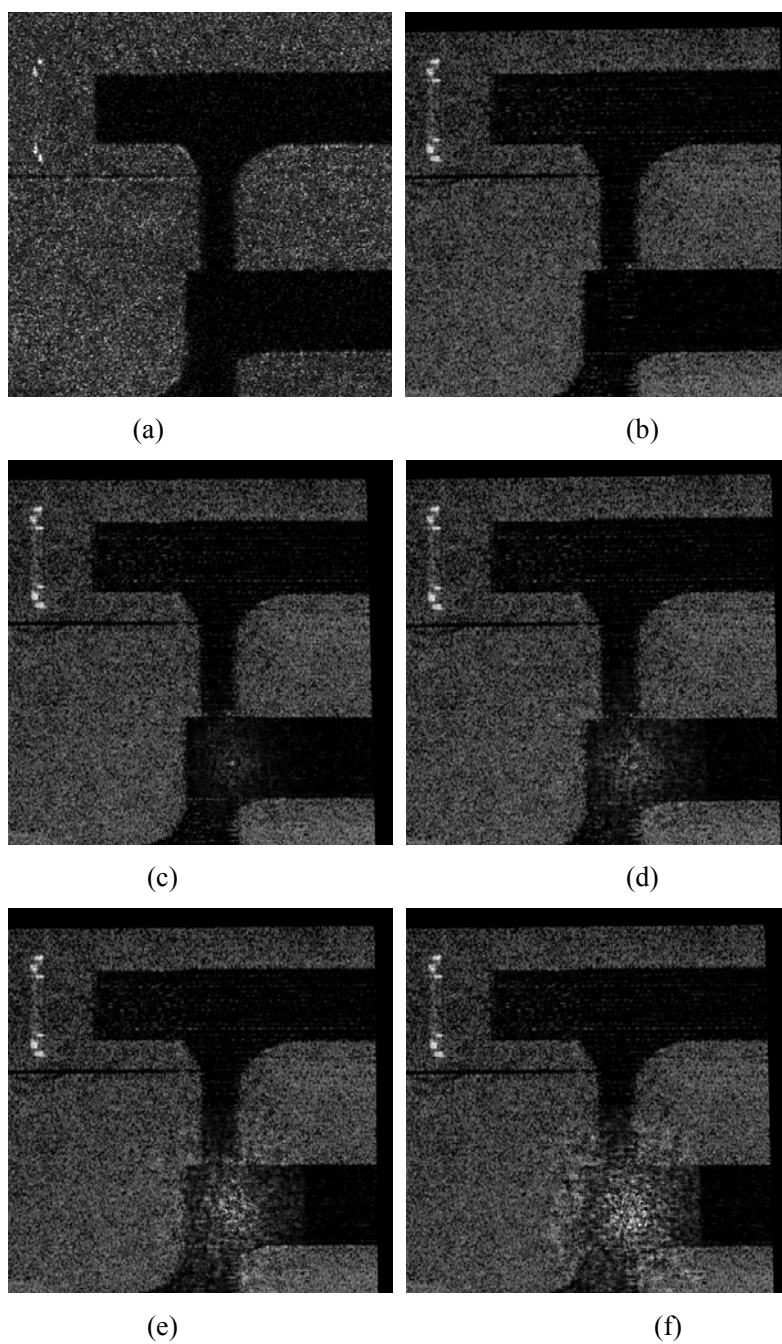


图 4.3 配准结果图

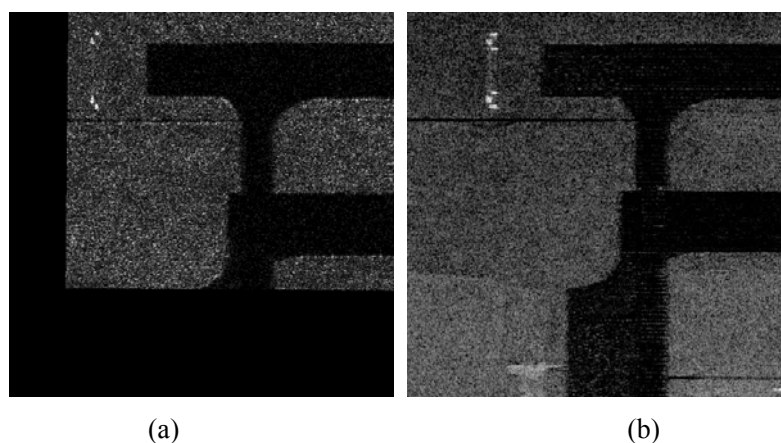


图 4.4 配准后机场跑道 SAR 图像

变化检测实验及结果分析

根据毁伤评估准则可知，1 级毁伤即为变化检测的结果。因此，变化检测实验主要是通过图像差值得到差值结果，并且对差值结果做进一步的滤波处理。

由于配准误差会造成差值结果在图像的边缘地带出现峰值，变化检测只针对毁伤区域进行。图 4.5(b)为对图 4.3(b)进行 5 级打击 2 级目标材质的打击效果仿真结果,打击前后图像已配准。为了分析对比直接差值和基于区域灰度均值的差值检测效果，本文对图 4.5 打击前后的毁伤区域进行不同差值方法实验。

图 4.6 为直接对图 4.5 进行差值的三维结果图，图 4.7 为基于区域灰度均值差值方法的三维结果图。由差值结果的三维图可见，对两幅图像直接进行点对点的差值，由于差值波动太大，无法从该差值结果中读出毁伤信息，而且对差值结果进行阈值分割只能得到近似均匀的点和小区域结合的分布，无法从分割结果中得到有用信息；而基于区域灰度均值的差值方法，可以得到明显的毁伤区域信息，并且对均值法差值结果做进一步的均值滤波，可以降低噪声因素造成的部分点状峰值干扰,如图 4.8 所示。

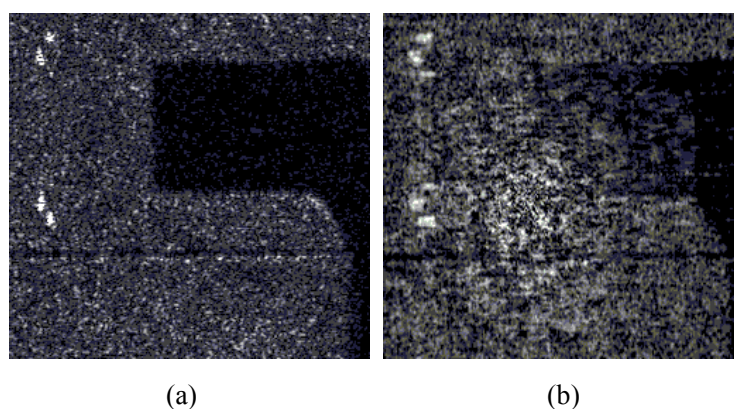


图 4.5 打击前后的待检测区域

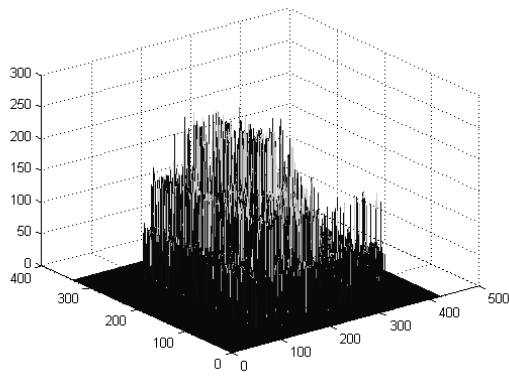


图 4.6 直接差值结果

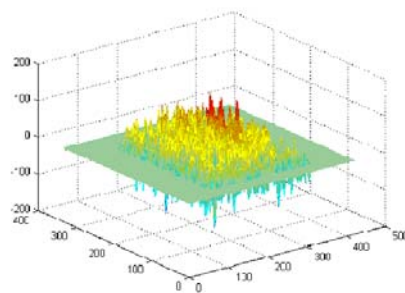


图 4.7 基于区域灰度均值的差值结果

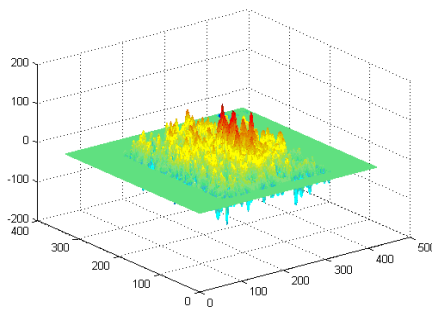


图 4.8 进一步的均值滤波结果

毁伤评估实验及结果分析

在得到打击前后图像的差值结果后，根据毁伤评估准则，对差值结果做不同阈值的分割，即可得到不同毁伤等级的毁伤区域。为保证毁伤区域信息的完整性，本文分割方法为：一级以上的毁伤区域、二级以上毁伤区域、三级以上毁伤区域、四级毁伤区域。并且，为了验证打击效果评估算法的效果和准确性，本文设计了如下毁伤评估实验：1) 对不同传感器的同一区域未毁伤图像进行打击效果评估，验证评估结果；2) 根据文献[6]的方法，对原始建筑物 SAR 图像进行打击效果仿真，再对仿真前后的 SAR 图像进行打击效果评估，验证评估结果的有效性和准

确性； 3）从不同传感器获得的同一区域两幅图像中选择一幅进行打击效果仿真，再对仿真结果图像和另一幅该区域图像做打击效果评估。

图 4.9 为实验 1 的毁伤区域分割结果，由于评估前已知目标区域无毁伤，可以通过实验 1 验证算法的有效性和实用性。通过观察待评估的打击前后目标区域可以发现，虽然图像经过较好的配准，但是由于成像雷达不同，图像左部的“塔台”目标在图像中表现的面状高亮度区域大小不同，导致在评估过程中误认为塔台遭到严重毁伤。因此，在实际设计打击效果评估系统中，可以通过判别毁伤区域大小，设定高等级毁伤必须在低等级毁伤区域内部等条件对评估结果进行限制，减少误评估。图 4.9(b)为设置了条件限制的毁伤评估结果。可见，已经滤除了“塔台”部分的误毁伤区域。图 4.10(a)(b)分别为实验 2、实验 3 的毁伤区域分割结果，评估区域的毁伤分布符合人对爆炸毁伤的这种由中心向外围逐渐扩散的随机分布的认识，并且不同毁伤等级的分割结果较为准确，能够对毁伤变化的前提下，进一步提供目标区域的毁伤程度信息。

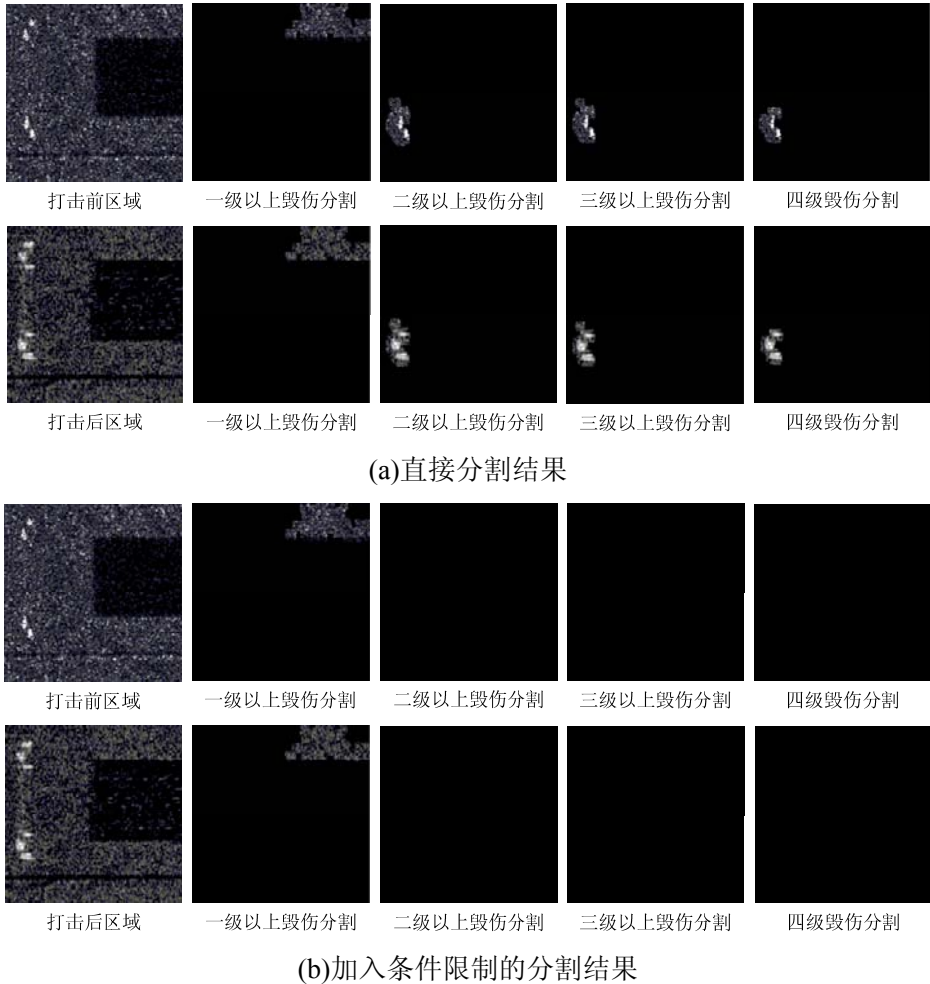


图 4.9 实验 1 的打击效果评估结果

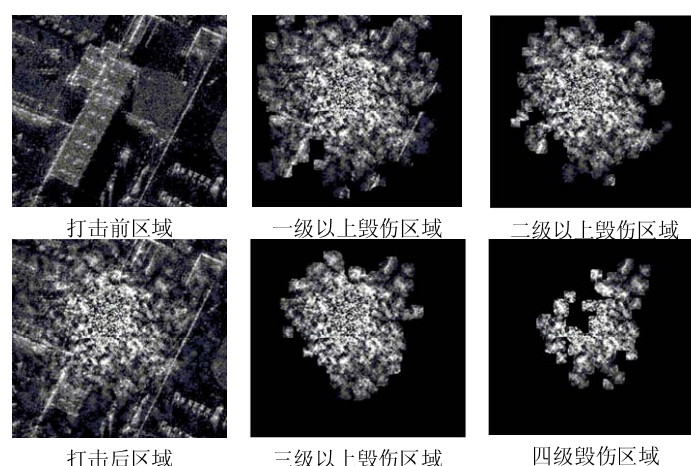


图 4.10 实验 2 的打击效果评估结果

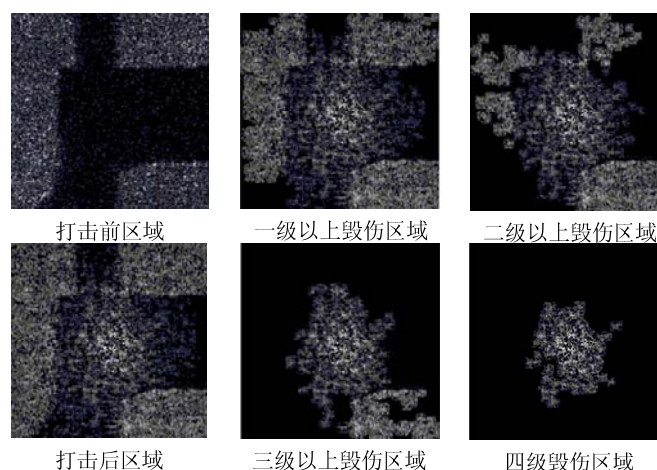


图 4.11 实验 3 的打击效果评估结果

影响评估结果的关键因素分析

根据毁伤评估实验及结果，从图像处理的角度来看，影响打击效果评估的主要因素包括：图像质量、配准精度、变化检测三个方面。

图像是基于图像理解的打击效果评估的数据来源，其质量的高低决定了评估结果准确与否。在图像分辨率较低的情况下，对于目标的轻微毁伤情况，即使人眼也很难分辨，更无法要求机器识别出来。图像配准和变化检测技术是图像处理领域的研究热点和难点，广泛应用在需要从多个数据源提取信息的多个领域。具体针对本文的毁伤评估准则来看，由于目标边缘区域存在几个像素的配准误差，使得边缘区域的变化较大，从而导致各等级毁伤区域的不准确。考虑到对不同类型图像自动配准存在的难度，本文结合实际工程应用，通过设计相应的评估算法，减小人工配准对于变化检测结果的影响，从而减小了对于评估结果的影响。但是，图像配准的精

度决定了变化检测结果的精度，也即决定了评估结果的精度。而图像配准和变化检测的精度一方面是由相应算法决定，另一方面，也是由所要处理的图像质量决定的。因此，高分辨率高清晰度的图像质量、高精度亚像素级的配准精度和变化检测结果是评估结果准确性的必要条件，而后两项因素则是基于图像理解的打击效果评估技术今后的发展方向。

另外一点值得注意的是：虽然打击效果评估技术正朝着自动化、智能化的方向发展。但是，在今后很长一段时期内，半监督、半自动的打击效果评估仍然是实际战场中目标毁伤效果的主要评估方式。这种方式决定了人为主观因素在评估过程中所起到的主导性作用。打击效果评估中的人为主观因素不仅包括对基于图像理解的打击效果评估的人工干预，而且包括对通过各种渠道得到的战场情报的理解和判断。可见，情报是影响打击效果评估的另一个关键因素。例如，在对某指挥所火力打击后，从情报获知，指挥所内部人员已经全部消灭或者迁移，那么已经失去对该指挥所做毁伤评估的意义了。因此，在研究基于图像理解的打击效果评估技术的同时，相关部门也要关注战场情报搜集人员的培训工作，为实时、准确的目标毁伤效果评估做准备。

4.5 总结

本文提出的基于变化检测的 SAR 图像打击效果评估方法，在评估精度要求不高的情况下，能够为操作者提供目标区域毁伤信息。在分析了用变化检测方法进行打击效果评估的可行性后，详细介绍了评估算法，并通过配准实验、变化检测实验、打击效果评估实验对提出的算法进行验证。由于评估结果为不同毁伤程度对应不同大小的毁伤区域，操作者可以根据其毁伤分布情况判断评估结果的可信度，起到了辅助评估的作用。

这种评估方法由于只根据对应点的区域灰度信息的差值来决定毁伤情况，不依赖于目标检测，可以对任意目标区域进行评估。解决了现有打击效果评估算法只能对特定目标进行评估的缺陷，但是在图像配准误差很大或者图像差异很大的情况下会得到不可信的评估结果，这可以从评估结果图像中观察出来。

后续改进可以将该方法与基于目标分割及特征提取的评估方法结合起来，以增加评估结果的准确性。

第五章 SAR 图像打击效果评估系统的设计与实现

一个准确、高效的评估系统可以优化军事资源的利用，极大减少军事资源特别是弹药资源的浪费，并将对军事物资及人员的不必要的危险消弭于无形。相反，如果某个评估系统的误差太大，那么不但失去了对打击效果进行评估的意义，而且会误导指挥者做出错误的决定，延缓战事的发展，甚至导致战事失利。可见，如何设计一套准确、时效的打击效果评估系统极具研究价值。

本章主要介绍了打击效果评估系统的整体框架设计，及打击效果仿真、SAR 图像仿真、图像配准、打击效果评估各个模块在打击效果评估系统中的具体功能实现，最后结合系统设计过程中的一些经验，对 SAR 图像打击效果评估系统作出总结，并提出系统后续的改进和优化的方向。

5.1 系统总体设计结构

5.1.1 总体框架设计

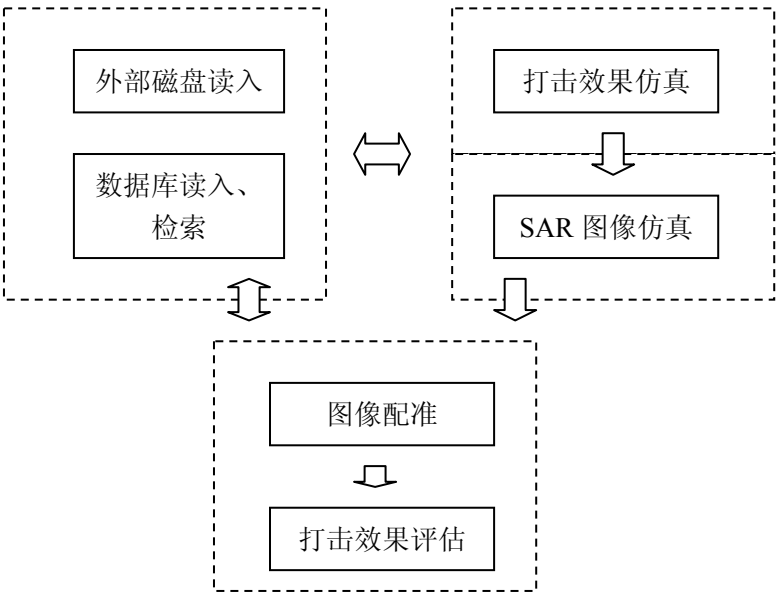


图 5.1 软件系统结构图

本文以某国防预言项目为研究背景，从软件研发的具体工程需求出发，在算法研究的基础上，对 SAR 图像打击效果评估系统进行了具体软件实现。系统的结构框图如图 5.1 所示，主要包括 4 个模块，即打击效果仿真模块、SAR 图像仿真模块、图像配准模块、打击效果评估模块。

SAR 图像的打击效果评估流程非常简单。根据图像资源存在与否，可以分为以下几种情况：

- 1、只存在打击前 SAR 图像，则调用打击效果仿真和打击效果评估两个功能模块；
 - 2、只存在打击前光学图像，则调用打击效果仿真、SAR 图像仿真和打击效果评估三个功能模块；
 - 3、存在打击前或者打击后 SAR 图像，另一幅图像在数据库内，则以已知的一幅图像通过数据库检索功能，得到另一幅图像，再调用图像配准和打击效果评估功能模块。
- 具体软件操作流程如图 5.2 所示。各个功能模块的具体实现在后文作介绍。

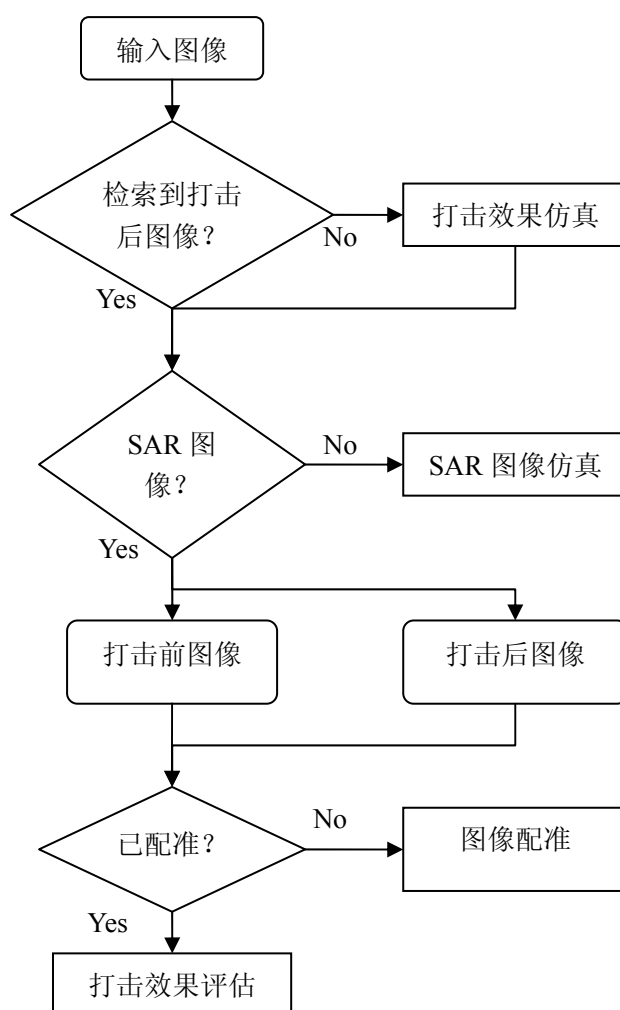


图 5.2 软件操作流程

5.1.2 系统软硬件平台

系统具体实现选择的软件平台如下：

- (1) 操作系统：WindowsXP Professional
- (2) 开发工具：Microsoft Visual C++ 6.0、Oracle /SQL Sever 9i

硬件平台：

(1) CPU:

(2) 内存：512MB

5.2 系统基本功能及具体实现

打击效果评估系统的主要功能包括：打击效果仿真、SAR 图像仿真、图像配准、打击效果评估四个模块，其中 SAR 图像仿真单独占用一个视图栏和一个主菜单栏。打击效果仿真、图像配准和打击效果评估三个模块综合在一个菜单栏内，打击效果仿真和图像配准为评估系统的底层应用，占用打击效果评估视图栏。打击效果评估模块由于其功能的重要性，包括评估功能实现视图栏和评估结果显示视图栏两个视图栏。系统的软件界面如图 5.3 所示。图像可选择外部磁盘和数据库两种方式读入，并且能够保存打击效果仿真图像到数据库内。当从数据库内部读入一幅打击前或者打击后图像时，可以先利用系统中的图像检索功能，检索得到打击对应的图像，然后进行配准、打击效果评估等操作。系统具体各个模块的功能设计如下。

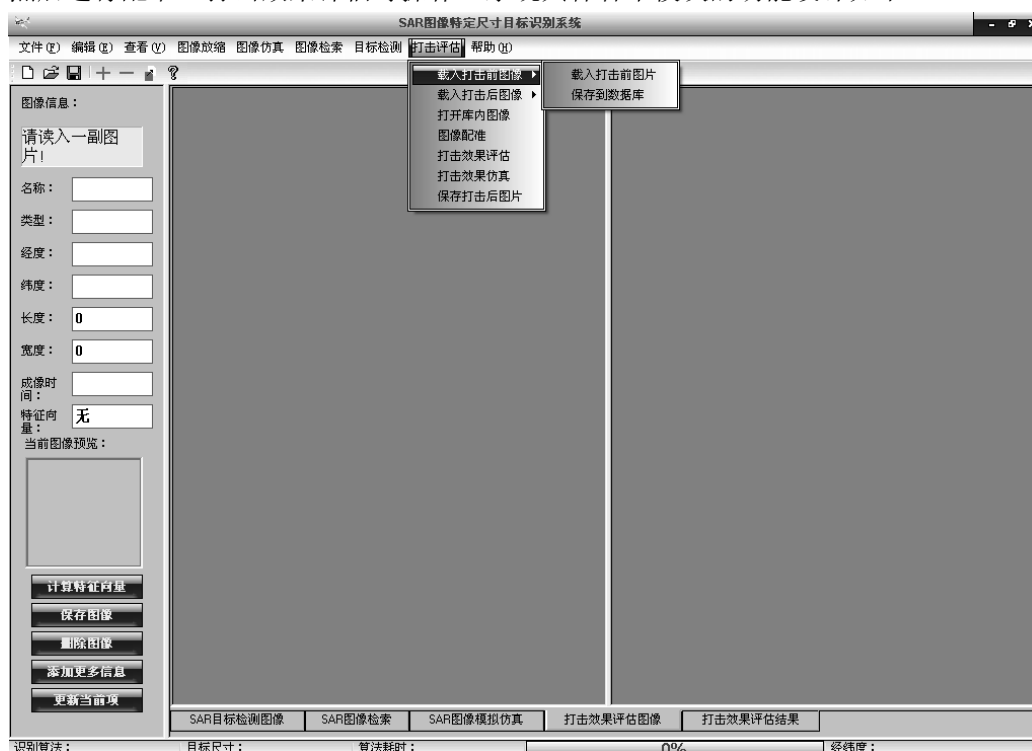


图 5.3 打击效果评估系统界面

一、**打击效果仿真：**针对已有的打击前图像进行打击效果仿真，得到模拟打击后的图像。

软件功能描述：通过鼠标选定目标区域，和打击中心点，输入打击等级和目标材质等级，仿真即可得到选定区域的给定仿真参数的打击效果图像，图 5.4 为打击效果仿真的软件功能对话框。可见，通过输入打击等级、目标材质等级，选择打击仿真区域和打击中心，可以得到大

量不同特点的打击效果仿真图像。



图 5.4 打击效果仿真对话框

二、SAR 图像仿真：在只有某目标区域光学图像的情况下，通过调用 SAR 图像仿真模块，可以得到对应的 SAR 图像。

软件功能描述：首先对光学图像进行预处理操作，使得重要目标的电磁散射情况与实际情况相近。其次输入仿真参数—图像分辨率：光学图像分辨率和需要的 SAR 图像分辨率。最后仿真得到对应的 SAR 图像。其中，光学图像分辨率输入方法有多种选择，可以直接输入，也可以通过选择目标区域，再给出目标区域的长宽，计算得到。SAR 图像仿真对话框如图 5.5 所示。

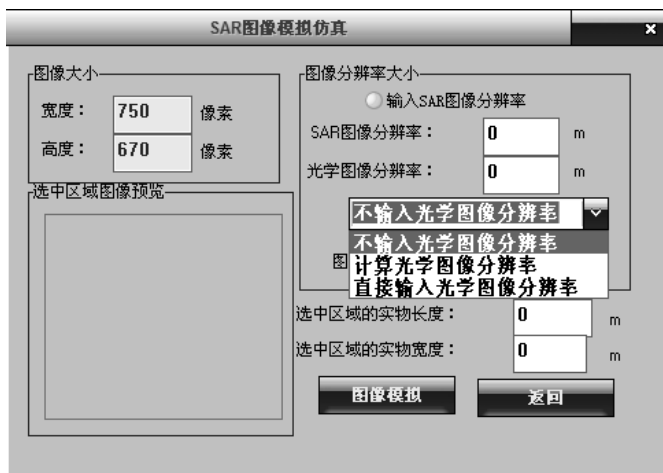


图 5.5 SAR 图像仿真对话框

二、图像配准：打击前后的图像通常是不同时间不同系统所成的像，如图 5.6 所示，图像的场景不能很好的对应起来，需要进行仿射变换，即进行平移、旋转和缩放。

软件功能描述：选择控制点，即先在打击前图像区域(左视图区)选择 3 个控制点，然后在打击后图像区域(右视图区)选择对应的 3 个控制点，如图 5.6 所示，点击“配准”按钮，进行配准，配准结束后，在配准对话框的“平移参数”和“旋转缩放”参数栏显示配准信息。配准结果如图 5.7，可见两图已经对齐。

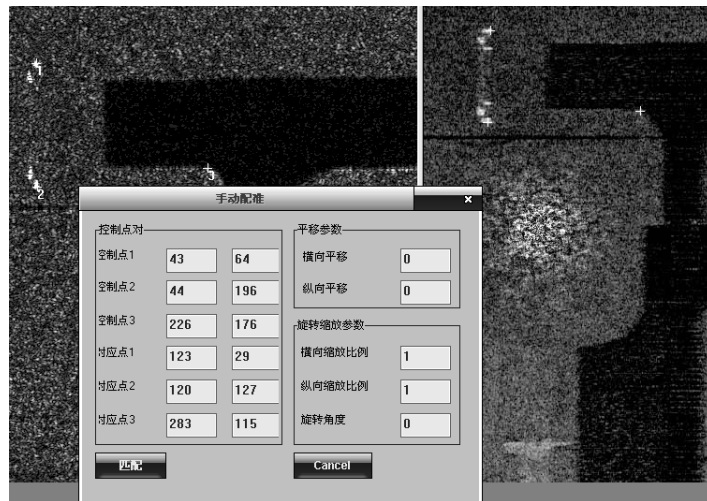


图 5.6 选择控制点

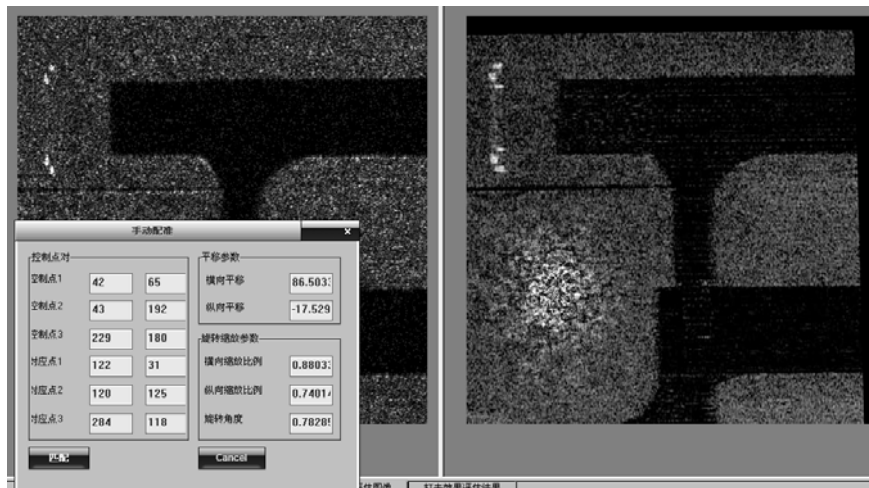


图 5.7 配准后图像

三、打击效果评估：通过前期预处理操作，已经得到待评估且已配准的打击前后图像。软件功能描述：在右视图区点击鼠标左键拖动鼠标，选择需要评估的区域，点击“评估”，如图 5.8 所示。评估结果单独以一个视图页面显示。在“打击效果评估结果”页面内，包括四幅图像：打击前图像、打击后图像、打击后配准后图像、评估结果图像。如图 5.9 所示。评估结果分为 4 级，以不同的灰度进行标注，灰度越大，毁伤越严重。由评估结果图可见，毁伤情况基本按照从中心到外围逐渐减弱的趋势分布。另外，为了方便查看具体某块区域的毁伤情况，可以用鼠标在打击前图像上拖框选择一个小的区域，系统直接用白色线条框出其他三幅图像中的对应区域。并且，鼠标在打击前后原图像上移动时，系统底部状态栏会显示对应点处的经纬度，能够准确提供进一步打击的目标经纬度信息，也为人工评估提供了方便的操作功能。为了显示评估结果栏的整个页面分布情况，这里选择一幅较小的打击前后图像进行评估。

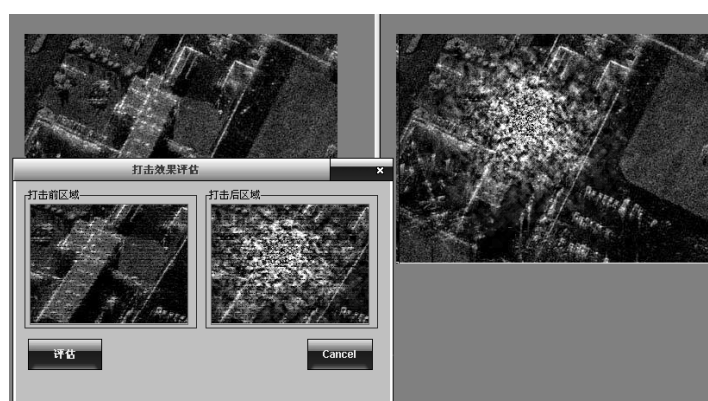


图 5.8 选择评估区域

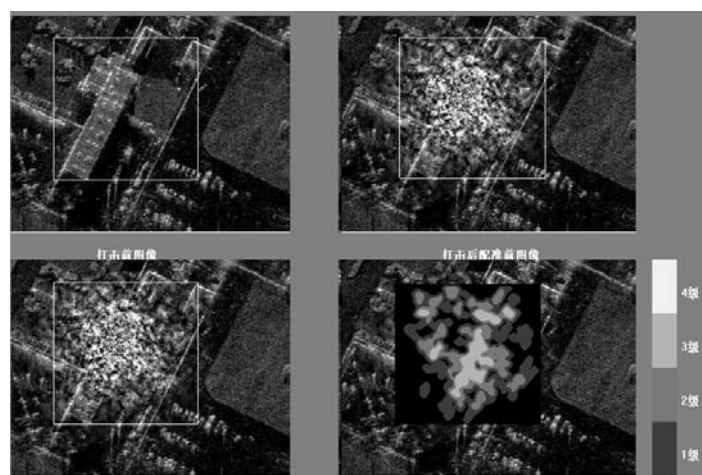


图 5.9 评估结果

5.3 系统设计总结

本文在算法研究的基础上，通过 VC++6.0，Oracle /SQL Sever 9i 数据库具体实现了高分辨率 SAR 图像的打击效果评估系统，涵盖了高分辨率 SAR 图像打击效果评估的各个方面的各个方面，包括评估素材的准备、具体评估算法、评估结果显示等。

本系统能够实现各种不同类型目标区域的高分辨率 SAR 图像打击效果评估，评估结果较为准确，并且符合毁伤分布；评估方法简单明了，有利于操作者的使用和对结果的判断。由于算法直接基于目标区域的变化情况进行毁伤评估，能够对各种不同类型的目标进行打击效果评估，而不需要考虑目标在 SAR 图像中的具体特性，但是也正是由于这种方法的限制，使得其在评估精度上无法达到很高的标准。

在后续系统设计中，如果将基于变化检测的打击效果评估方法和基于目标特征对比的打击效果评估方法结合起来，将会进一步提高系统的评估精度，但是基于目标特征对比的评估方法在评估结果的表示方面也将成为系统设计中的一个难点。

第六章 全文总结及研究展望

6.1 全文总结

基于高分辨率 SAR 图像的打击效果评估技术具有重要的军事意义和良好的应用前景,同时也面临着巨大的困难和挑战,目前仍处于研究阶段。本文主要研究了图像处理的一些关键技术,在 SAR 图像打击效果评估中的应用,并将部分图像处理技术其应用到 SAR 图像打击效果评估系统的实现中去。

总结本论文的工作,包括以下几个方面:

- 1、针对当前高分辨率 SAR 图像的打击效果评估中存在急需解决的问题,提出了打击效果仿真算法和通过光学图像仿真对应 SAR 图像的 SAR 图像仿真算法,从而缓解了打击效果评估研究中缺乏打击后光学图像和 SAR 图像的问题,为打击效果评估研究提供了充足的实验素材。
- 2、研究了 SAR 图像打击效果评估方法和评估过程中的一些关键性的图像处理技术,根据项目的实际需求,设计了基于 SAR 图像的打击效果评估系统的研究方案。对图像配准、图像分割、变换检测、特征提取等关键性图像处理技术做了深入研究。并充分分析了现有的 SAR 图像打击效果评估算法在实际应用中存在的一些问题。
- 3、提出一种能够运用于实际工程的 SAR 图像打击效果评估算法。实验表明该方法能够针对不同成像时间不同成像系统的打击前后 SAR 图像进行打击效果评估,并且评估目标的类型不受限制,具有较强的实用性。
- 4、用 VC++6.0 和 Oracle 数据库设计了一个基于高分辨率 SAR 图像的打击效果评估系统,把本文提出的打击效果仿真方法、SAR 图像仿真方法、人工图像配准方法、打击效果评估方法集成到打击效果评估系统中。

6.2 研究展望

随着打击效果评估技术研究的逐渐深入,评估方法、手段也在不断的提高和多样化。

从横向来看,光学图像、红外图像、SAR 图像以及其他类型图像的海量涌现,使得打击效果评估从单一的光学图像评估分化到红外、SAR 等其他传感器图像的评估,并且多种传感器图像信息的融合、评估将成为研究的重点,多方位、多渠道信息的综合处理和评估成为研究的总体趋势。

从纵向来看,如何更好的利用各种图像处理技术为打击效果评估所用是将来评估技术研究的重点和难点。目前用于打击效果评估中每一个环节的图像处理技术不一定是最适合评估的,选择或者提出更好的、更适合打击效果评估的图像算法需要研究者们花费大量的时间进行分析

和实验。

由于时间等因素的限制,而且基于高分辨率 SAR 图像打击效果评估涉及的内容繁杂,有些问题还有待进一步完善:

1) 进一步完善打击效果仿真技术,精确仿真打击等级与实际打击等级的对应关系。由于本文提出的打击效果仿真算法只给出了打击效果仿真的简单模型,只能够得到毁伤效果图像以及打击等级和毁伤效果的粗略对应关系,对于实际弹药量和毁伤效果的精确对应关系需要通过大量真实毁伤图像做对比分析,对仿真模型进行修正、完善。

2) 改进图像配准方法。本文根据图像处理的实际需要,选用人工配准的方法。随着打击效果评估精度要求的提高,高精度自动配准技术的研究和实现成为必然。考虑到现有的图像自动配准技术对于图像内容的依赖性,可以将不同的图像自动配准方法集成到一个系统中去,先对图像进行分类,然后根据图像所属类别系统自动选用相应的配准算法进行配准。

3) 打击效果评估方法、评估准则的研究。用图像分析的方法研究打击效果评估方法、评估准则无现成的理论和方法,需要在摸索中总结经验,不断进步。

参考文献

- [1] 刘兴堂. 信息化战争与高技术兵器. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- [2] 马波. 基于图像分析的机场打击效果自动评估研究, [华中科技大学硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2004.
- [3] Ma zhijun, Shi quan, Li Bin. Battle Damage Assessment based on Bayesian Network. IEEE Computer Society, 2007, 2:388-391.
- [4] 娄联堂, 汪世宏, 戴祖旭. 基于图像理解舰船打击效果评估数学模型. 佛山科学技术学院学报: 自然科学版. 2006, 24 (2): 20-24.
- [5] 骆渊. 基于图像理解的航母打击效果评估系统研究, [华中科技大学硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
- [6] 席大春. 基于图像理解的桥梁打击效果评估研究, [华中科技大学硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
- [7] 付文宪, 李少洪, 洪文. 基于高分辨率 SAR 图像的打击效果评估. 电子学报, 2003, 31(9): 1290~1294.
- [8] 罗勤, 郭艳丽. 基于舰载无人机的海战场打击效果评估研究. 舰船电子工程, 2008, 28(6): 55~58.
- [9] 翁弘, 任毅, 孙进平. 一种介于 ISAR 的目标打击效果评估方法. 遥测遥控, 2008, 29(3): 54~59.
- [10] Li Xuhui, Ci Linlin, Liu Jiahua, Li Junshan. Research on Battle Damage Assessment. Proceedings of the 7th International Symposium on Test and Measurement. 2007: 1248~1251.
- [11] Ssu-Hsin Yu, Anuj Srivastava, Raman K. Mehra. Automatic Battle Damage Assessment based on Laser Radar Imagery. SPIE, 1999: 210-221.
- [12] 苏娟, 鲜勇, 刘代志. 基于图像变化检测的打击效果自动评估算法. 火力与指挥控制, 2008, 33 (4): 134-137.
- [13] 张继春, 钮强, 徐小荷. 岩体爆破过程中碎块形成规律的分形研究. 金属矿工, 1994, 11: 9-12.
- [14] 李凌丰. 计算机图形理论与实践. 浙江大学出版社, 2007.
- [15] 叶尔骅, 张德平. 概率论与随机过程. 科学出版社, 2005.
- [16] Marconi. SAR simulation concept and tools. Final Report Marconi Research Centre,

Chelmsford Essex, UK, Report MTR 84/34: 109.

[17] Leberl. F. Radar grammetric image processing. Artech House, Norwood, MA, 1990: 595.

[18] 孙尽尧, 孙洪. 自然场景 SAR 图像的仿真. 雷达科学与技术, 2003, 1(4): 210-214.

[19] Gelautz. M, Frick. H, Raggam. J, et al. SAR image simulation and analysis of alpine terrain. ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing, 1998, 53: 17-38.

[20] Kimura. H, Kodaira. N. Simulation and comparison of J ERS-1 and ERS-1 SAR Images. Proc. IGARSS' 93: 1774-1776.

[21] Xu. W. Cumming. B. Simulator for repeat-pass satellite InSAR studies. Proc. IGARSS' 97: 1704-1706.

[22] 姚楠. 基于分形的典型地形建模与 SAR 图像仿真, [南京航空航天大学硕士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2008.

[23] 李凌杰, 王建国, 黄顺吉. 基于真实反射场景 SAR 原始数据模拟. 电子科技大学学报, 1996, 25(6): 566-568.

[24] 汤志伟, 赵志欣, 黄顺吉. SAR 原始数据的模拟研究. 电子科技大学学报, 2000, 29(1): 17-19.

[25] 陈杰, 周荫清, 李春升. 星载 SAR 自然地面场景仿真方法研究. 电子学报, 2001, 29(9): 1202-1205.

[26] 张朋, 黄金等. 合成孔径雷达成像三维地形目标模拟方法. 系统仿真学报, 2005, 17(10): 2403-2405.

[27] 张朋, 黄金等. SAR 图像模拟方法研究. 空军工程大学学报(自然科学版), 2006, 7(3): 26-29.

[28] 张朋, 黄金等. DEM 数据在 SAR 图像模拟中的应用. 弹箭与制导学报, 2007, 27(2): 347-349.

[29] 冈萨雷斯. 数字图像处理 (第二版). 北京: 电子工业出版社. 2003.

[30] 许鹏, 朱文伯, 罗琴. 合成孔径雷达在对海战场目标打击效果评估中的应用分析. 舰船电子工程, 2008, 28: 20-30.

[31] 朱文伯, 陈岛. 海上机动目标打击效果评估决策支持系统设计. 指挥控制与仿真, 2007, 29(1): 34-41.

[32] 成功, 赵巍, 毛士艺. 双阈值 CFAR SAR 目标分割方法. 信号处理, 2007, 23(1): 10-14.

[33] 王义敏, 安锦文, 王若朴. 基于局部双参数估计的 SAR 图像 CFAR 目标检测技术. 火力与指挥控制, 2006, 31(4): 50-52.

- [34] 吴一全, 朱兆达. 图像处理中阈值选取方法 30 年 (1962-1992) 的进展 (一). 数据采集与处理, 1993, 8(3): 193-201.
- [35] 吴一全, 朱兆达. 图像处理中阈值选取方法 30 年 (1962-1992) 的进展 (二). 数据采集与处理, 1993, 8(4): 268-282.
- [36] 朱俊, 王世晞, 计科峰等. 一种适用于 SAR 图像的 2 维 Otsu 改进算法. 中国图像图形学报, 2009, 14(1): 14-18.
- [37] 刘健庄, 栗文青. 灰度图像的二维 Otsu 自动阈值分割法. 自动化学报, 1993, 19(1): 101-105.
- [38] 芦荟, 沈毅. 一种改进的二维直方图的图像阈值分割方法. 系统工程与电子技术, 2004, 26(10): 1487-1490.
- [39] 郝颖明, 朱枫. 二维 Otsu 自适应阈值的快速算法. 中国图像图形学报, 2005, 10(4): 484-488.
- [40] L M Novak, S D Halversen. Effects of polarization and resolution on SAR ATR. IEEE Trans on AES, 1997, 33(1): 102-115.
- [41] Michael C Burl, Gegory J Owirka, et al. Teture discrimination in synthetic aperture radar imagery. Proceedings of the IEEE 23rd Asilomar Conference on Circuits, Systems and Computers. Pacific Gove, CA: ACCSC, 1989, 399-404.
- [42] J I Butterfield. Fractal interpolation of radar signatures for detecting stationary targets in ground clutter. National Telesystems Conference. Atlanta, Georgia: NTC, March 1991: 83-87.
- [43] Daniel E. Kreithen, Shawn D Halversen, et al. A discrimination algorithm and the effect of resolution. IEEE National Radar Conference. London: IEEE NRC, 1993, 128-133.
- [44] Lisa Gottesfeld Brown. A Survey of Image Registration Techniques. ACM Computing Surveys, 1992, 24(4): 325-376.
- [45] BarBara Zitova, Jan Flusser. Image registration methods: a survey. Image and Vision Computing, 2003, 21: 977-1000.
- [46] 黎俊, 彭启民, 范植华. 亚像素级图像配准算法研究. 中国图像图形学报, 2008, 13(11): 2070-2075.
- [47] 冯林, 张名举, 贺明峰等. 用分层互信息和薄板样条实现医学图像弹性自动配准. 计算机辅助设计与图形学报, 2005, 17(7): 1492-1496.
- [48] 杨健, 王涌天, 唐宋元等. 基于互信息量和薄板样条的 X 射线造影图像弹性配准. 电子学报, 2007, 35(1): 127-130.
- [49] 章世平. 基于互信息的遥感图像非线性配准研究, [南京理工大学硕士学位论文]. 南京:

南京理工大学, 2007.

[50] 刘景正. 基于特征的 SAR 影像匹配技术研究, [中国人民解放军信息工程大学硕士学位论文]. 南京: 解放军信息工程大学, 2007.

[51] 翟俊海, 赵文秀, 王熙照. 图像特征提取研究. 河北大学学报: 自然科学版, 2009, 29(1): 106-112.

[52] 郑明玲, 刘衡竹. 遥感图像配准中特征点选择的高性能算法研究及其实现. 计算机学报, 2004, 27(9): 1284-1289.

[53] 王展, 皇甫堪, 万建伟等. 基于多尺度小波变换的二维图像角点检测技术. 国防科技大学学报, 1999, 21(2): 46-49.

[54] 廖斌. 基于特征点的图像配准技术研究, [国防科学技术大学博士学位论文]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008.

[55] 刘莉娜. 图像特征点匹配算法研究, [南京理工大学硕士学位论文]. 南京: 南京理工大学, 2006.

[56] 赵芹, 周涛, 舒勤. 基于特征点的图像配准技术探讨. 红外技术, 2006, 28(2): 327-330.

[57] 刘贵喜, 刘冬梅, 刘凤鹏等. 一种稳健的特征点配准算法. 光学学报, 2008, 28(3): 454-461.

[58] 李博, 杨丹, 张小洪. 基于 Harris 多尺度角点检测的图像配准新算法. 计算机工程与应用, 2006, 35: 37-40.

[59] 马丽涛, 杨丹, 张小洪等. 一种新的基于条件数的图像配准算法. 中国图像图形学报, 2008, 13(2): 277-283.

[60] 邵聃, 金立左. 一种图像拼接的点特征匹配算法. 东南大学学报, 2008, 38, 增刊(2): 150-153.

[61] 孙瑾, 顾宏斌, 秦小麟等. 一种鲁棒型 Hausdorff 距离图像匹配方法. 中国图像图形学报, 2008, 13(4): 761-767.

[62] 陈富龙, 张红, 王超. 高分辨率 SAR 图像同名点自动匹配技术. 中国图像图形学报, 2006, 11(9): 1276-1281.

[63] Youcef Bentoutou, Nasreddine Taleb, Kidiyo Kpalma, et al. An automatic image registration for applications in remote sensing. IEEE Transaction on Geoscience and remote sensing, 2005, 43(9): 2127-2137.

[64] Charles S. Kenney, B. S. Manjunath, Marco Zuliani, et al. A condition number for point matching with application to registration and postregistration error estimation. IEEE Transaction on patten analysis and machine intelligence, 2003, 25(11): 1437-1453.

[65] 邓鹏. 边缘与灰度结合的 SAR 图像配准方法研究, [中国科学院研究生院硕士学位论文论

文]. 北京: 中国科学院电子研究所, 2003.

[66] 刘小军, 周越, 凌建国等. 基于轮廓特征的 SAR 图像自动配准. 计算机工程, 2007, 33(4): 176-178.

[67] 黄勇, 王建国, 黄顺吉. SAR 图像匹配算法及实现. 信号处理, 2003, 19 (2): 179-181.

[68] Xiaolong Dai, Siamak Khorram. A feature-based image registration algorithm using improved chain-code representation combined with invariant moments. IEEE Transaction on Geoscience and remote sensing, 1999, 37(5): 2351-2362.

[69] Shuang Wang, Jing Xiao, Licheng Jiao, et al. Fast and accurate automatic SAR image registration using seven invariant moments and improved chain coding of region boundaries. Proc.of SPIE:MIPPR, 2007, 6787: 67871-1-7.

[70] 施云飞, 朱国富, 罗鹏飞. 基于相位相关法的 SAR 图像配准. 计算机仿真, 2007, 24(9): 210-213.

[71] 王年, 范益政, 鲍文霞等. 基于图割的图像匹配算法. 电子学报, 2006, 34 (2): 232-236.

[72] 邱庆军, 徐可欣, 蒋景英等. 结合小波变换与相位相关的图像匹配方法. 2003, 19 (5): 469-472.

[73] 刘斌, 彭嘉雄. 图像配准的小波分解方法. 计算机辅助设计与图形学学报, 2003, 15 (9): 1070-1073.

[74] 焦李成, 张向荣, 侯彪等. 智能 SAR 图像处理与解译. 北京: 科学出版社, 2008.

[75] 王鑫, 赵春辉. 基于 ERDAS IMAGINE 软件系统在图像配准中的应用. 电站系统工程, 2005, 21(2): 59-60.

[76] 姜涛, 马国锐, 秦前清. 基于遥感影像的变化检测技术. 计算机应用研究, 2005, 2: 255-257.

[77] 熊博莅, 蒋咏梅, 匡纲要. 基于粗配准 SAR 图像变化检测方法. 现代雷达, 2007, 29(9): 39-41.

致 谢

本文是在张弓教授的悉心指导下完成的。我衷心的感谢他在论文的选题，研究和撰写的全过程中给予的悉心指导，以及在我攻读硕士学位期间从学习，工作和生活等方面给予的教育，培养和关心。张老师为人正直、儒雅，学识渊博，治学严谨，工作勤奋。这些不仅给我留下了深刻的印象，而且鞭策我在今后的人生道路上始终以实事求是和兢兢业业的态度对待学习，工作和生活。

感谢两年来与我朝夕相处的其他师兄弟们：杨萌，刘东，崔鹏，刘洋涛，常宝，成玲，徐晶，余国辉等。在科研中，我经常得益于和他们的交流和讨论，在生活上，我也常能得到他们的热情帮助。

最后，要特别感谢我的父母亲。在过去的二十多年里，他们无怨无悔，默默的辛勤劳作，将我养大成人，在生活上给予我无微不至的关怀，分担我的忧愁，分享我的喜悦。也感谢我的姐姐和姐夫一直以来对我的支持和鼓励。

在学期间的研究成果及发表的学术论文

攻读硕士学位期间发表（录用）论文情况

宛苏成，张弓，成玲.打击效果仿真研究.计算机应用研究.录用，拟发表在 2010 年第 6 期-第 7 期月刊上。