

上海交通大学硕士学位论文

## 星载 SAR 分布式目标成像质量评价方法

硕 士 研 究 生：过嘉嘉

学 号：1130349119

导 师：王开志 副研究员

副 导 师：

申 请 学 位：工程硕士

学 科：电子与通信工程

答 辩 日 期：2016 年 1 月

授予学位单位：上海交通大学

Dissertation Submitted to Shanghai Jiao Tong University  
for the Degree of Master

**QUALITY EVALUTAIION METHOD FOR  
DISTRIBUTED TARGET IMAGING OF  
SPACEBORNE SYNTHETIC APERTURE RADAR**

<b>Candidate:</b>	Guo Jiajia
<b>Student ID:</b>	1130349119
<b>Supervisor:</b>	Wang Kaizhi
<b>Assistant Supervisor:</b>	
<b>Academic Degree Applied for:</b>	Master of Engineering
<b>Speciality:</b>	Electronic and Communication Engineering
<b>Affiliation:</b>	School of Electronics, Information and Electrical Engineering
<b>Date of Defence:</b>	Jan,2016
<b>Degree-Confering-Institution:</b>	Shanghai Jiao Tong University

# 上海交通大学

## 学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：

日期：        年    月    日



## 星载 SAR 分布式目标成像质量评价方法

### 摘要

合成孔径雷达 (SAR, 全称为 Synthetic Aperture Radar) 是当前众多微波成像传感器使用最为普遍和广泛的仪器之一。作为获取微波遥感图像信息的技术手段之一, 合成孔径雷达不仅仅在军事领域 (如军事目标的侦察) 中发挥重要的作用, 它也被广泛的利用在民用的范畴, 总之, 在生活的多方面, SAR 所发挥的功能和作用越来越大。

与光学成像不同的是微波成像是通过主动发射信号成像。首先雷达产生电磁波信号并发射, 发射的电磁波穿过介质照射到需要成像的目标场景, 之后电磁波反射回来, 被雷达接收机接收到。可以通过对获得的回波进行从原始回波到图像的成像处理实现地理图像复原。因此雷达图像是微波图像中的一种特殊图像, 由于合成孔径雷达在军事目标的识别和发现以及民用遥感探测中所发挥的作用日益变大, 并越来越被广泛的使用, 因此, 对图像的应用广度, 场景, 有效性, 进行研究和分析有很重大的现实意义和实际需求, 对 SAR 图像质量的评估也有特别重要的价值和应用的前景, 由于与光学图像形成的原理并不雷同, 合成孔径雷达图像是主动发射微波并获得回波进行分析成像的, 因此, 有一定的特殊性, 所以对合成孔径雷达图像的质量判读和评估与传统其他被动成像的图像并非一样, 合成孔径雷达图像存在与众不同的质量问题, 使得 SAR 图像的解读和分析显得困难, 如果解读和分析不准确或者不精确最终影响 SAR 图像的应用, 因此, 对 SAR 图像质量评估和 SAR 图像的应用的研究具有重要的意义。

本论文首先对 SAR 成像的算法进行了描述和说明, 因为对图像质量进行评估的前提是从原始的回波数据经过成像得到 SAR 图像, 论文

的后续重点就是对传统 SAR 图像质量评估指标从数学定义和物理意义进行说明和详细描述，并指出其优缺点，并对比的提出星载 SAR 分布式目标成像质量评价指标与方法。

本文重点研究基于以上的 SAR 图像质量评估指标，进行软件平台的高精度的仿真验证得到最后实际的实验数据，之后，拓展的提出成像链的概念，忽略成像链中的所有环节，只考虑成像链的开始端口和终端输出对质量进行描述，最后结合 SAR 图像质量评估的主观评价方法进行总体说明。

另外，本文对目前已有的 SAR 图像质量评估指标和技术进行了整体评价，并说明了以后发展的方向和技术研究的前景。

**关键词：**合成孔径雷达，成像算法，传统图像质量指标，分布式图像质量指标，主观图像质量评价 高精度计算 质量综合评价

# QUALITY EVALUATION METHOD FOR DISTRIBUTED TARGET IMAGING OF SPACEBORNE SYNTHETIC APERTURE RADAR

## ABSTRACT

Synthetic aperture radar (SAR) is the main technology of microwave imaging sensor. As a technique to acquire the information of microwave remote sensing image, Synthetic aperture radar is playing a more and more important role in the field of civil and military detection.

Microwave imaging is a way of active imaging, Radar transmit electromagnetic waves, which are irradiated in the target, and then reflect back to the radar receiver, Getting the geographic image by means of signal processing, So the radar image is a kind of microwave image, Because of the important role of SAR in military and civil application, It has practical significance and application prospect to judge the quality of SAR image, Therefore, It is very important for SAR image quality assessment and its application.

Firstly, This paper describes and illustrates the algorithm of SAR imaging, The premise of image quality assessment is from the original echo data after imaging to get SAR images, The follow-up focus is on the traditional SAR image quality evaluation parameters from the mathematical definition and physical meaning and detailed description, then pointed out its advantages and disadvantages, And proposing SAR distributed target imaging quality evaluation method.

In this paper, Focusing on the SAR image quality evaluation parameters based on the above introduced, The high accuracy of the software platform to simulate the experimental data, After that, the concept of the imaging chain is extended, and all the links in the imaging chain are ignored, and the quality of the starting port and the terminal output of the imaging chain is considered. And finally combined with the subjective evaluation method of SAR image quality evaluation, Getting the final

comprehensive quality assessment.

In addition, In this paper, An overall evaluation about SAR image quality evaluation parameters and technology is given, then give an introduce of the future development of SAR image quality evaluation technology.

**KEY WORDS:** synthetic aperture radar(SAR), Imaging algorithm, traditional quality parameters, distributed image quality parameters, subjective image quality evaluation, high precision computation, comprehensive evaluation of quality.



## 目 录

第一章 绪论 .....	1
1.1 研究背景及意义 .....	1
1.2 合成孔径雷达原理和发展历史 .....	2
1.3 SAR 使用的价值和应用的的重要意义 .....	2
1.4 SAR 图像应用的重要性 .....	3
1.5 SAR 图像质量评估发展现状与趋势 .....	4
1.6 项目研究的情况说明以及研究重点说明 .....	5
第二章 合成孔径雷达成像算法 .....	6
2.1 SAR 的不同工作模式 .....	6
2.2 合成孔径雷达成像算法概况 .....	7
2.2.1 距离多普勒算法 .....	7
第三章 现有星载 SAR 成像质量指标与方法 .....	9
3.1 成像质量和图像质量的界定 .....	9
3.2 现有图像指标体系图像类型以及图像产品分类 .....	10
3.3 现有星载 SAR 图像质量指标 .....	10
3.3.1 分辨率 .....	10
3.3.2 峰值旁瓣比 .....	12
3.3.3 积分旁瓣比 .....	13
3.3.4 图像动态范围 .....	13
3.3.5 等效噪声系数 .....	14
3.3.6 辐射分辨率 .....	14
3.3.7 图像饱和度 .....	15
3.3.8 图像量化位数 .....	16
3.3.9 辐射线性度 .....	16
3.3.10 辐射精度 .....	17
3.3.11 模糊度 .....	18
3.3.12 测绘带宽度 .....	22

3.3.13 几何校正精度 .....	23
3.4 一些质量指标对军事侦察的影响和需求分析 .....	24
3.4.1 分辨率指标对军事目标侦察的影响和需求分析 .....	24
3.4.2 旁瓣电平对军事目标侦察的影响 .....	25
3.4.3 系统灵敏度指标对军事目标侦察的影响和需求分析 .....	26
3.4.4 模糊度指标对军事目标侦察的影响和需求分析 .....	27
3.5 现有 SAR 卫星图像质量指标体系优缺点及分布式目标体系的提出 .....	28
3.5.1 现有星载 SAR 图像质量指标体系的优点 .....	28
3.5.2 现有星载 SAR 图像质量指标体系的不足 .....	29
3.5.3 星载 SAR 分布式目标成像质量指标的提出 .....	30
3.5.4 星载 SAR 分布式目标成像质量指标优势 .....	31
<b>第四章 星载 SAR 分布式目标质量评价指标 .....</b>	<b>32</b>
4.1 空间频率调制度比 .....	32
4.1.1 空间频率的定义 .....	32
4.1.2 调制度的定义 .....	33
4.1.3 场景调制度的定义: .....	33
4.1.4 图像调制度的定义: .....	33
4.1.5 空间频率调制度比的定义: .....	33
4.1.6 空间频率调整度比的测量方法 .....	34
4.1.7 基于空间频率调制度比的成像质量评价方法 .....	35
4.2 点簇扩散函数 .....	35
4.2.1 指标的作用与意义 .....	36
4.2.2 指标的定义 .....	36
4.2.3 点簇扩散函数场景设计思路 .....	36
4.2.4 指标场景示意图和实地拍摄图 .....	37
4.3 平面栅格分辨率 .....	38
4.3.1 指标的意义与作用 .....	38
4.3.2 指标的定义 .....	39

4.3.3 测试的靶标设置与环境要求.....	39
4.3.4 指标测量的基本方法.....	41
4.3.5 平面栅格分辨场景设计思路.....	41
4.3.6 指标场景示意图和实地拍摄图.....	41
4.3.7 各项客观指标总体说明.....	42
4.4 SAR 图像质量指标实验分析.....	42
4.4.1 SAR 图像质量指标背景分析和图像来源说明.....	42
4.4.2 指标计算的具体处理和各项参数定义.....	43
4.4.3 获取点目标冲激响应和高精度计算原理.....	46
4.4.4 点目标冲激函数的获取以及各指标的具体计算.....	46
4.4.5 分析与总结.....	50
第五章 SAR 图像质量主观评价.....	51
5.1 SAR 图像质量主观评价提出的必要性.....	51
5.2 SAR 图像质量主观评价的内容和方法.....	51
5.2.1 SAR 图像主观评价人员安排.....	52
5.3 图像质量主观评价的各项国际标准.....	52
第六章 总结和展望.....	54
6.1 工作总结及创新点.....	54
6.2 后续工作展望.....	55
参 考 文 献.....	56
致 谢.....	59
攻读硕士学位期间已发表或录用的论文.....	60

## 图 录

图 1-1 SAR 系统研制与 SAR 图像质量评估、应用的关系图 .....	4
图 2-1 合成孔径体制的成像原理图 .....	7
图 2-2 距离多普勒域的 RCMC .....	8
图 3-1 SAR 系统数据处理和图像产品生产示意图 .....	9
图 3-2 雷达照射系统几何示意图 .....	11
图 3-3 实际点目标成像场景摆放图 .....	12
图 3-4 点目标脉冲响应旁瓣比示意图 .....	12
图 3-5 距离向模糊示意图 .....	19
图 3-6 方位向模糊示意图 .....	20
图 3-7 成像带宽示意图 .....	23
图 3-8 星载 SAR-X 波段不同分辨率条件下成像对比 .....	25
图 3-9 星载 SAR 3m 分辨率 X 波段强散射点示意图 .....	26
图 3-10 不同系统灵敏度条件下成像结果对比 .....	27
图 3-11 某海军基地模糊信号图 .....	28
图 3-12 “端对端”的成像质量描述方法 .....	31
图 4-1 空间频率场景 .....	32
图 4-2 不同空间频率的场景及成像效果对比 .....	32
图 4-3 测量空间调制度比的场景设定 .....	34
图 4-4 机场 SAR 图样 .....	36
图 4-5 点簇测试场景布置 .....	37
图 4-6 实际场景与雷达成像拍摄图 .....	38
图 4-7 平面栅格测试靶标示意图 .....	40
图 4-8 栅格立体示意图及其组合模式 .....	40
图 4-9 成像场景示意图 .....	41
图 4-10 实际场景拍摄图以及 SAR 图像 .....	42
图 4-11 完整的雷达 SAR 图像 .....	43
图 4-12 SAR 图像用于分析的切片 .....	44
图 4-13 ScanSAR 中的冲激响应函数 .....	47
图 4-14 SAR 图像中的点目标和插值后的剖面图 .....	47
图 4-15 距离向（方位向）分辨率计算过程 .....	48

## 表 录

表 3-1 模糊度分析的成像结果.....	21
表 3-2 主要场景判读指标示意图.....	24
表 4-1 合成孔径雷达图像各项参数仿真计算结果.....	49
表 5-1 国际规定的图像质量评价绝对尺度.....	53
表 5-2 国际规定的图像质量评价相对尺度.....	53

# 第一章 绪论

## 1.1 研究背景及意义

随着现代科学技术的飞速发展，人们对于国防安全和地理情况的了解需求越来越高，但对于一个范围广阔的场景和特定目标进行测绘不是人工所能达到的，而传统的光学成像由于受到平台，技术，和天气与环境的限制，在上述领域的使用能力有限，同时效果并没有那么理想，因此遥感技术的应用就突显出了格外的优势，合成孔径雷达（SAR，其全称名为 Synthetic Aperture Radar）是当今世界众多微波成像传感器的类型之一。作为一种获取微波遥感图像信息的技术，合成孔径雷达在民用遥感和军事侦测领域的角色越来越重要<sup>[1]</sup>。

微波成像是一种主动成像。雷达发射出电磁波信号，发射的电磁波信号照射在物体上，随后电磁波信号进行返回（类似于光波照射到一个物体后进行返回），雷达接收机接收到返回的电磁波信号。通过信号处理的方式还原出地理图像。因此雷达图像是一种微波图像，表示的是目标对电磁波的反射强度。由于电磁波能够穿透云层，因此雷达作为一种通过主动发射电磁波获取回波进行分析的航天、航空遥感手段，它的特性是具有任意时间任何环境都可成像（全天时，全天候工作）。广泛应用于对地观测，军事侦察，海上目标检测，灾害评估以及地理测绘等军事和民用方面。目前国际上的主要大国都争先发展自己的合成孔径雷达技术，发射合成孔径雷达卫星来实现高分辨率对地监测，保护国家利益。

由于合成孔径雷达在民用方面和军事探测方面都有发挥着重要的作用，使用合成孔径雷达的频率也越来越高，广度也越来越大，因此对于 SAR 图像的质量评估工作和 SAR 图像的应用前景进行分析也越来越有价值。但是与光学图像不同的是，SAR 图像的形成是主动成像，所以有其特殊性，同时也导致了 SAR 图像存在与传统图像不一样的特殊的质量问题，使得对 SAR 图像的分析并非容易，如果对雷达图像的解读分析准确度不高或者精度不高将会对 SAR 图像的使用造成十分严重的影响，因此，开展对 SAR 图像质量评估和其应用的研究有十分重要的意义。而本论文的重点就是对传统 SAR 图像质量评估指标进行说明，并加以说明传统的合成孔径雷达图像质量指标的目前存在的缺点与不足，并对现有的指标进行补充完善，并在充分考虑目前的质量指标不足的基础上，提出星载合成孔径雷达分布式目标成像质量评价方法，最后充分考虑 SAR 图像的主观质量评价，并结合图像

的实际应用得到关于 SAR 图像质量的整体综合评估。

## 1.2 合成孔径雷达原理和发展历史

合成孔径雷达的基本原理是通过雷达传感器和检测到的场景之间的相对运动，形成一个较大的虚拟孔径，最后通过对信号进行分析处理得到图像，分辨率主要受信号带宽影响<sup>[2][3]</sup>。在方位向上 SAR 主要利用相对运动产生的多普勒效应并进行信号处理获得高分辨率。合成孔径雷达技术从上个世纪五十年代提出到现在经历了孕育研究时期、成长期和蓬勃发展期，目前该项技术已经非常成熟。由于 SAR 是主动发射微波并接收回波进行分析成像，不受日照状况等条件限制<sup>[4]</sup>；并且受天气、气候等因素影响很小。因此星载 SAR 是目前各类高分辨率成像手段中一种非常重要的具备全天候全天时成像观测能力的传感器系统。

合成孔径雷达的概念最早起源于二十世纪五十年代初期，至今已有六十多年的历史。美国的科学家率先研制合成孔径雷达，证实合成孔径雷达能获得高分辨率图像，从此合成孔径雷达进行快速发展阶段。从 1960 年开始合成孔径雷达在军事侦查中开始崭露头角，并随之慢慢发挥重要的用途，随后在六十年代中期也逐渐开始应用于民用领域，并能得到大量的高质量，高分辨率的图像<sup>[5]</sup>，七十年代，合成孔径雷达的类型经历了从机载慢慢发展到星载的过度，合成孔径雷达的第一次成功试验是“阿波罗 17 号”的 SAR 系统，它被装载在用于登月的宇宙飞船中。进入二十一世纪以来，各大国都加入到了星载合成孔径雷达遥感阵营。德国发射了五颗 SAR-Lupe 卫星。加拿大，韩国，意大利，英国等都在开始展开相关的研究，可见 SAR 成像卫星在国家战略中具有重要的地位。

我国合成孔径雷达技术，经过三十余年的研究和发展，在中科院电子所，北航，清华，西电等一批研究所和高校的带动下，取得了一系列重大的科研成果。建立起从天线到信号处理整套的研究体系。为我国的应急监测和国防建设做出了重要的贡献。

## 1.3 SAR 使用的价值和应用的的重要意义

合成孔径雷达是一种有源微波成像设备，利用接收信号分析目标的特性。与其他遥感技术相比，如红外线或可见光，在大多数应用中，合成孔径雷达拥有一些光学成像不具备的特别的优势，因为它是主动成像，所以可以在任意时间，任

意环境，不被天气状况和其他环境所干扰，可以用来完成如下工作，航天的遥感观测与侦查、大面积的海洋观测、图像的匹配制导等<sup>[6] [7] [8]</sup>。它能发现隐藏的目标和被伪装的场景，例如，识别光线不能穿透的被云雾覆盖的地面目标和伪装在地面以下的导弹发射井等情况<sup>[9]</sup>。特别对于那些气候恶劣、交通不是很方便，地质地貌显得比较复杂的地区、SAR 为地貌地形的描绘和地质材料和属性的研究工作提供了有力的工具。合成孔径雷达可以对高山、湖面或江面、地势比较的平原、丘陵等大的地形进行成像并得到地形特征，SAR 还可以用于灾害发现与灾情预测方面，通过扫描灾害发生地的雷达图像<sup>[10] [11]</sup>，可以确定火灾的起火点和主要受害区域和灾情的主要蔓延方向，通过对潮汐的成像，可以分析出水势的涨落和水灾面积，可以通过雷达得到天气云图等来分析未来的天气，合成孔径雷达还可以用于对地球以外的天体进行成像的探测，如探测金星和土星的地质地貌<sup>[12] [13]</sup>。

由于合成孔径雷达可以在不同频率与不同波段进行成像，所以 SAR 得到了快速的发展，同时合成孔径雷达的类型也在不断的扩大中发展，从早期的不同类型的实孔径成像雷达，发展到用于不同目的的合成孔径雷达，例如机载 SAR，星载 SAR 和航天飞机载等。目前世界上有许多国家将对合成孔径雷达技术的研究看作显示本国高新科技发展水平的重要指标，并把高新科技的发展水平作为体现国家综合实力的一个标准，因此，我国的几大研究院校和科研机构开展了对合成孔径雷达技术的研究。

## 1.4 SAR 图像应用的重要性

从近几年的对自然灾害，如地震以及环境监测、资源勘查、灾害救援、气象预报等领域的探索 and 发现来看，合成孔径雷达在遥感领域中的突出表现，是研究和应用的最重要的前沿领域之一。但是，解决合成孔径雷达的图像质量的判定和评估却是比较困难的，因为对 SAR 图像质量的影响是多元化的，一类来自合成孔径雷达系统，包括雷达系统，校准系统，成像算法，散斑噪声、阴影、叠加、透视收缩等几何变形；另外一类决定图像质量的因素与成像的场景有关，比如目标的物理形状与运动速度以及本身的其他属性等。

合成孔径雷达的应用价值主要取决于图像的质量。在一般情况下，合成孔径雷达图像质量越高，应用价值越大，应用的概率越高，SAR 质量评估与 SAR 系统研制，SAR 图像应用三者之间有着互相促进和影响的关系，SAR 图像质量评估连接着 SAR 系统研制和 SAR 图像应用，它可以为 SAR 系统的研制提供依据和反馈



意见,另外,SAR 图像应用的发展促进了 SAR 系统的研制和提高。因此,通过 SAR 图像质量评估,可以促进 SAR 图像的应用,并反馈相关信息给 SAR 系统研制,如图 1-1 所示。这样,建立起一种更全面,更加精确的,使用者能明白的全方位的新途径。

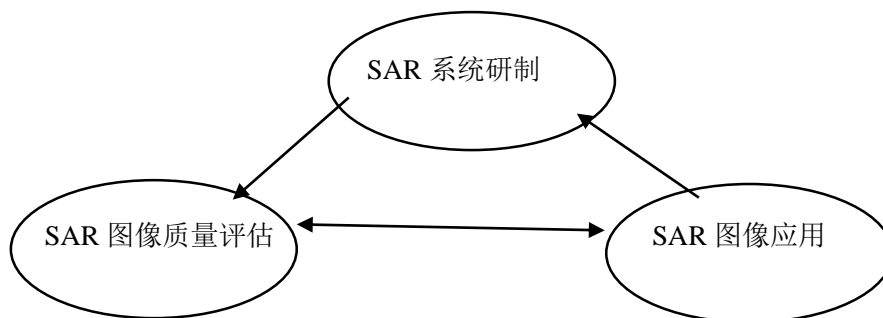


图 1-1 SAR 系统研制与 SAR 图像质量评估、应用的关系图  
Figure 1-1 SAR system development and image quality assessment,application

## 1.5 SAR 图像质量评估发展现状与趋势

由于 SAR 图像的成像原理是主动发射线性调频信号,通过物体对电磁波的后向反射得到回波并成像,但这种成像方式具有很强的斑点噪声 (speckle noise),并且伴随重影问题、增益、以及运动模糊等特殊的质量问题。能够形成对合成孔径雷达图像质量进行评估显得尤为重要,但纵观目前国内外合成孔径雷达系统的发展,合成孔径雷达图像的应用和系统研制间存在很严重的脱节现象,表现在用户获得合成孔径雷达图像后,对于质量的评估并没有与图像的使用范围有效性联系起来动态的全面的分析,而是表现为对 SAR 图像单纯的图像层面的分析,所以对于合成孔径雷达图像质量问题仍然停留在光学角度,采用类比法对合成孔径雷达图像进行光学评价,而合成孔径雷达图像具有许多自身的特点,其质量评价方法也不同于光学,而且对于合成孔径雷达图像质量评价应该结合其应用,对图像的不同侧重点进行不同的评估,同时不同的评估主体对图像评估的着眼点也是不同的,图像中对于不同类型和地质或材料的地物目标的评价的方式和方法也应是不同的。对图像质量评估的一般方法可以分为主观方面的评估和客观方面的评估。由测试者获得图像后对获得的图像直接进行评估得到的主观评估。而客观评估则不同,客观评估是首先通过定义一些进行质量评估的若干指标,并且这些指标按照权重有所区分,然后通过建立图像指标模型,按照指标进行客观计算得到结果,达到与人的主观评估类似或者相等的要求。但由于合成孔径雷达图像的特殊性,不能完全用对一般图像的客观评价方法来评估 SAR 图像。但现有的合成孔径雷达

图像质量评估参数与图像的应用无关，仅对图像特征进行描述，而目前常用的合成孔径雷达图像的评估是基于点目标和面目标两个层面来进行的，这种划分方式利于图像质量评估系统的实现。然而，在一般情况下，以上的两种评价指标都是直接从图像层面进行的，但并没有有效的方式来评价和表示合成孔径雷达图像内容（如增益、重影、模糊等）等方面的质量，但这些质量问题在合成孔径雷达图像中的解决尤其重要。

由此可以看出，形成一个全方位包含点目标，面目标，SAR 图像内容等的 SAR 图像质量评估已经成为一个重要的课题，并且有很重要的实际意义。

## 1.6 项目研究的情况说明以及研究重点说明

本论文的研究目标是以一代详查微波成像 A/B 星、0.3 米分辨率微波成像卫星和海洋宽幅微波成像侦察卫星为研究背景，以现有在轨“尖兵五号”和“尖兵七号”卫星为基础，深入分析在轨卫星成像质量问题，研究图像质量评估体系和评价方法，开展高分遥感卫星图像以及应用效果评价，建立遥感卫星图像质量综合评价系统，以确保相关图像质量指标的实现和 SAR 图像的应用效果。军事目标侦察对 SAR 卫星图像质量的需求分析，通过 SAR 图像质量指标对应用效果的影响分析，研究军事目标侦察对 SAR 卫星图像质量的需求，特别是分辨率与系统灵敏度等关键指标对 SAR 图像应用效果的影响程度。SAR 图像质量的面目标综合性评价指标与军事目标侦察能力的关系，大场景与分布式目标反演能力对军事目标侦察的影响和需求分析，特征及参数反演能力对军事目标侦察的影响。

## 第二章 合成孔径雷达成像算法

### 2.1 SAR 的不同工作模式

随着时代的发展，合成孔径雷达的类型越来越多元化，也发展出了不同工作模式的雷达，合成孔径雷达的类型和工作模式不同，说明使用该合成孔径雷达的目的不同，所以对于图像质量中不同指标的要求也不一样，对于类型的分析和成像算法的分析，是分析图像质量的大背景和大前提，目前主要包含的合成孔径雷达的工作模式主要描述如下：

#### （1）条带式合成孔径雷达

英文名是 **Stripmap**，这种模式的工作原理是雷达被装载固定在飞行器上，并且雷达的天线与飞行器材保持相对静止，天线的指向随着飞行器而变化，天线对地面进行均匀扫描，得到的图像也是连续的图像。这种模式体现为对地面类似于一个条带成像，SAR 的飞行速度和飞行器一样，所成的像的面积就是飞行器扫描过的面积，并且在这种模式下，天线的长度决定了方位向的分辨率。

#### （2）聚束式合成孔径雷达（Scan SAR）

在这种模式下，合成孔径雷达也被固定在飞行器上，但是与条带式不同的是，飞行器上装载的雷达天线并不是和飞行器保持相对静止，而是在成像的过程中，雷达的天线始终指向地面的某一个区域，在这种情况下，相对于地面而言，天线的移动速度为零。

#### （3）逆向合成孔径雷达（Inverse SAR，简称 ISAR）

逆向合成孔径雷达的工作模式是指某个需要成像的照射的目标在移动而雷达保持不动，与传统意义的 SAR 的工作方式的原理恰好相反。

#### （4）干涉合成孔径雷达（InSAR）

在该工作模式下，图像是通过复数来传输的，目标地形高度和对应的目标地形的位移可以通过这种特殊的图像进一步的处理来得到，通过对两幅同一地理位置或地理位置非常接近的复数 SAR 图像进行共轭处理，就可以得到一幅等高度线或者等位移线的干涉 SAR 图像。

虽然合成孔径雷达有不同的工作模式，但是合成孔径体制的成像原理是一样的，如图 2-1 所描绘的那样。

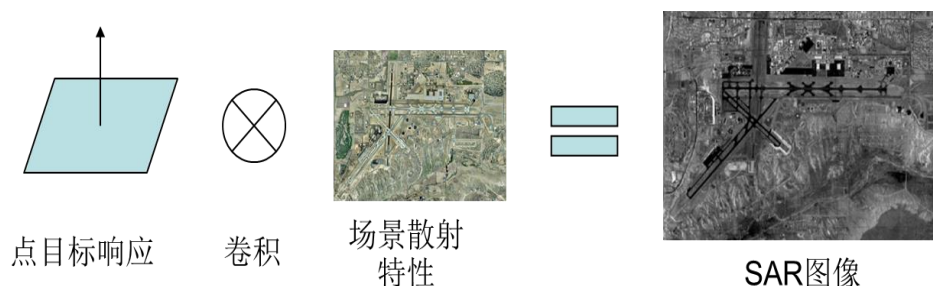


图 2-1 合成孔径体制的成像原理图  
Figure 2-1 Imaging principle of SAR

## 2.2 合成孔径雷达成像算法概况

由于雷达的图像质量直接决定并影响雷达图像的使用范围,和使用的有效性,因此,对于合成孔径雷达的成像提出了高质量的要求,成像算法的优劣直接影响了雷达的图片质量,因此有效有针对性的选择算法来实现从原始回波到图像,显得尤其重要。目前雷达领域的主要成像算法有以下描述的几种,第一,距离多普勒(Range-Doppler, RD)算法,该算法比较经典。目前它已经被广泛应用于不同成像模式的合成孔径雷达成像,比如正侧视的成像处理中,第二常用的算法是线性调频尺度变换(Chirp-Scaling CS)算法,该算法通过弯曲均衡化处理实现了在同一方位向上的不同距离向处的距离徙动曲线具有一致的弯曲程度,在此基础上再对方位向和距离向进行处理。第三种比较常见的成像算法是 $\omega k$ 算法,首先对原始信号进行二维的FFT变换将SAR信号变换到二维的频域,然后通过参考函数的相乘和进行Slot插值,最后通过二维的IFFT变换将信号重新变回到时域(即图像域),结合项目中的实际需要,下面介绍在成像中常用的算法,也就是距离多普勒算法。

### 2.2.1 距离多普勒算法

为实现对SEASAT SAR数据的处理,在1978年距离多普勒算法被提出,在1978年实现了一幅机载SAR数字图像的处理。它被广泛的应用,这种算法具有很多优点,首先它将距离向和方位向在不同的域实现了分开处理,在对单独处理的时候,实现了类似一维的处理方式。RCMC是在距离时域-方位频域中实现的,造成这种算法被称其为距离多普勒算法的原因是多普勒频域与方位频率的值一致,在距离多普勒域实现距离徙动校正,所有的匹配滤波卷积通过频域相乘实现,可以有效地提高了算法的效率,在RDA算法中的所有运算都是基于一维数据的,所

以实现起来更加简便和有更高的效率。

RDA 算法的整体过程描述如下，首先，对处在方位域的数据通过卷积实现距离压缩。对距离向快速傅里叶变换之后，对距离向进行匹配滤波，接着利用傅里叶逆变换实现距离向压缩。第二，通过方位向的傅里叶变换将数据变换到距离多普勒域，并对多普勒中心频率进行估计，并在该区域进行后续的计算。第三，在距离多普勒域进行 RCMC，使得同一距离上的目标轨迹实现重合，通过距离徙动校正实现了将距离向的徙动曲线移动到与方位频率保持一致的位置。第四，在相同距离门的频域匹配滤波，用来完成对方位向的压缩的目的。第五，在方位向 FFT 反变换变换回到时域，得到最后的图像，整个过程的描述如下图所示。

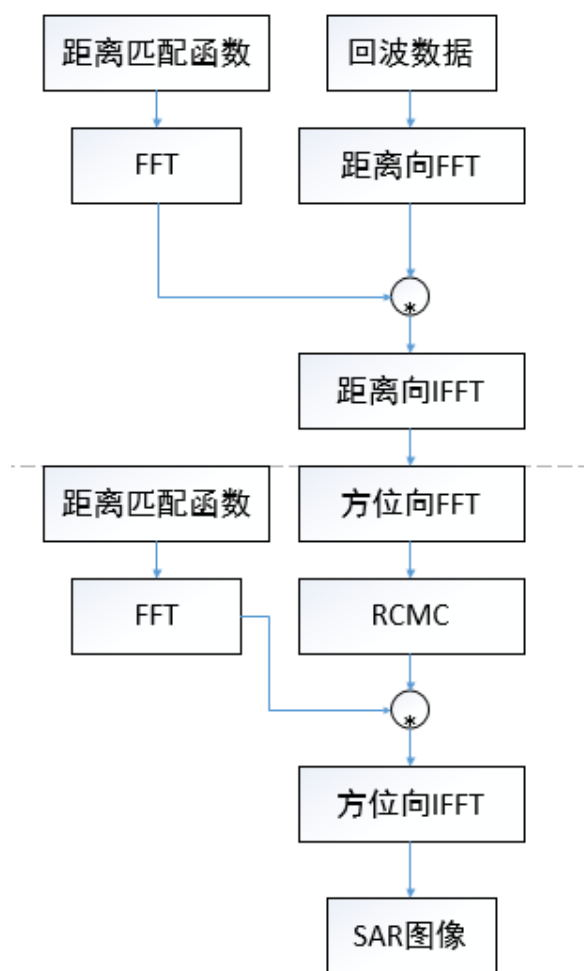


图 2-2 距离多普勒域的 RCMC  
Figure 2-2 Range Doppler domain RCMC

### 第三章 现有星载 SAR 成像质量指标与方法

#### 3.1 成像质量和图像质量的界定

为有效的区分指标的对象，将指标体系进一步分解为成像质量指标和图像质量指标体系两个部分，为此首先需要对成像质量和图像质量进行明确的界定。下图中给出了 SAR 系统由侦照到数据处理和图像产品生产的基本流程示意图。

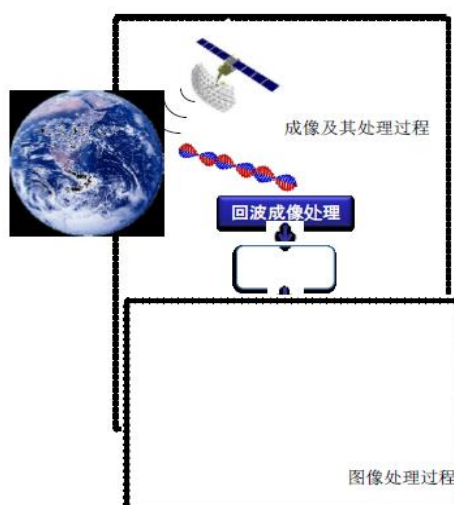


图 3-1 SAR 系统数据处理和图像产品生产示意图  
Figure 3-1 Data processing and image production of SAR system

SAR 卫星的成像质量指标是影响图像质量指标的成像系统（卫星平台、SAR 载荷、数据传输、成像处理）指标和描述成像系统产生的图像的质量的相关指标。就狭义的成像质量指标而言，主要是数据成像处理环节影响图像质量指标的性能指标，反映了地面成像处理方法的性能，包括一级产品中描述图像质量的指标（如：分辨率、积分旁瓣比、辐射精度）和部分二级产品描述图像质量的指标（如：图像畸变（相对定位误差））以及一些描述成像处理性能的指标（如：成像处理拓展系数、成像处理引起的辐射误差等）。成像质量是对 SAR 系统及其地面成像处理子系统的性能描述，是系统级别的描述指标，而图像质量指标则更多侧重特定的一幅图像的质量问题，通常仅是反映系统的局部性或多种因素综合影响的最终质量问题。

### 3.2 现有图像指标体系图像类型以及图像产品分类

目前, 现有的图像质量指标体系包含的图像类型有: 单视复数图像、斜距图像、系统几何校正后图像、几何精校正图像、正射校正图像等。星载合成孔径雷达数据与图像产品的分类与分级具有通用性, 应适用于条带、扫描和拘束等多种工作模式。目前, 国内采用的星载合成孔径雷达数据与图像产品的分类与分级将数据与图像分为 0~4 级产品, 定义如下。

0 级产品: 按照斜距组织存储的复数形式的未经成像的条带模式雷达回波数据信号及相应的辅助数据产品, 为合成孔径雷达图像的 0 级产品。

1 级产品: 对 0 级产品经过成像处理和辐射校正处理得到的斜距图像。

2 级产品: 利用轨道数据对 1 级产品通过斜地变换和根据相应地图投影模型进行投影处理得到的地理参考与地理编码图像产品。

3 级产品: 利用图像上的 GCP 数据, 依据几何纠正模型建立图像坐标和地面坐标之间的几何方位关系, 对 1 级产品图像首先进行几何精纠正处理, 最后按照指北方向重采样得到地理编码图像产品。

### 3.3 现有星载 SAR 图像质量指标

目前描述 1 级图像产品的质量的指标主要包含图像分辨率 (距离向分辨率与方位向分辨率)、积分旁瓣比、成像带宽、峰值旁瓣比、辐射定标精度 (包括相对、绝对定标精度)、辐射分辨率 (图像视数)、图像模糊度 (包括距离向和方位向图像模糊度)、系统灵敏度等<sup>[14][15][16]</sup>。

描述 2~4 级产品的质量指标有分辨率、积分旁瓣比、辐射定位精度 (包括相对、绝对定标精度)、辐射分辨率 (图像视数)、图像模糊度 (包括距离向和方位向图像模糊度)、系统灵敏度、图像绝对位置误差和相对位置误差。

#### 3.3.1 分辨率

从 SAR 图像中获取点目标的剖面图, 方位向 (或距离向) 分辨率描述的是点目标冲激响应沿方位向 (或距离向) 半功率点 (也就是 3dB 点) 的主瓣宽度所对应的空间长度<sup>[4]</sup>。若 SAR 的地面入射角为  $\eta$ , 在普通的机载 SAR 系统中, 可以考虑它与雷达天线的下视角  $\gamma$  基本相等, 则距离向分辨率  $\rho_g$  与斜距分辨率  $\rho_r$  之间的关系为:

$$\rho_g = \frac{\rho_r}{\sin \eta} \quad (3-1)$$

在距离向上，一维波前调制凝视成像采用脉冲压缩技术，因此距离向分辨率的计算方法与合成孔径体制相同。在第三章脉冲压缩的分析中，压缩后的 3dB 分辨率理论值在时间量纲下为距离向带宽的倒数，转换为距离量纲需乘以  $c/2$ ，故距离量纲下的斜距分辨率可表示为以下公式：

$$\rho_{range} \approx \frac{c}{2|K|T} = \frac{c}{2B} \quad (3-2)$$

其中  $B$  为信号带宽。由于上述公式表示的是斜距下的分辨率，因此要将其转换到水平面上。雷达照射系统示意图为图 3-2 所示，其中清晰的展示了斜距方向与地面方向之间的关系。

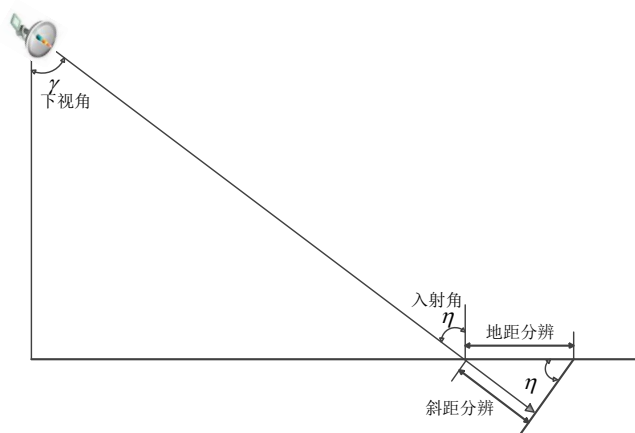


图 3-2 雷达照射系统几何示意图  
Figure 3-2 Radar illumination system

转换后系统的地距分辨率为：

$$\rho = \frac{\rho_{range}}{\sin(\eta)} \quad (3-3)$$

其中  $\eta$  为信号的入射方向与垂直于地面方向的夹角，理想情况下它与雷达天线的下视角相等。

分辨率用来说明的是在合成孔径雷达图像中能够识别出来的两个目标之间（方位向，距离向，或斜距）的最小距离在实际场景中对应的距离。若两目标之间的距离小于上述的最小距离时，则有可能不能清晰的被区分开，反之，能够清晰地区分目标。





图 3-3 实际点目标成像场景摆放图

Figure 3-3 Actual point target imaging scene display

### 3.3.2 峰值旁瓣比

在雷达系统中，峰值旁瓣比是反映成像质量的另外一个极其重要的指标。峰值旁瓣比描述了点目标冲激响应函数的旁瓣的最高峰值和主瓣的峰值的比值（一般用分贝数表示），其中包含了距离向峰值旁瓣比和方位向峰值旁瓣比两种。

峰值旁瓣比这个参数的大小表征了在 SAR 图像上强目标的反射能力对弱目标的反射能力的“遮掩”程度，这种能力与峰值旁瓣比的值是线性正比例的关系。在一般情况下，具有更好的质量要求的 SAR 图像要求该值是小于-20dB，在成像处理中使用泰勒加权等方式来降低峰值旁瓣比<sup>[17]</sup>。

数学表达式如下：

$$PSLR \approx 10 * \lg \frac{P_S}{P_M} \quad (3-4)$$

在上述表达式中  $P_S$  为最高旁瓣值， $P_M$  为主瓣的峰值，示意图如下所示：

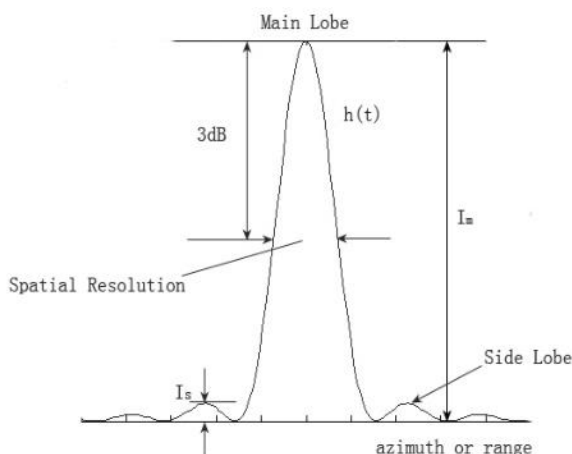


图 3-4 点目标脉冲响应旁瓣比示意图

Figure 3-4 Sidelobe ratio of point target pulse response

峰值旁瓣比的大小反映的是强散射目标点对弱散射点的“掩盖”程度。该值越小，说明相对而言旁瓣的值越小，也说明了在这种情况下图像的质量高。

### 3.3.3 积分旁瓣比

对于合成孔径雷达系统而言，积分旁瓣比是反映成像质量的另外一种重要指标。积分旁瓣比描述是点目标冲激响应旁瓣能量之和与主瓣总能量的比，通常包含有距离向积分旁瓣比和方位向旁瓣比两种。

积分旁瓣比表征较暗的局部区域(弱信号)被来自周围的明亮的区域(强信号)信号能量“混入”所“淹没”的程度,也表征抑制相邻面目标引起图像灰度变化的能力,积分旁瓣比这个指标的评定也是基于点目标的点目标冲激响应函数测定的。

积分旁瓣比分为距离向和方位向，其通用公式为

$$ISLR = 10 \lg \frac{E_s}{E_m} \quad (3-5)$$

其中  $E_m$  是主瓣能量:

$$E_m = \int_a^b |h(\tau)|^2 d\tau \quad (3-6)$$

$E_s$  是旁瓣能量:

$$E_s = \int_{-\infty}^a |h(\tau)|^2 d\tau + \int_b^{+\infty} |h(\tau)|^2 d\tau \quad (3-7)$$

示意图如上所示:

积分旁瓣比的值越小，说明相对而言旁瓣的能量值越小，也说明了在这种情况下图像的质量高。该值通常用于说明图像局部的对比度，它表征的是周围图像比较暗的区域被其旁边的亮的目标能量所淹没的程度。由于在积分旁瓣比中使用的是积分运算，由于积分运算具有稳定性，所以该指标所具有的稳定特征，使得它能够更好的描述目标旁瓣对周围比较弱的点的影响程度，所以整体说来，积分旁瓣比指标是是对峰值旁瓣比指标的补充，它也比峰值旁瓣比更有效的评价质量的指标。

### 3.3.4 图像动态范围

图像的动态范围描述的是图像中的最强目标与最弱目标的强度值之比（用分贝表示），动态范围表明了这幅 SAR 图片的最大后向散射系数和最小后向散射系

数的比值。动态范围表征的是 SAR 图像中最暗点的值与最亮点的值之间的值的幅度范围。一般而言，动态范围越大，表现出来的灰度层次越丰富。

由于全球地物目标的散射特性变化比较大，使得 SAR 卫星图像的动态范围变化很大。即使是在一景图像内地物目标的散射特性变化也很大，使系统的图像饱和或低散射目标消失，如：海陆交界区域。所以可以把图像动态范围作为定性指标而不是定量指标。

数学表达式如下：

$$D = 10 \lg \frac{T_{\max}}{T_{\min}}$$

$$D = 10 \lg \frac{A_t}{A_{bg}} \quad (3-8)$$

其中  $T_{\max}$  表示最大灰度值， $T_{\min}$  表示最小灰度值。SAR 图像动态范围定性的说明了在图像中具有不同属性特征的目标后向散射系数之间的不同。计算方法如上所示， $A_t$  对应目标区域的均值， $A_{bg}$  对应背景区域均值。图像动态范围反映的是目标场景和背景间在图像上的灰度值之差，该值大有利于对图像进行分析解读。

### 3.3.5 等效噪声系数

等效噪声系数等于在最后的图像中的雷达的加性热噪声电平得到的后向散射系数值，在理想的情况下，当后向散射系数为零时，雷达发射脉冲信号原本接收不到回波信号，但在真实的场景中，后向散射系数并不为零，因为存在加性的热噪声。等效噪声系数用来描述系统灵敏度，系统灵敏度表征的是对弱小目标的观测能力，反映了 SAR 能够成像的后向散射系数下限，若系统灵敏度的指标不高会对弱散射目标的图像应用造成一定影响，无法识别目标（如军事应用中阵地的状态），其是 SAR 图像军事应用的主要指标之一，通常这个指标越高越好。

理想状态下，当某个场景的实际后向散射系数为零时，在 SAR 图片中的灰度值也应该为零，但是在实际中有灰度值，该值的大小即为等效噪声系数，数学表达式如下：

$$NE\sigma^0 = 10 \lg T_{\min} \quad (3-9)$$

### 3.3.6 辐射分辨率

辐射分辨率是由合成孔径雷达系统识别的后向散射系数的最小变化，辐射分辨率是衡量合成孔径雷达系统灰度分辨率的标准，一般而言，辐射分辨率的值越

小表示 SAR 图像的去斑效果越好<sup>[18]</sup>。

图像辐射分辨率是定义 SAR 图像质量的重要指标之一,在图像后向散射系数反演,海洋信息提取等应用中具有重要参考和评估使用价值,辐射分辨率是衡量合成孔径雷达系统灰度级分辨能力的一种量度,该指标的大小描述了合成孔径雷达图像的去斑效果,辐射分辨率越小表示去斑效果越好,同时也说明图像的质量高,对于军事侦察应用而言,对于图像的质量要求高,所以辐射分辨率越低越好。

其数学表达式如下:

$$\begin{aligned}\Gamma &= 10\lg \left( \frac{1}{\sqrt{ENL}} + 1 \right) \\ &= 10\lg \left( \frac{\sigma_I}{\mu_I} + 1 \right)\end{aligned}\quad (3-10)$$

其中  $\mu_I$  是整个图片的灰度均值,而  $\sigma_I$  是图像的标准差。ENL 是图像的等效视数。

辐射分辨率的大小取决于合成孔径雷达图像中的斑点噪声的强度,斑点噪声抑制算法的效果越好,说明通过噪声抑制后图像的辐射分辨率越高。

### 3.3.7 图像饱和度

在实际的 SAR 图像中强目标的数值通常会造成溢出(像素值溢出),因为强散射点的目标在 SAR 图像中的灰度值比较大,这个值远大于最高像素值,虽然可以储存(用最高像素值来储存,这样在反映出来的实际值变小),导致雷达横截面积会被低估,所以图像饱和度是一个比较重要的指标,在计算其他指标的时候要考虑图像是否饱和,否则对于其他指标的计算就没有意义.对于军事侦察而言,对于图像是否饱和的考核要求更高。

在图像中部分目标如集装箱码头,油罐和密集的建筑区域,其后向散射系数远远高于背景场景,不可避免的使得该类目标出现饱和问题,降低图像的分辨率能力,图像的强散射目标如建筑物群、港口、大型舰船的细节表现能力不强。图像的细节表现能力受到极大的制约。

在量化噪声的情况下,系统的动态范围必须同时适应较低杂波和较强散射点目标的采样要求。尤其是在高分辨率图像中,强目标的数据通常会造成溢出。虽然这样的数据仍旧可以储存,但是在上述情况中目标的雷达横截面积就会被低估(即小于真实值),也就是说如果某个点目标是强点目标,其后向反射系数过大的话,在 SAR 图片的数据存储只是存最大值,存在失真。

在使用或评估一幅 SAR 图像的时候,首要的任务就是进行图像饱和度的评估,一般而言,存在饱和的图像区域,因为存在失真,一般不能用来定量的计算其他

指标。

### 3.3.8 图像量化位数

量化描述的是对模拟信号实现数字的过程，量化确定了数字化后图像的动态范围，而图像量化是指对原始的模拟的图像灰度值进行数字化处理，因此图像量化位数决定了 SAR 图像的显示动态范围。为了保存丰富的地物目标信息，合成孔径雷达信号回波都 16 比特进行量化存储，与普通灰度图像使用 8 比特存储不同，但是在 SAR 图像的显示动态范围是有限的，比 SAR 图像数据本身的动态范围小得多，因此，如果直接对原图显示会丢失很多细节信息，使得图像发生失真<sup>[19]</sup>。

图像量化位数表征了在数字域层面对图像的储存位数，图像量化位数决定了 SAR 图像的显示动态范围，合成孔径雷达信号回波都 16 比特进行量化存储，与普通灰度图像使用 8 比特存储不同，但是在 SAR 图像的显示动态范围是有限的，比 SAR 图像数据本身的动态范围小很多，远远小于 SAR 图像数据本身的动态范围，因此，如果直接对原图进行显示一定会丢失很多细节信息，造成图像的严重失真，但是显示的时候只能用 8bit，也有较大误差，对于军事侦查应用而言，结合 SAR 图像的人工判读和细节展示的需求，合理的控制 SAR 聚焦数据的动态范围损失效果，对数据进行可视化增强处理，使得 SAR 图像既忠实的反映场景的散射细节又适合后续的应用与判读需求

图像的量化位数的确定可以通过从整幅图像的属性中得到结果，对于图像量化位数的选择应该考虑图像中的细节信息，又要考虑后续的显示和判读的需要。

### 3.3.9 辐射线性度

辐射线性度误差是指在 SAR 图像的动态范围内，图像反演出的地物目标后向散射系数与地物目标的真实后向散射系数的线性误差。它表征的是图像反演出的地物目标与地物目标的真实后向散射系数是否可以理想的保持正常值比例关系（线性关系）的一种度量。由于辐射线性度反映了 SAR 成像是否可以理想的保持正常值比例关系（线性关系）的一种度量<sup>[20]</sup>，如果在 SAR 图片中并没有像在实际场景那样按真实按照比例显示，可能使得判读人员造成误判，辐射线性度越高，能够提高军事侦查准备度。

数学表达式为：

$$\Delta l_{\Delta} = \frac{\text{Max}\{|\sigma_i^0 - \sigma_i|\}}{|\sigma_N^0 - \sigma_0^0|} \quad (3-11)$$

其中  $\sigma_i^0$ ,  $i=0,1,2, N$ , 为地物目标的真实后向散射系数,  $\sigma_i$ ,  $i=0,1,2, N$ , 为图像反演出的地物目标后向散射系数。

### 3.3.10 辐射精度

辐射精度包含如下几个方面的指标

#### ①绝对辐射精度:

绝对辐射精度是在雷达图像上测定目标后向散射系数或雷达截面积绝对值的最大误差。也就是目标后向散射系数或雷达截面积的测量和它的真实值之间的误差。

#### ②相对辐射精度(一景内):

一景图像内的相对辐射精度的定义是在同一景雷达图像内不同位置, 对于具有相同后向散射特性目标测量相对值的最大误差。

#### ③相对辐射精度 (两景间):

分别在两景图像内任意位置, 对具有相同后向散射特性目标测量相对值得最大误差。

辐射测量精度表征 SAR 系统测量地面后向散射系数  $\sigma_0$  精确程度的技术指标, 简称辐射精度。SAR 系统的辐射精度, 是通过包括内定标和外定标的辐射定标过程来实现的, 与相对定标和绝对定标相对应, 辐射精度分为相对辐射精度和绝对辐射精度。

当实际的场景的后向反射系数相同, 但是在 SAR 图片中显示了不同灰度, 就代表相对辐射精度不高, 而两景内的相对辐射精度是指对于同一实际的场景, 在两个 SAR 图片中出现的灰度不同。由此可见辐射精度反映了卫星对不同物体的探测能力, 有些场景后向散射系数不同但是在 SAR 图像中却灰度值一致, 也反映了同一目标在不同图片中的灰度不同, 可以用来说明合成孔径雷达成像的可靠性和准确性, 高辐射精度的系统可准确的获得图像和目标识别所需的信息, 提高了目标背景分类识别能力。

对于具有相同后向散射特性目标的测量值分别为  $S_1$  和  $S_2$ , 则它们的相对误差定义为:

$$\mathcal{E} = \frac{E\{(S_1 - S_2)^2\}}{(E\{S_1^2\} + E\{S_2^2\}) / 2} \quad (3-12)$$

#### ①绝对辐射精度的数学定义如下:

$$AA = 10\lg(1 + \varepsilon_0) \quad (3-12)$$

其中  $AA$  为一景图像内的相对辐射精度 (dB) :  $\varepsilon_0$  是在图像内测定目标后向散射系数或雷达截面积的最大相对误差值 (比值)。

②相对辐射精度 (一景内) 的数学定义如下:

$$RA_1 = 10\lg(1 + \varepsilon_1) \quad (3-13)$$

其中  $RA_1$  为一景图像内的相对辐射精度 (dB) :  $\varepsilon_1$  是在同一场景图像内测定目标后向散射系数或雷达截面积的最大相对误差 (比值)。

③相对辐射精度 (两景间) 的数学定义如下:

$$RA_2 = 10\lg(1 + \varepsilon_2) \quad (3-14)$$

其中  $RA_2$  为两景图像之间的相对辐射精度 (dB) :  $\varepsilon_2$  为在两景图像之间测定的目标后向散射系数或雷达截面积的最大相对误差 (比值)

### 3.3.11 模糊度

模糊度包含距离向模糊度和方位向模糊度, 观测带宽度 (成像带宽度) 内各分辨单元方位向频域混叠或距离 (斜距) 时域混叠所引入的模糊图像强度 (功率) 与相应观测单元内图像强度 (功率) 之比, 称为图像模糊度 (ASR) [21]。

成像模糊是指雷达接收无用信号的回波并与有用信号混叠在一起对目标进行成像处理, 导致成像结果出现偏差的现象, 而这种影响对成像结果造成的模糊程度的指标称为模糊度。模糊度是一项非常重要的技术指标, 它将成像质量以量化形式反映, 以便不同技术的成像质量利用数值形式进行比较。一般的雷达成像技术在模糊度上都会有一定的要求, 如果模糊度指标很差, 会严重影响到成像技术的结果, 甚至造成对目标错误判断和解读。

模糊度在合成孔径体制技术中一般被分在距离向和方位向两方面进行度量。因为一维波前调制凝视成像体制在距离向的处理与合成孔径技术相同, 所以距离向模糊度问题也与合成孔径技术相同。观察如下图, 如果时刻  $t$  雷达接收到第  $q$  个脉冲经第  $i$  个距离门后的回波信号, 与此同时第  $q - k_1$  个脉冲照射非观测区以外的 B 区某距离门后的回波信号或者第  $q + k_2$  个脉冲照射非观测区域以外的 C 区某距离门后的回波信号也到达接收机, 这样的现象导致不同脉冲的回波信号被混叠在一起, 对有用信号造成了干扰。理论上, 时刻  $t$  接收的非第  $q$  个脉冲的回波都属于模糊信号范畴。这些信号的特点是同有用回波信号相比脉冲信号发射的时间差与回波传输的时间差数值相等, 符号相反。

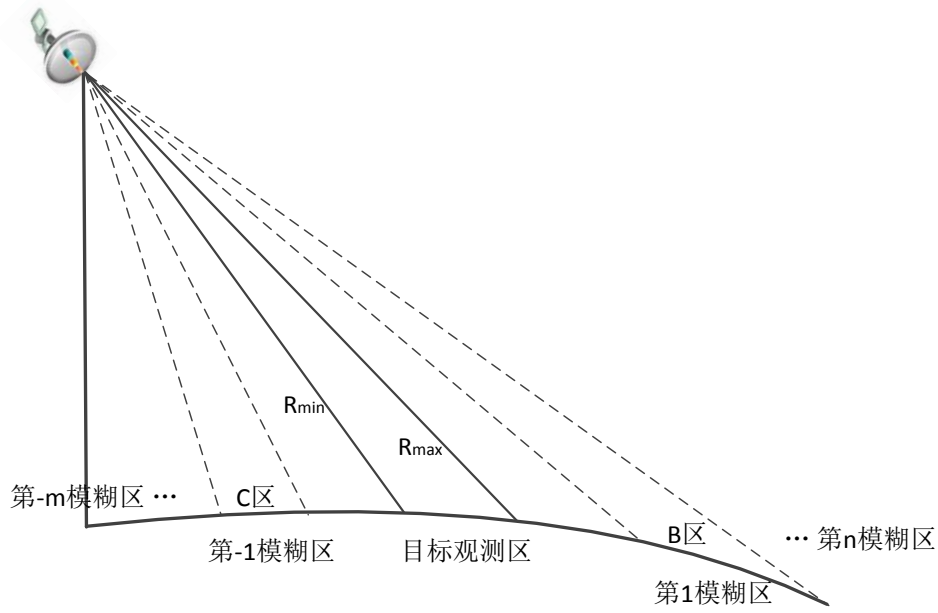


图 3-5 距离向模糊示意图  
Figure 3-5 Ambiguity of distance direction

假设雷达发射脉冲的持续时间为  $T$ ，相邻脉冲间相差时间  $t$ 。对造成距离模糊的区域进行如上图所示的编号（编号方式为观测区远端  $1 \sim n$ ，观测区近端  $-1 \sim -m$ ），则第  $j$  模糊区满足：

$$\frac{2R_{j\max} - 2R_{\max}}{c} = j(T+t) \quad (3-15)$$

$$\frac{2R_{j\min} - 2R_{\min}}{c} = j(T+t) \quad (3-16)$$

其中  $R_{\min}, R_{\max}$  分别为观测区域最近距离门斜距和最远距离门斜距， $R_{j\min}, R_{j\max}$  分别为第  $j$  模糊区最近距离门斜距和最远距离门斜距。

将斜距方向映射到地面即可求出各模糊区区域范围。根据以上分析对距离向模糊度定义为式 3-18 所示：

$$RASR = \frac{\sum_j \text{第} j \text{模糊区回波信号强度}}{\text{观测区域回波信号强度}} \quad (3-17)$$

在方位向上，由于一维波前调制凝视成像技术与合成孔径技术不同，因此其模糊度计算也不相同。凝视成像技术由于没有雷达与场景之间的相对运动，因此不存在多普勒效应，这里的模糊主要是由旁瓣信号混叠造成的，如图 3-6 所示。



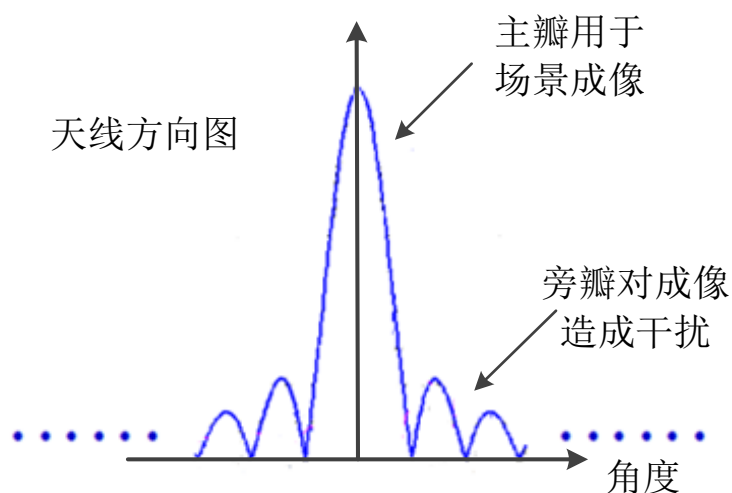


图 3-6 方位向模糊示意图  
Figure 3-6 Azimuth ambiguity

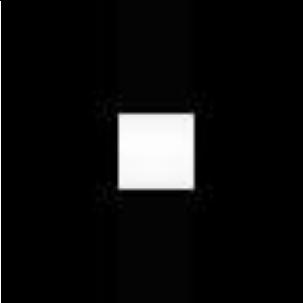
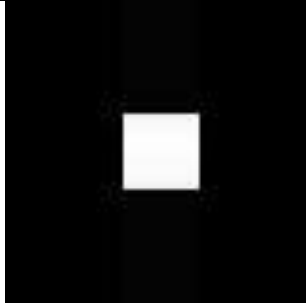
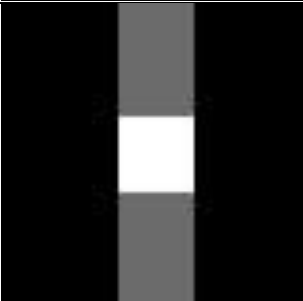
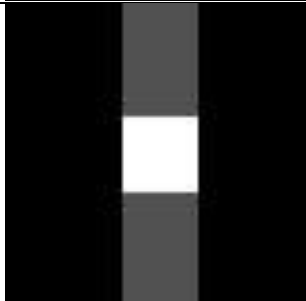
在工程上，一般为了保证雷达回波信号可以被接收机识别接收，其发射信号波束只使用-3dB 范围内的主瓣信号。但是由于波前调制技术是将调制系统放在发射天线前端，无法自动选取主瓣信号进行调制，所以接收机收到的回波信号是主瓣信号与旁瓣信号混叠的结果。在方位向关联处理方面，一般按照主瓣的波前调制结果进行处理，这样会造成成像结果的模糊，称为方位向模糊。对方位向模糊度进行定义如式 3-19 所示：

$$AASR = \frac{\text{旁瓣照射回波功率}}{\text{主瓣照射回波功率}} \quad (3-18)$$

在合成孔径体制中由于相对运动的存在，模糊的影响会造成成像结果中出现一些较弱的目标图像，这些图像与主目标图像所处位置不同，因而会产生类似影子的现象，称为“鬼影”。而在凝视成像体制中，模糊信号在理论上仅会造成波前调制矩阵的偏差，这样的偏差不会造成重影，其影响作用与系统中的噪声形式类似。如果将旁瓣影响和机器波前调制因素手动加入到系统波前调制测定中，根据凝视成像体制方位向关联处理原理，理论上成像结果中的这些模糊可以消除。另外如果在系统中通过加窗滤波方式将旁瓣平滑，成像模糊可以得到良好的抑制。

实验中发射的脉冲信号方向图为典型的 SINC 型，选取主瓣内-3dB 范围内的信号作为有用信号，第一旁瓣为-13.6dB。目标场景正中间为一个正方形的强散射区域，其后向散射系数为 1，四周散射系数为 0。成像结果如表 3-1 所示。

表 3-1 模糊度分析的成像结果  
Table 3-1 Imaging results of ambiguity analysis

Table 3: Imaging Results of Amplitude Analysis				
	增加旁瓣回波的成像结果		未加旁瓣回波的成像结果	
原始 成像 结果				
原始 图像 取对 数值的 成像结 果				

表中第二行是增加模糊后的成像结果与理想成像结果对比，直接观察两者没有明显的区别，模糊影响较小。为了增强可观性，对成像结果进行对数处理（旨在将模糊影响带来的误差放大显示）得到第三行的成像结果。图中可以看到灰色部分增加模糊的图像比理想图像略浅，但是差别不大。从以上结果可看出旁瓣对成像结果的模糊影响较小<sup>[25] [26]</sup>。

模糊度是一项非常重要的系统设计指标，它同图像质量密切相关，当图像的模糊度指标很差时，形成鬼影，将会严重影响到 SAR 图像的解译和判读，并将直接影响到图像的军事应用，由于模糊度会形成图像中的虚假目标，模糊度主要影响对目标判读的准确率及目标细节的描述能力，模糊度指标越小越好，但考虑工程可行性，X 波段 SAR 图像的模糊度指标一般在-25dB 到-20dB 的范围内确定

(1)距离向模糊度：

①用图像估算距离向模糊度方式：

距离向模糊度被定义为：

$$RASR = \frac{\text{距离向模糊区内回波信号总功率}}{\text{测绘带内回波信号总功率}} \quad (3-19)$$

②用雷达各项参数精确获取距离向模糊度表达式：

距离向模糊度被定义为：

$$RASR = \frac{\int \frac{G_r(x) \cdot \sigma_0(x)}{\sin \theta_i(x) \cdot R^3(x)} dx}{\int_s \frac{G_r(x) \cdot \sigma_0(x)}{\sin \theta_i(x) \cdot R^3(x)} dx} \quad (3-20)$$

其中,  $\sigma_0$  为目标后向散射系数,  $G_r$  为距离向天线双程增益,  $S$  表示测绘带  $R$  为斜距,  $\alpha$  为模糊区范围。对距离模糊度造成巨大影响的因素包含天线方向性图, 对应的脉冲重复频率以及斜距离。同时由于姿态误差所导致波束中心指向在距离向发生偏移  $x_e$  时, 式中  $G_r^2(x)$  变为  $G_r^2(x-x_e)$ , 也会影响距离模糊度的值。

(1) 方位向模糊度:

① 用图像估算距离向模糊度方式:

距离向模糊度被定义为:

$$AASR = \frac{\text{距离向模糊区内回波信号总功率}}{\text{测绘带内回波信号总功率}} \quad (3-21)$$

② 用雷达各项参数精确获取方位向模糊度表达式:

方位向模糊度被定义为:

$$AASR = \frac{\sum_{j=-\infty}^{\infty} \int_{-\frac{B_f}{2}}^{\frac{B_f}{2}} G_a^2(f + f_d + jf_{PRF}) df}{\int_{-\frac{B_f}{2}}^{\frac{B_f}{2}} G_a^2(f + f_d) df} \quad (3-22)$$

式中  $f$  为多普勒频率,  $G_a(f)$  为多普勒能量谱, 它等效于方位向天线的双程方向图,  $B_p$  为方位向成像处理器带宽, 方位向模糊度主要由方位向天线方向图  $G_a$  和脉冲重复频率等因素一起决定。在进行成像处理过程中倘若多普勒中心频率估计存在估计不准确的这种误差存在, 将影响方位模糊度值最终的确定。

### 3.3.12 测绘带宽度

测绘带宽度是指整幅 SAR 所成出的图像对应在实际场景中距离向宽度。测绘带宽度表征的 SAR 系统成像时在距离向上能够获得的最大宽度。

测绘带宽越大, 意味着 SAR 中所显示的距离向宽度越大, 所能成像的目标范围越大。对于军事侦查而言, 成像的范围越大, 意味着用比较少的 SAR 图像就可以获得对更多地面范围的观测, 但是测绘带宽的大小与观测和判读目标的精确程度

没有关系<sup>[27]</sup>。

(1)从雷达数据层面定义:

测绘带宽度数学表达式是:

$$w = \int_{R_{near}}^{R_{far}} dl \quad (3-23)$$

在实际的测量中使用的公式是:

$$w = (R_{far} - R_{near}) / \sin \theta \quad (3-24)$$

其中 $\theta$ 为成像带中心点的入射角。 $R_{far}$ 和 $R_{near}$ 分别表示卫星到成像区域近端的距离和到成像区域远端的距离。示意图如下:

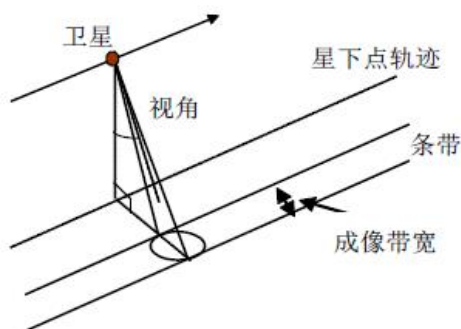


图 3-7 成像带宽示意图  
Figure 3-7 Imaging Bandwidth

(2)从雷达线性调频信号发射层面:

计算发射的脉冲个数,和接收的脉冲个数,计算单个脉冲发射的时间,算出最近点和最远点发射的时间延迟,与光速相乘,得到测绘带宽度。

(3)从 SAR 图像层面:

$$w = N * x_0 \quad (3-25)$$

其中  $N$  表示图像距离向 (或方位向) 像元数,  $x_0$  距离向 (或方位向) 像元宽度。

### 3.3.13 几何校正精度

该定义只适用于二级或二级以上SAR图像产品。几何校正精度包含(1)定位精度和(2)畸变误差), 其中定位精度包含 (①绝对位置误差, ②图像方位误差, ③相对位置误差) 而畸变误差包含 (①相对比例误差和②相对角度误差)

绝对位置误差:图像方位误差,相对位置误差,相对比例误差,相对角度误差)

定位精度包含(①绝对位置误差,②图像方位误差,③相对位置误差)表征在SAR图像中的各项场景与真实的场景在地理上(经纬度,和场景方向)的偏离程度,而畸变误差表征的是对于某一个成像的具体的目标它的形状,建筑结构的变化程度。

目标的位置精度是目标情报的基本要素之一,高精度的目标情报可显著提高作战效能。对目标的定位精度要求一般在 5m 到 50m 之间,在实际的军事应用中,快速提取目标定位信息,对于取得胜利有很大帮助,对于几何校正高精度和小的畸变程度反映了 SAR 图像品质的高低。是合成孔径雷达图像军事应用的主要指标之一,也是合成孔径雷达图像质量评价的重要指标之一<sup>[29]</sup>。

①绝对位置误差描述是 SAR 图片中显示的地理位置和实际的差别。

②图像方位误差,可以以正北为参考,在实际地理位置的偏离程度和在 SAR 图像中的偏离程度

③相对位置误差可用图像上任意两点在同一平面的距离与该两点在平面上的实际距离的误差来表示。

④相对比例误差是指图像像元表示的距离与真实地理距离之间的比值误差。

⑤相对角度误差是指图像表示的角度与真实地理角度之间的误差

### 3.4 一些质量指标对军事侦察的影响和需求分析

#### 3.4.1 分辨率指标对军事目标侦察的影响和需求分析

地面分辨率是卫星成像侦察的最重要指标之一,是反映卫星侦察能力与水平的重要标志。不同目标的判读要求不同的分辨率,一些主要的场景的指标如下:

表 3-2 主要场景判读指标示意图  
Table 3-2 Sketch map of main scene interpretation parameters

目标	发现	识别	确定	描述
桥梁	6	4.6	1.5	0.9
飞机	4.6	1.5	0.9	0.15
港口	30.5	15	6	3
道路	9	6	1.8	0.6

下图中对比了星载 1m 分辨率和 3m 分辨率条件下的成像结果。

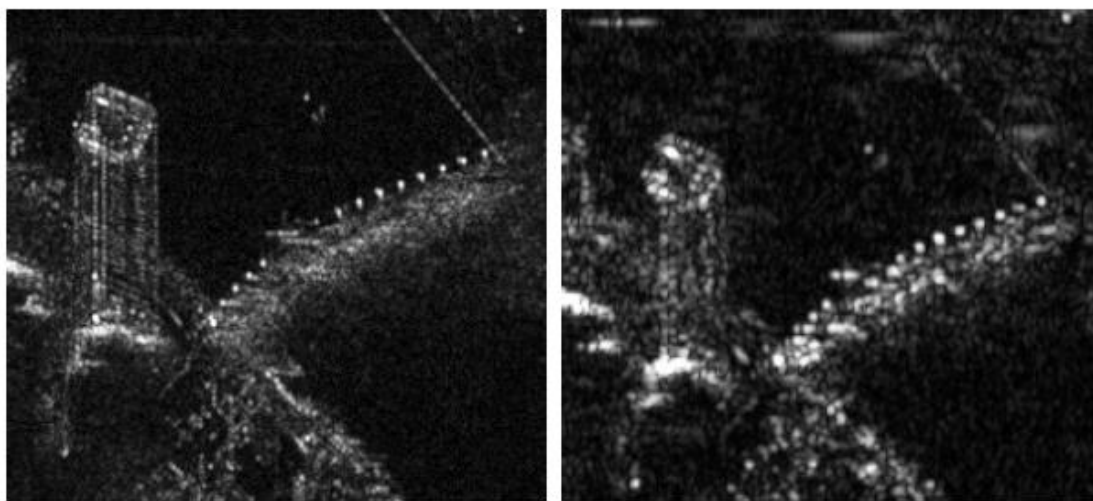


图 3-8 星载 SAR-X 波段不同分辨率条件下成像对比  
Figure 3-8 Different resolution imaging contrast spaceborne SAR-X band  
左侧为 1m 分辨率，右侧为 3m 分辨率

由上图中可见在相同尺度条件下 1m 分辨率条件下可以对目标的结构细节进行更加清晰的分辨，而且桥梁上的灯柱也清晰可辨。

#### 3.4.2 旁瓣电平对军事目标侦察的影响

峰值旁瓣比表征了在 SAR 图像上强目标的反射能力对弱目标的反射能力的“遮掩”程度，在一般情况下，具有更好的质量要求的 SAR 图像要求该值是小于 -20dB。但在 -20dB 时，主战兵器等重点军事目标仍不能清晰呈现，该指标必须达到 -30dB 时方能有很好的侦察效果。积分旁瓣比表征较暗的局部区域(弱信号)被来自周围的明亮的区域(强信号)信号能量“混入”所“淹没”的程度，这个值越小，则表明图像质量越高。下图给出了两个典型的由于场景中出现高亮的目标以及具有较强的旁瓣使得周围的细节受到高亮度目标的压制和较强旁瓣的遮蔽。

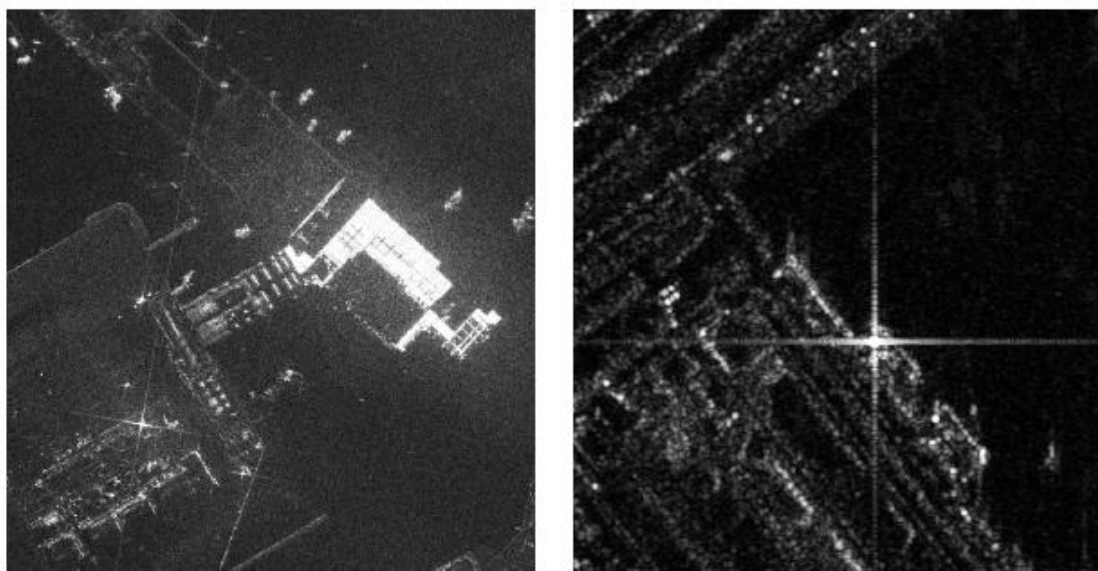


图 3-9 星载 SAR 3m 分辨率 X 波段强散射点示意图  
Figure 3-9 Spaceborne SAR 3m resolution X-band strong scattering point images

研究发现, 经过增强处理, 油罐区域的旁瓣明显降低, 角反射现象明显削弱。

#### 3.4.3 系统灵敏度指标对军事目标侦察的影响和需求分析

合成孔径雷达的系统灵敏度通常用被描述为等效噪声系数  $NE\sigma^0$ , 其值等于雷达的加性热噪声电平在最终图像中所反映的后向散射系数。系统灵敏度除受到接收机噪声系数、系统损耗、接收机温度、天线增益、发射功率和信号脉宽等因素影响外, 也取决于目标斜距、入射角等星地几何关系参数的影响。随着目标斜距的不同, 以及天线增益的变化, 成像带内不同斜距处的系统灵敏度差异很大, 因此, 为保证整幅 SAR 图像均能满足判读应用需求, 系统灵敏度指标定义为成像带宽内系统灵敏度的最差值。系统灵敏度表征的是对弱小目标的观测能力, 是 SAR 图像军事应用的主要指标之一。通常该指标越高越好。下图是不同系统灵敏度的 SAR 卫星图像, 从图中可以看出, 系统灵敏度提高时, 目标细节表现能力有所改善。

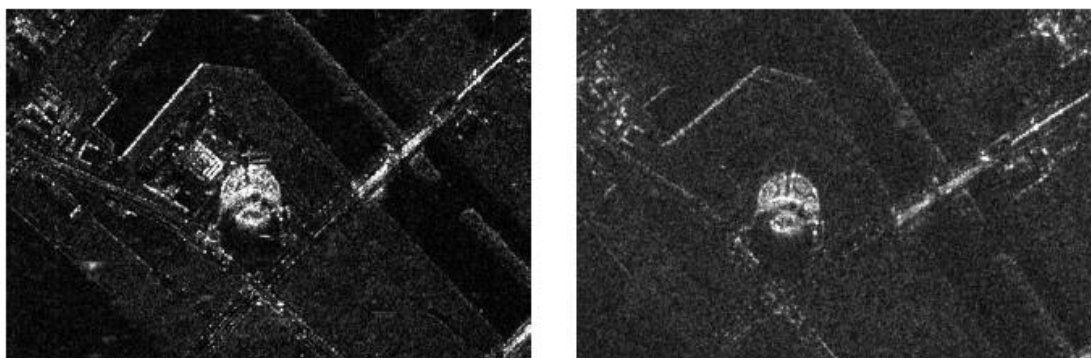


图 3-10 不同系统灵敏度条件下成像结果对比

左侧为 TerraSAR 图像，右侧为其他图像

Figure 3-10 Imaging results under different conditions of contrast sensitivity of system

left is TerraSAR ,Right is other image

从上面的比较可以看出 TerraSAR 图像中可以提供的细节更加丰富。

#### 3.4.4 模糊度指标对军事目标侦察的影响和需求分析

信号模糊是指除有用信号之外，还存在着其他类型的信号如非人为干扰的散射回波信号（模糊信号）与有用回波信号发生混叠，从而形成图像中的虚假目标。模糊的现象可以分为距离模糊和方位模糊。受 SAR 天线旁瓣抑制能力的限制，当场景动态特别大时（主要为海陆交界和海上），会出现方位向模糊现象，在图像上表现为“鬼影”（虚假目标）。国内外 SAR 卫星都有过不同程度的模糊现象，X 波段的模糊现象比 L 波段模糊现象更加严重。

模糊现象对图像应用的影响主要表现在以下三个方面：一是虚假目标增多，造成错判；二是图像局部信息淹没，造成漏判；三是图像整体信噪比变差，导致误判。下面通过示意图像来说明模糊现象对图像应用的影响<sup>[29][31]</sup>。



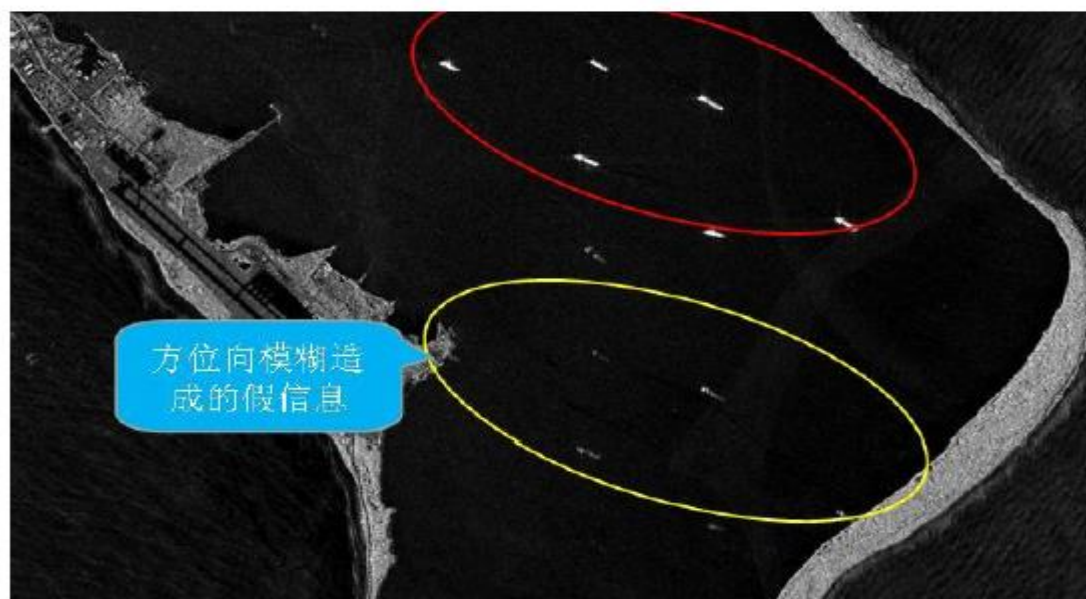


图 3-11 某海军基地模糊信号图  
Figure 3-11 A naval base ambiguity signal diagram

上图是 SAR 卫星获取的某海军基地的一景图像，从图中可以很明显看到由于模糊信号产生的虚假目标，很容易造成对舰船数目产生误判。

### 3.5 现有 SAR 卫星图像质量指标体系优缺点及分布式目标体系的提出

#### 3.5.1 现有星载 SAR 图像质量指标体系的优点

当前由网络发展带来的图像信息洪流。因此，定义客观的图像质量评估指标来对图像质量进行评估已经成为图像处理领域重要的研究方向之一。目前提出的图像质量指标体系能够基本的做到对大量图像质量的定性评价，然而现有的 SAR 图像质量评估是基于纯图像层面而非应用层面来评估的，因此决定了现有的星载 SAR 图像质量指标体系既有优点也有缺点，在现有的质量指标中，主要是分为三部分来评价，首先把 SAR 图像和一般的光学图像进行类比，提出与一般光学图像相类似的例如图像动态范围，图像饱和度，和图像量化位数等评价指标，其次根据测定方法类型分成基于点目标和基于面目标两大类，通过这种划分图像质量指标的方法有利于图像质量评估系统的实现。空间分辨率，峰值旁瓣比，积分旁瓣比就是利用点目标冲激响应来进行分析获得的；而余下的其他指标例如图像动态范围，辐射分辨率，辐射线性度，辐射精度，模糊度，几何校正精度等是通过面目标进行测定的，而测绘带宽度这个指标是针对整个图像层面提出的<sup>[22]</sup>，前面所

提及的这些已有的 SAR 图像质量评估指标都是针对图像层面进行描述的,并没有涉及到图像本身的内容,之前定义的这些指标对于合成孔径雷达图像内容(重影、增益、模糊等)的质量并不能进行表达和说明,但这些质量问题的解决在 SAR 图像质量评估中显得特别重要<sup>[23]</sup>,综上所述,因此对于 SAR 图像的质量评估的研究具有十分广泛的研究价值和意义和巨大的应用前景。

### 3.5.2 现有星载 SAR 图像质量指标体系的不足

目前的 SAR 卫星进行图像质量评价,主要是通过地面微波定标场和热带雨林对 SAR 卫星的客观性能指标进行测试。而对于 SAR 图像情报应用而言,主要是考察 SAR 图像对军事目标的发现,确认,识别能力。这就需要建立 SAR 卫星图像的主观评价标准,并以此为参考对图像的主观质量进行评价。客观评价和主观评价的结果往往不是成正比的,甚至使用不同的客观评价参数,其评价结果也是不一致或相互制约的,如何达到主观评价的一致性,是急需解决的问题。

另外,在合成孔径雷达成像系统中,影响图像质量的技术指标参数主要集中在动态范围,空间分辨率,模糊度,噪声等效后向散射系数和辐射分辨率等,但在指标的验证与考核中通常是分别进行测量以确定其满足指标要求。但在实际的成像中这些参数是相互联系和制约的,且随着地面景物,成像模式的改变而对成像效果形成不同的影响。在目前的指标体系中还没能够综合测定这些因素对成像质量的影响。

传统的合成孔径雷达图像质量指标的各项标准的精度也有待进一步的提高,根据要求,要在 10% 以内。高精度的指标测量是图像质量准确评价的重要基础,通常的指标测试方法测试精度在 10% 左右,比较好的情况能够达到 5% 的精度,远远达不到对我国雷达卫星图像的测试要求。

除此之外, SAR 系统作为主动传感器,其成像质量与系统自身参数和性能有直接关系,也与成像时的系统姿态,地面景物,大气气象条件等方面相关,而且不同的成像模式所采取的成像处理算法也存在较大差异。这些因素综合在一起共同对 SAR 回波数据以及图像的质量产生影响,而这些彼此耦合的因素难以通过简单的数学模型分别加以精细的描述。

目前 SAR 系统成像和图像质量的测量一般通过在低散射均匀背景条件下放置角反射器构造点目标,通过测量点目标的成像结果,获得系统的冲激响应进而了解系统的特性,但由于点目标具有良好的各向散射同性的特点,无法反映一般目标特别是典型军事目标在合成空间过程中去相关后的成像效果和性能,无法反

映 SAR 图像对于具有复杂结构的成像对象的反演性能,也无法反映当前目标或强散射点稠密时各散射点之间的相互影响关系,因此有必要在现有指标的基础上,发展更加综合全面的星载 SAR 图像质量的评价评价体系。

图像质量之间的差别是难以简单的采用点目标的测量结果进行概括或总结,在当前的实际应用中,SAR 系统的指标与 SAR 图像质量之间并未实现直接的联系,在某些条件下,两个系统在现有指标参数相似度条件下却得到视觉差异较大的图像,另一方面,SAR 图像质量相似,但对应的主要指标(如几何分辨率)却存在一定的差异。这些都暴露了目前 SAR 成像质量和图像质量所存在的问题。

造成这些问题的核心因素通常在于图像质量的判别以视觉感受为主要依据,而指标的测量以特定的环境和对象为基础,两者间存在较大的差异,从而造成现有指标对 SAR 系统或 SAR 图像的评测能力存在缺陷<sup>[32]</sup>。

例如,对点目标的检测,主要集中在点目标的分辨率和积分旁瓣比、峰值旁瓣比等指标,但在实际的应用环境中,成像对象受环境以及周边目标的影响难以实现系统测试时候得到的指标。

### 3.5.3 星载 SAR 分布式目标成像质量指标的提出

现实中的各类人造目标或聚集在一起,或结构复杂,在 SAR 图像中所体现的结构受彼此间的影响而不够清晰。造成这一现象的原因有 SAR 成像自身体制机制的原因也有 SAR 系统及地面信号处理方面的原因,如旁瓣、模糊、灵敏度等。但是传统上仅针对 SAR 单项成像指标的测量无法直接体现这些因素的综合作用结果以及在目标构造反演方面造成的影响。为此在本节中讨论专门用于刻画 SAR 卫星成像对目标结构反演能力的指标。

根据以上图像指标质量的问题分析,在本课题的研究中考虑针对成像对象建立一种“端对端”的总体质量描述方法,即由成像对象到 SAR 图像之间关系的质量描述方法,利用 SAR 图像对场景和成像对象的反演能力作为 SAR 图像质量体系的核心描述方法<sup>[33]</sup>。

图像质量之间的差别是难以简单的采用点目标的测量结果进行概括或总结,在目前的实际应用中,SAR 系统的指标与 SAR 图像质量之间不存在直接的影响和关联,在有些条件下,两个系统在现有指标参数相似度条件下却得到视觉差异较大的图像,另一方面,SAR 图像质量相似,但对应的主要指标(如几何分辨率)却存在一定的差异。这些都暴露了目前 SAR 成像质量和图像质量所存在的问题。

造成这些问题的核心因素通常在于图像质量的判别以视觉感受为主要依据,

而指标的测量以特定的环境和对象为基础，两者间存在较大的差异，从而造成现有指标对 SAR 系统或 SAR 图像的评测能力存在缺陷。因此有必要在现有指标的基础上，发展更加综合全面的星载 SAR 图像质量的评价评价体系。就是在这种情况下，星载 SAR 分布式目标成像质量指标被提出。这一体系，利用 SAR 图像对场景和成像对象的反演能力作为 SAR 图像质量体系的核心描述

### 3.5.4 星载 SAR 分布式目标成像质量指标优势

合成孔径雷达成像系统作为主动传感器，其成像质量与系统自身指标参数与性能有着直接的关系，大气气象条件等方面相关，而且针对不同的应用，在成处理算法方面也存在较大的影响，这些因素综合在一起共同对 SAR 数据的质量产生影响，而且这些彼此耦合的数据无法通过定量的数学模型分别加以精细准确的表述，为此我们设计建立一种“端到端”的总体质量描述方法，即忽略成像链中的所有环节，直接描述输入是成像对象，输出是 SAR 图像的质量评价方法，利用 SAR 图像对场景和场景中的成像目标的反演能力作为 SAR 图像质量评价的核心评价方法。成像链中包含的内容是成像的所有过程和环节，将所有成像环节串在一起的链条，描述了整个成像过程。在 SAR 成像质量评价方法里，我们需求的是一种“端对端”的方式，即忽略成像链中的所有环节，只考虑成像链的始端输入和终端输出<sup>[26]</sup>。

成像链开始的一端是需要成像的场景，成像链的终端是图像。如下图所示。

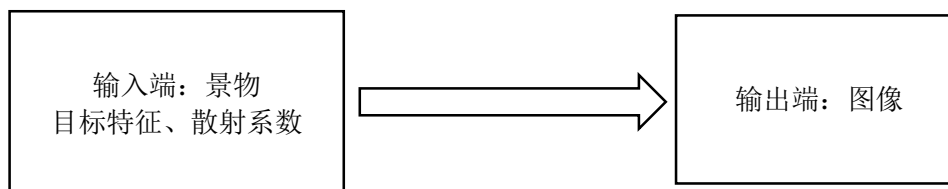


图 3-12 “端到端”的成像质量描述方法  
Figure 3-12 ‘End to end’image quality described method

星载 SAR 分布式目标质量评价指标包含如下几个方面：一、空间频率调制度比，二、点簇扩散函数、三、平面栅格分辨率，基于这个指标定义分布式目标质量评价，显然有待完善，但就目前的研究来看，基于这些指标，然后设计场景进行验证性试验，得到数据进行结果分析，显然能基本有效的对 SAR 图像质量进行一定范围的评估。同时为以后定义和获得更多的评价指标打下基础，最后结合主观评价基本得到一幅 SAR 图像质量的评价说明。

## 第四章 星载 SAR 分布式目标质量评价指标

### 4.1 空间频率调制度比

#### 4.1.1 空间频率的定义

空间频率是指在单位长度内明暗条纹（强/弱散射条纹矩形）重复出现的周期数，描述空间频率的单位是“线对/米(Line pair per meter, LP/m)，不同的空间频率以散射强弱交替变化的两条具有一定宽度的矩形线对加以生成。如下图所示。

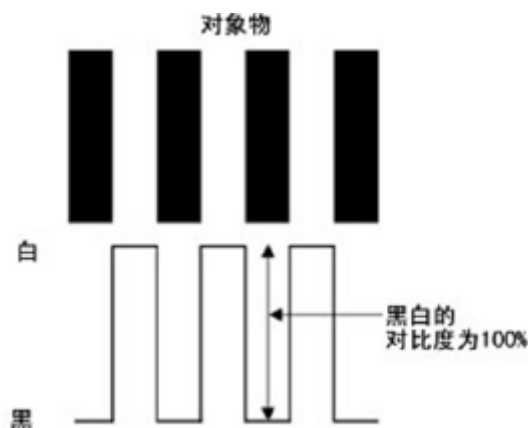


图 4-1 空间频率场景  
Figure 4-1 Spatial frequency scene

在上图中在一定长度范围内共出现了 4 对黑白相间的矩形线对，若此长度为 1 米，那么此图像中显示的空间频率即为 4 线对/米。同时随着在单位长度里黑白矩形先对的数量不断增加的情况下，合成空间雷达成像系统由于收到自生的反演能力的限制，将不再会出现那样可清晰区分的黑白条纹，而将会黑白条纹混杂在一起变成不可区分的灰色，如下图最右边部分所示<sup>[27]</sup>。



图 4-2 不同空间频率的场景及成像效果对比  
Figure 4-2 Scenes and imaging contrast of different spatial frequencies

如上图所示的场景对于高分辨率合成孔径雷达成像系统而言、特别是分辨率为分米级别的合成孔径雷达成像系统有重要的意义，由于雷达成像系统在合成孔径过程中与目标之间的相对视角不断变化，因此会观测到目标不同侧面或角度的

投影结果。在更高的分辨率条件下，由于孔径时间极长，这一去相关现象也十分严重，传统的点目标评价方法无法反映去相关性对成像质量和成像性能的影响，因此选择利用如上图所示的场景结构可以有效地评价高分辨率条件下合成孔径雷达系统的成像性能。

空间频率调制比是指在某一特定的空间频率条件下所获得的调制比值，而非针对任意的图像和任意的场景所获得的调制比。

#### 4.1.2 调制度的定义

调制度是指在特定的空间频率下，最大散射强度与最小散射强度两者之差除以两者之和的上商，如下式。

$$\text{调制度} = \frac{\text{最大散射强度} - \text{最小散射强度}}{\text{最大散射强度} + \text{最小散射强度}} \quad (4-1)$$

#### 4.1.3 场景调制度的定义：

场景调制度是指在特定的空间频率下，假设场景中最强散射单元的散射强度为  $P_{\max}$ ，相应的最弱散射单元的散射强度为  $P_{\min}$ ，那么场景的调制度  $M_s$  定义为：

$$M_s = \frac{P_{\max} - P_{\min}}{P_{\max} + P_{\min}} \quad (4-2)$$

#### 4.1.4 图像调制度的定义：

图像调制度是指在特定的空间频率下，假设根据辐射分辨率反演得到的最强散射单元的强度为  $I_{\max}$ ，最弱散射单元的散射强度为  $I_{\min}$ ，那么图像调制度  $M_I$  为：

$$M_I = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (4-3)$$

#### 4.1.5 空间频率调制比率的定义：

合成孔径雷达系统的空间频率调制比是指，在固定的空间频率条件下，合成孔径雷达系统成像结果（即对设定的场景成像得到的雷达图像）的图像调制与实际场景调制度的比值， $R_m$  如下：

$$R_m = M_I / M_s \quad (4-4)$$

空间频率调制比是指在某一特定的空间频率条件下所获得的调制度比值，而非针对任意的图像和任意的场景所获得的调制比。

这一新的指标有效的反映了合成孔径雷达成像系统对实际场景的综合反演能

力。根据对雷达系统的其他参数的分析，可以发现空间频率调制比由辐射分辨率、空间分辨率、动态范围和系统灵敏度等多个参数决定。当然，这一指标的值也与雷达成像系统与场景的距离，与场景之间的视角有关，在不同的距离和视角的情况下，空间频率调制比的值也会随之变化。

空间频率调制比函数反映了合成孔径雷达成像系数对于场景中的不同空间频率成份的反演能力的变化，事实上该函数将是一条曲线，准确反映了雷达成像系统对于不同的场景特征（不同的空间频率）的成像反演能力。

#### 4.1.6 空间频率调整度比的测量方法

根据上述针对空间频率调制比的定义，设定在实际的测试中采用结构如下图所示的场景进行成像质量评价的测试，对合成孔径雷达成像系统进行测定。

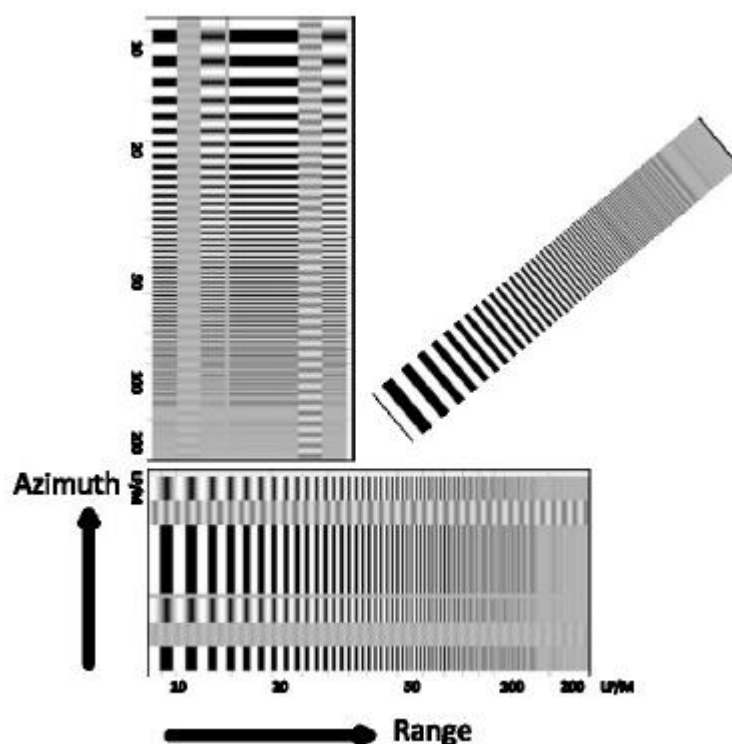


图 4-3 测量空间调制比率的场景设定

Figure 4-3 Scene setting of measurement space modulation ratio

在实际的场景设定中，应选取较为平静的水面或者平坦且匀质性较好的陆地区域作为背景，采用有源或无源的定标器产生矩形强散射区域，根据合成孔径雷达成像系统分辨率的设计范围和具体应用中对目标细节的分辨率的要求来设定所需的频率范围，进而完成空间频率场景的布设。

在采用水面为背景的区域,则可以认为水面的散射强度为接近于零的最小值,若采用有源目标生成强散射区域,则认为该区域中散射强度的最大值由有源器件发射功率决定,对于采用非水面作为背景的区域,则需要对该场景的散射强度进行具体测定。

#### 4.1.7 基于空间频率调制度比的成像质量评价方法

根据上述的指标定义以及测量方法,具体操作步骤如下:

一 使用合成孔径雷达成像系统对如上图所示的,具有特定散射特性分布测试场区域进行成像。

二 计算每一个线对区域(即在特定的空间频率条件下)的图像调制度。

三 计算在每一个线对区域(即在特定的空间频率条件下)的真实的场景调制度。

四 计算在每个空间频率处的空间频率调制度比值。

五 根据上述结果,绘制该雷达成像系统的空间频率调制度比函数曲线。

值得注意的是:场景的长度和宽度的设定取决于所使用的合成孔径雷达成像系统的空间分辨率,所选取的空间频率最大值和最小值也与雷达成像系统的空间分辨率和辐射分辨率有直接的关系。

根据以上方法依据空间频率的变化逐个计算各个空间频率出的调制比,由此得到在不同的空间频率条件下的合成孔径雷达成像系统的调制度比值,并可以根据调制度比值绘制空间频率调制度比函数的二维曲线(即空间频率—调制后度比的二维曲线)。

最后通过对该曲线的解读,可以优先准确的对高分辨率条件下的合成孔径雷达成像质量和成像性能进行评价。

## 4.2 点簇扩散函数

同样针对人造目标,特别是小型战术目标,如飞机、船舰、车辆、发射塔架、天线阵地等目标,由于姿态关系,在星载条件下通常仅在图像中呈现少数散射点,或者在目标的轮廓中叠加少数散射点,而这些散射点的分布情况以及数量对判读目标的属性和类型十分重要<sup>[27] [28]</sup>,下图给出了 TerraSAR 卫星 3m 分辨率条件下 HH 极化典型的机场和其中的飞机场图像。



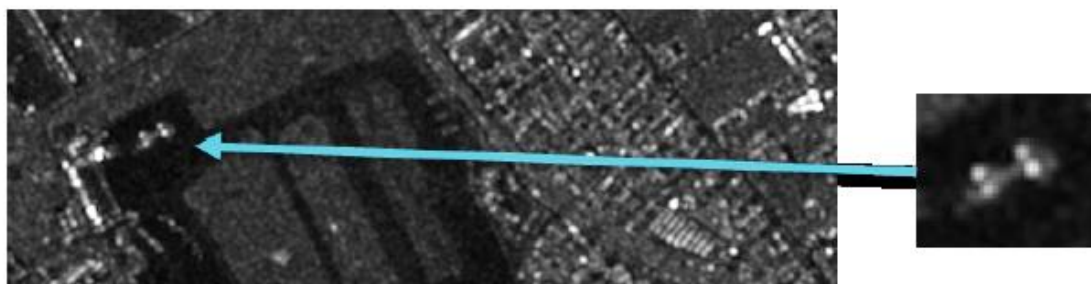


图 4-4 机场 SAR 图样  
Figure 4-4 Airport SAR image

由上图可见固定翼飞机目标由于表面结构平滑，因此仅在图像中体现为少数几个散射点的组合。

人造目标上的散射点在无法形成连续的结构，通常体现为拥挤的点群目标形态。由于电磁散射的非线性叠加的特征，拥挤的点群目标不等于孤立的各离散点简单的叠加。当将若干点目标较为紧凑的摆放在一起，在 SAR 的图像中将显示为一个明亮的点簇，该点簇的扩散性与非单点目标的扩散函数的简单叠加之间的差异可以作为 SAR 系统对于非孤立的强散射目标的成像性能。点簇扩散函数这个指标就是在这种条件和情况下提出来的。

#### 4.2.1 指标的作用与意义

测试 SAR 系统针对密集型点目标群的成像能力，以反映 SAR 系统针对小型战术目标的成像能力和目标细节的区分能力。并以此作为 SAR 系统成像和图像对目标识别和确认判读的效能。

#### 4.2.2 指标的定义

点簇扩散函数指标没有直接采用点簇在 SAR 成像或图像中的成像或图像中的成像结果作为其指标的定量化描述，而是通过对比点簇实际响应与对应孤立点目标的叠加和之间的差作为该指标的量化描述方法<sup>[29]</sup>。

通过两者之间的差可以反映 SAR 系统的成像能力在点簇之间距离和结构处在何种关系时依然能够较好的以近似线性的关系，所以可以在这种情况下对成像和图像的结果做出较好的评估与判断。

#### 4.2.3 点簇扩散函数场景设计思路

拥挤性点目标群：采用角反射器随机摆放构成。通过设置在固定大小区域内（可以选择 10m\*10m）的角反射器的数量以及最大和最小间距反映目标的拥挤程

度，并以此作为点群目标拥挤性的定量描述，及单位面积内数量、最大间距最小间距。

场景构成：与一般的 SAR 成像质量测量相似，为便于后续的处理，选择匀质性场景，以便排除背景对目标的干扰<sup>[30]</sup>。

标定点目标：在远离目标群的位置上放置一个独立的角反射器。该独立的角反射器确保不受目标群的影响，利用该角反射器的相应函数作为标准函数，为目标群的响应性能变化提供标定参考。

数据处理：利用单个点目标在目标群中的扩散函数与标定点的扩散函数之间的差异反映拥挤条件下成像的变化，这个差异通过求解点群条件下的响应与利用多个孤立点目标的线性叠加所制造的响应之间的差异得到两种条件下目标响应的差异，进而确定 SAR 系统对点簇目标的成像和反演能力。

#### 4.2.4 指标场景示意图和实地拍摄图

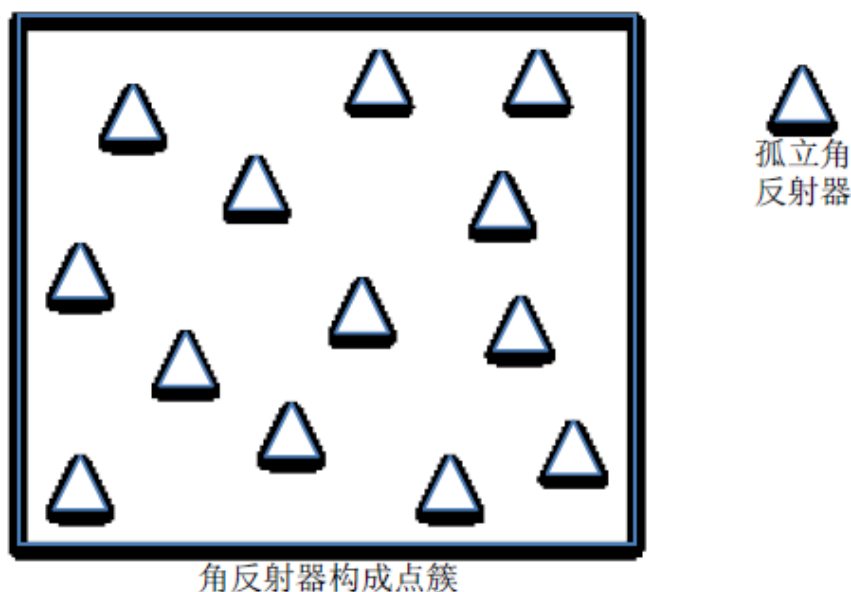


图 4-5 点簇测试场景布置

Figure 4-5 Point cluster test scene layout

设点簇场景的响应函数为  $K(x, y)$ 、而孤立的点目标响应函数为  $D(x, y)$ ，若点簇场景中存在  $N$  个点目标，且位置坐标分别为  $(X_i, Y_i)$ ，由于点簇扩散函数  $H$  将写为实习函数与孤立点目标响应的差，即：

$$H(x, y) = K(x, y) - \sum_{i=1}^N D(x - x_i, y - y_i) \quad (4-5)$$

在定量评估点簇分辨率方面可以考虑采用  $H$  的幅度累积值作为一种衡量的指标, 即

$$\sigma = \iint |H(x, y)|^2 dx dy \quad (4-6)$$

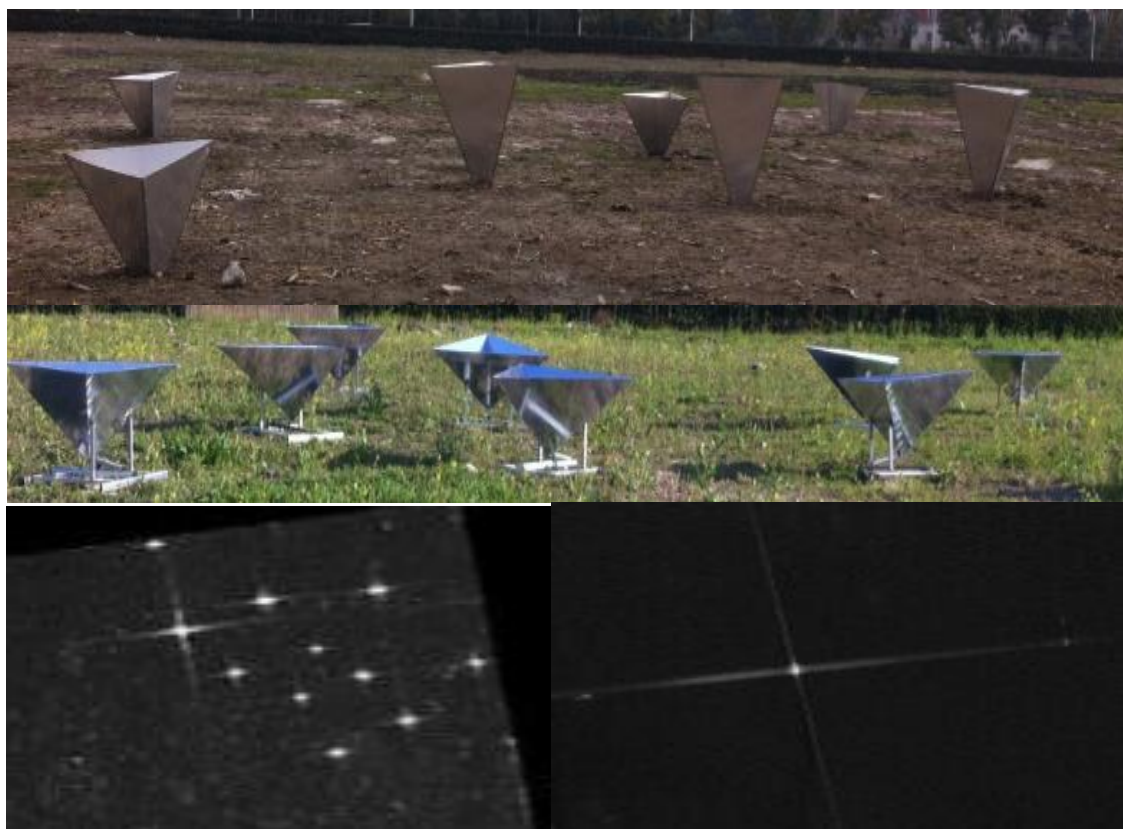


图 4-6 实际场景与雷达成像拍摄图  
Figure 4-6 The actual scenes and SAR image

### 4.3 平面栅格分辨率

为测试 SAR 系统对目标结构的反演和细节的分辨能力, 通过在地面铺设具有不同网格密度的金属栅格, 并测试 SAR 系统对这些栅格的成像性能, 即可分辨的最高栅格密度作为平面栅格分辨率<sup>[36]</sup>。

#### 4.3.1 指标的意义与作用

该指标的设置主要是用于考察 SAR 卫星系统针对特定目标结构的成像性能, 并由此指标的测定结果推断 SAR 卫星系统对以人造目标为代表的 SAR 成像对象的结构细节的反演能力。从另外一个角度可以将该指标解释为 SAR 系统的一种特

殊的分辨率定义。即以网格的可分辨密度（或面积）作为 SAR 成像质量在分辨率方面的一种定量的描述。这种分辨率的定义和测量方式比传统的基于点目标的定义更加贴近实际应用条件，特别是对目标轮廓结构细节的反演能力具备定量描述的性能。

此外需要指出的是传统的 SAR 分辨率定义多以孤立的点目标为基础，通过测量其响应的 3dB 宽度作为分辨率的定义方式。但在实际应用中，一方面 SAR 成像结果的线性叠加，另一方面孤立的点目标与实际应用中的成像对象之间存在较大的差异，为此需要针对实际应用条件下构造更加能够反映实际应用需求的测试环境和指标的定义。

#### 4.3.2 指标的定义

该指标以 SAR 成像后的数据或图像中可以分辨的单位面积内的栅格数量为量化方法，换言之，该指标被定义为可以再 SAR 数据或图像中分辨的最大栅格密度，因此指标的单位是：栅格数量/平方米。

在定义方面出单位的规定外，还需要对所谓的“可分辨”进行规定。首先在图像层面上，考虑到人眼对灰阶可靠的分辨能力通常在 64 级水平（不考虑显示系统的影响）的可分辨性，以此为参考，栅格的图像中可以将栅格中心与栅格边缘处的灰度差大于等于动态范围的  $1/64$ ，视为可以分辨。而在数据层面上亦可参考图像中的规定，折合分贝为 -0.07dB。

#### 4.3.3 测试的靶标设置与环境要求

作为平面栅格分辨率，靶标采用金属结构构造成像所需要的栅格结构，为了增加栅格的后向散射能力，考虑将栅格加工成为二面角形式，且栅格的内部和外部均为二面角的结构，为测试不同方位上的栅格成像结果的差异，考虑相同尺寸的栅格至少部署 9 个（呈现  $3 \times 3$  分布）栅格的金属边框相比于栅格面积或 SAR 系统的分辨率是可以忽略的。如图 4-7 所示：

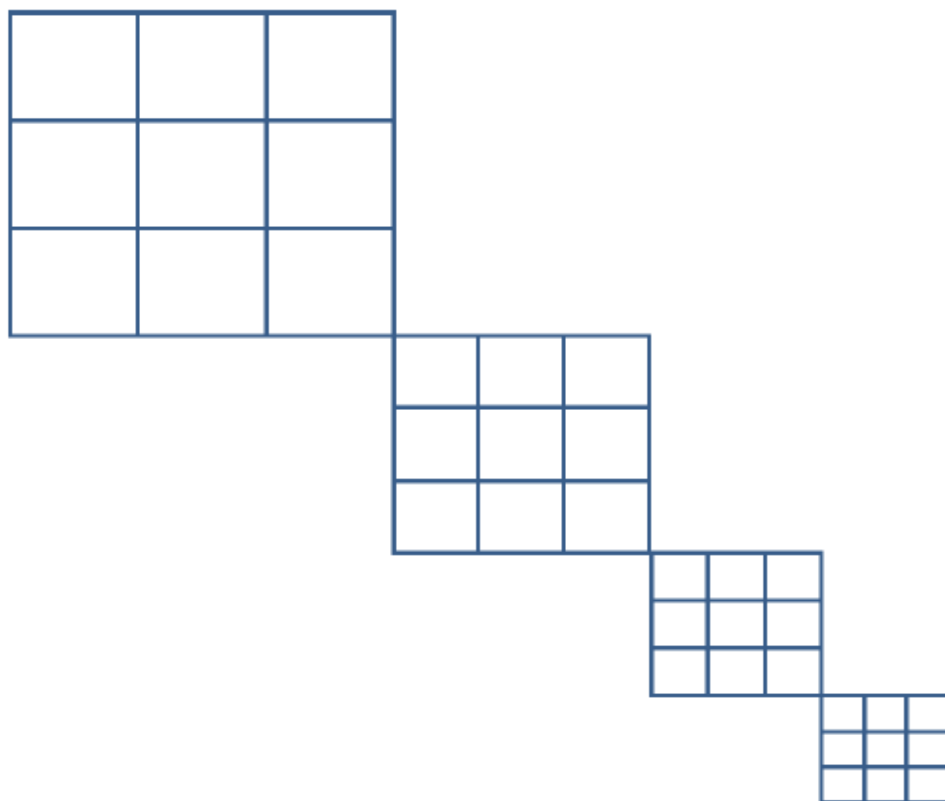


图 4-7 平面栅格测试靶标示意图  
Figure 4-7 Test target schematic plane grid

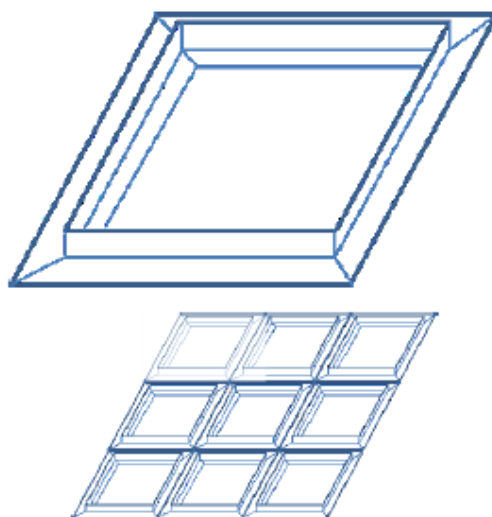


图 4-8 栅格立体示意图及其组合模式  
Figure 4-8 Raster perspective view and combined mode

为避免引如其他非栅格背景所引起的电磁场散射，同时也与大部分人造目标的散射情况保持相似，要求背景均匀且为低散射水平。常见的选择可以是由平静

的水面、平整的混凝土或沥青路面等。另外需要指出的是为了避免金属栅格在成像过程中有可能造成的二次散射现象要求在设置测试场时要求构成栅格的金属不应突出背景，即便突出部分也要控制在半个波长以内<sup>[37] [38]</sup>。

#### 4.3.4 指标测量的基本方法

对于不同组合密度和不同金属栅格层数在雷达图像中会显示不同的效果，对于这两个方面分别建立图像质量和不同组合密度的二维曲线图，同理，不同栅格层数和图像质量建立二维曲线图，对得到的曲线图进行分析，最后通过对该曲线的解读，可以优先准确的对高分辨率条件下的合成孔径雷达成像质量和成像性能进行评价。

#### 4.3.5 平面栅格分辨场景设计思路

根据在上一章中的定义和描述，先设计如下的一个成像场景，栅格密度为  $15\text{cm} \times 15\text{cm}$ ，铺设三层，按照如下场景示意图铺设，场景的宽度为  $10\text{m}$ ，白色条纹表示的是铺设区域，它的长度依次为  $2\text{m}$ ， $4\text{m}$ ， $6\text{m}$ ， $8\text{m}$ ， $10\text{m}$ ， $12\text{m}$ ， $14\text{m}$ ， $16\text{m}$ ， $18\text{m}$ ， $20\text{m}$ 。每两个白条纹之间的黑色条纹长度也是如上设置。整个场景共计  $10\text{m} \times 220\text{m}$ 。

#### 4.3.6 指标场景示意图和实地拍摄图

成像场景示意图和实际场景拍摄如下图所示：



图 4-9 成像场景示意图

Figure 4-9 Imaging scene schematic







图 4-10 实际场景拍摄图以及 SAR 图像  
Figure 4-10 The actual scenes and SAR image

通过对上图的 SAR 图像分析可知，对于长度大的栅格比如 20m，18m 可以明显看出间隔和栅格成像之间的差异，但是，在后面 2m 的几乎不能分辨，因此，将平面栅格分辨率作为图像质量有效评价指标是十分可靠，并且可以调整摆设的密度，进一步得到分辨率对图像质量的影响。

#### 4.3.7 各项客观指标总体说明

通过验证性试验得到各项指标参数和具体的实验结果后还应该反过来对图像质量进行验证和考核，得到所提出的指标是否完善，是否有待提高。同时得到各项指标的具体情况可以用来指导和改进 SAR 系统的成像情况和 SAR 系统的各项参数设置。

### 4.4 SAR 图像质量指标实验分析

#### 4.4.1 SAR 图像质量指标背景分析和图像来源说明

本章节具体讨论了几个合成孔径雷达图像质量参数的定义和和具体的详细的高精度计算，对于每一个参数计算的顺序是与参数的定义和说明顺序保持一致的，对于图像质量的参数分析都是来源于整幅图像，用于参数分析的 SAR 图像来源于商业的雷达图像，例如 TerraSAR，计算都是基于图像的浮点形式的（首先将灰度值转化为浮点值进行计算），在实际的计算和处理时，首先将整个图像基于要计算的指标的要求进行切分，基于这些得到的图像切片，根据指标的定义进行建模和各项参数的计算，剔除无效的值，选择合理有效的值，形成高精度的计算过程，利用统计平均值，得到最后的精度较高的实验结果<sup>[32]</sup>。

#### 4.4.2 指标计算的具体处理和各项参数定义

本章所使用的 SAR 图像如下图所示，首先将整个图像分割成为四个切片，然后基于这四个切片图像进行各项参数的具体计算，具体的指标的定义和具体建模方式如下所描述，根据这些过程，我们可以得到最后的各项 SAR 图像质量指标参数的计算结果，以下是进行实验分析的各项指标的说明与描述。

##### 一. 图像动态范围

动态范围描述了辐射分辨率值最强目标与最弱目标的强度比（用分贝表示），动态范围表明了这幅 SAR 图片的最大后向散射系数和最小后向散射系数之比，分布目标图像的动态范围约为雷达系统的动态范围，点目标图像的动态范围是雷达系统的动态范围和增益压缩和方位聚焦。从合成孔径雷达图像的动态范围可以作为图像质量评价的有效参数。数学表达式如下：

$$D = 10 \lg \frac{T_{\max}}{T_{\min}} \quad (4-7)$$

其中  $T_{\max}$  表示最大灰度值， $T_{\min}$  表示最小灰度值。SAR 图像动态范围常定义为图像目标区域平均灰度与同一图像对应的背景范围平均灰度值的比，它定性的说明了在图像中具有不同属性特征的目标后向散射系数之间的不同。

在仿真平台，根据图像动态范围的描述，具体的计算过程如下，在仿真分析平台下分析如下的 TerraSAR 图像，得到的最大值和最小值，在实际计算中，我们对图像的动态范围的计算作多次统计分析，给出了误差数据，可以得到的结果如下表。



图 4-11 完整的雷达 SAR 图像  
Figure 4-11 Complete SAR image



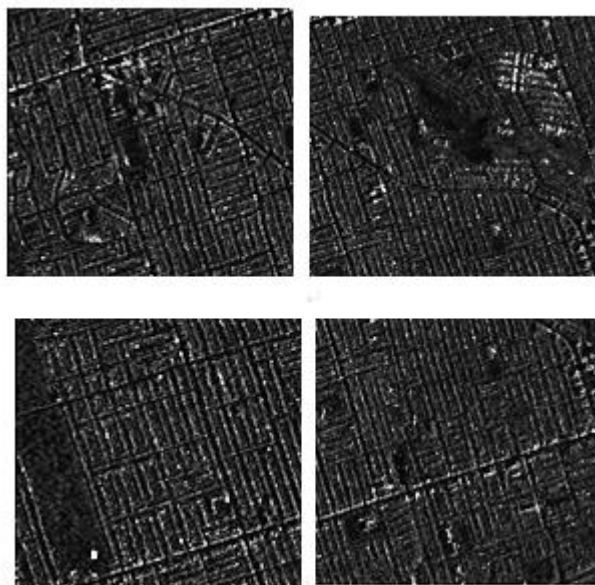


图 4-12 SAR 图像用于分析的切片  
Figure 4-12 SAR image slice for the analysis

## 二. 等效噪声系数

等效噪声系数等于在最后的图像中的雷达的加性热噪声电平得到的后向散射系数值,在理想的情况下,当后向散射系数为零时,雷达发射脉冲信号原本接收不到回波信号,等效噪声系数用来描述系统灵敏度,系统灵敏度表征的是对弱小目标的观测能力,是合成孔径雷达图像军事应用的主要指标之一,通常该指标越高越好。

理想状态下,当某个场景的实际后向散射系数为零时,在 SAR 图片中的灰度值也应该为零,但是在实际中有灰度值,该值的大小即为等效噪声系数,数学表达式如下:

$$NE\sigma^0 = 10\lg T_{\min} \quad (4-8)$$

在仿真平台,根据描述等效噪声标准,使用我们建立的数学模型进行计算,获得对应的 SAR 图像的最小值,在实际计算中,我们做了统计分析,计算出的等效噪声归一化,然后对误差较大的数据进行抛弃,我们可以得到如下表的结果。

## 三. 辐射分辨率

辐射分辨率是由合成孔径雷达系统识别的后向散射系数的最小变化,辐射分辨率是衡量合成孔径雷达系统灰度分辨率的标准,该指标描述 SAR 区分相邻目标散射系数的能力大小,通常来说,辐射分辨率的值越小表示 SAR 图像的去斑效果越好<sup>[18]</sup>。

其数学表达式如下:

$$\begin{aligned}\Gamma &= 10\lg \left( \frac{1}{\sqrt{ENL}} + 1 \right) \\ &= 10\lg \left( \frac{\sigma_I}{\mu_I} + 1 \right)\end{aligned}\quad (4-9)$$

其中  $\mu_I$  是整个图片的灰度均值, 而  $\sigma_I$  是图像的标准差。ENL 是图像的等效视数。

#### 四. 图像模糊度

模糊度包含距离向模糊度和方位向模糊度, 观测带宽度(成像带宽度)内各分辨单元方位向频域混叠或距离(斜距)时域混叠所引入的模糊图像强度(功率)与相应观测单元内图像强度(功率)之比, 称为图像模糊度(ASR)。

成像模糊是指雷达接收无用信号的回波并与有用信号混叠在一起对目标进行成像处理, 导致成像结果出现偏差的现象, 而这种影响对成像结果造成的模糊程度的指标称为模糊度。模糊度是一项非常重要的技术指标, 它将成像质量以量化形式反映, 以便不同技术的成像质量利用数值形式进行比较。一般的雷达成像技术在模糊度上都会有一定的要求, 如果模糊度指标很差, 会严重影响到成像技术的结果, 甚至造成对目标错误判断和解读。

#### 五. 测绘带宽度

测绘带宽度是指整幅 SAR 所成出的图像对应在实际场景中距离向宽度。测绘带宽度表征的 SAR 系统成像时在距离向上能够获得的最大宽度。

测绘带宽越大, 意味着 SAR 中所显示的距离向宽度越大, 所能成像的目标范围越大。对于军事侦查而言, 成像的范围越大, 意味着用比较少的 SAR 图像就可以获得对更多地面范围的观测, 但是测绘带宽的大小与观测和判读目标的精确程度没有关系。

(1) 从雷达数据层面定义:

测绘带宽度数学表达式是:

$$w = \int_{R_{near}}^{R_{far}} dl \quad (4-10)$$

在实际的测量中使用的公式是:

$$w = (R_{far} - R_{near}) / \sin \theta \quad (4-11)$$

其中  $\theta$  为成像带中心点的入射角。  $R_{far}$  和  $R_{near}$  分别表示卫星到成像区域近端的距离和到成像区域远端的距离。

这个参数的计算方法不同于其他参数, 在实际计算中, 我们应该检查的范围方向

的像素数，得到一个像素的值代表地面距离，通过两者相乘，我们可以得到最后的结果。我们可以得到如下结果。

## 六. 图像饱和度

图像的饱和度是指合成孔径雷达图像的溢出，因为灰度值非常大的点目标通常可能已经达到了饱和，检测到合成孔径雷达图像的方法是否饱和要依据的该 SAR 图像的存储模式，如对于使用 8bit 存储而言，255 意味着发生饱和，16 位意味着 65535 即是饱和状态。图像的饱和度参数对图像质量的评估是非常重要的，它也是判断图像是否使用图像的重要参数，在一般情况下，图像已被饱和合成孔径雷达图像无法使用。对于我们分析的 SAR 图像的饱和结果如下表所示。

### 4.4.3 获取点目标冲激响应和高精度计算原理

对 SAR 图像的具体操作如下，获取 SAR 图像中未饱和的点目标的冲击响应函数，是得到各项点目标相关指标的重点前提。首先对图片的选取有提出了一定的要求，不能是饱和的图像，比如图像是按照 8bit 的方式存储的，那么最大值为 255 的时候，可以认为该区域已经饱和，不能选取，同理，对于一个按 16bit 存储的 SAR 图像，出现 65535 说明图像已经饱和，不可用于质量分析的切片使用，但同时，选取的图像切片不能灰度值过低，因为灰度值过低，说明对应的场景对应的后像散射系数过低，不利于提取点目标冲激函数，同时过低的值可能被周围强度比较高的散射区域的阴影，并非其真实值的体现，所以，在选取切片时，应该选择具有明显高的后向散射系数，最好周围的场景相比而言，比较暗，但是其值并未发生饱和的区域。

在选取图像切片除了遵守以上的原则外，还应该根据所要求取的指标特征的不一样，选择不一样的图像切片，比如要计算辐射分辨率，就要选择后向散射系数比较均匀的区域，比如大面积的草坪面和水面，比如，要计算模糊度，最好选择从地面到海面的过渡区域，这段区域，后向散射系数，变化比较快，容易发生“鬼影”现象，能够比较容易的计算出模糊度的值。

### 4.4.4 点目标冲激函数的获取以及各指标的具体计算

获得符合各项指标要求的 SAR 图像切片后，找到图像中的最大值点对应的灰度，并且保证该点并未饱和，获取该点对应的列的值，并存于存放在数组中，

根据该数组，并以该数组作为输入，获得这个点目标的剖面图作为该点的点目标冲激响应函数曲线,如下图，但在实际处理中，为了提高各项参数的精度，需要对其进行插值，插值之后的点目标冲激响应函数作为各项指标计算的输入。

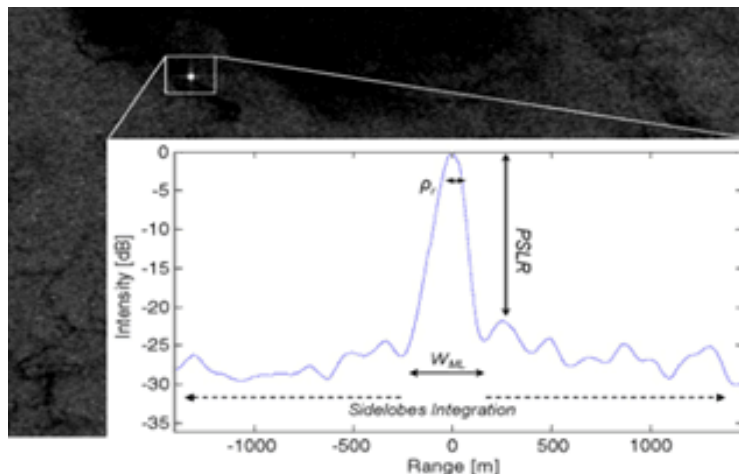


图 4-13 ScanSAR 中的冲激响应函数

Figure 4-13 Impulse response function in ScanSAR image

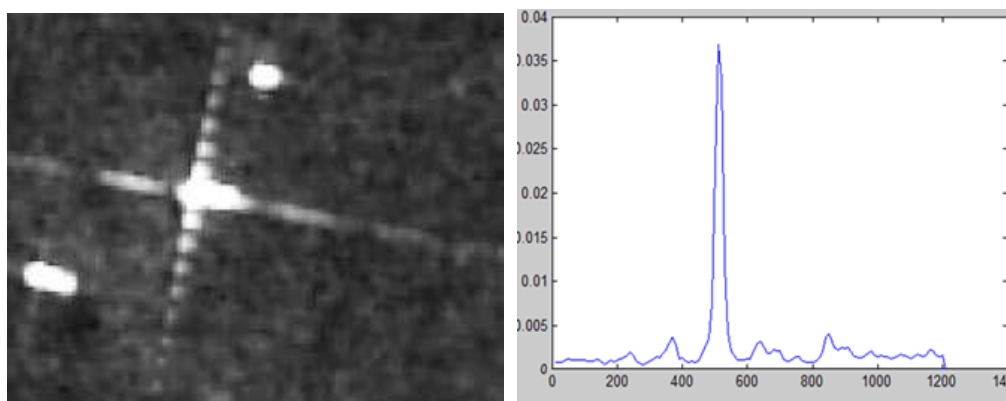


图 4-14 SAR 图像中的点目标和插值后的剖面图

Figure 4-14 SAR image in the point of the target and the profile of the interpolation

分辨率的计算步骤如下：

(1)在插值后图像中每一列找最大值，把每一列的最大值组成一距离行并保存在数组中

(2)在数组中找到最大点

(3)寻找距离向 3dB 像元宽度

①以最大值为中心，在距离向往左逐像素搜索，当像素值得大小与最大值的一半最接近时停止搜索，返回该像素与最大值像素之间的距离  $d_{r1}$ （单位为像素）

②以最大值为中心，在距离向往右逐像素搜索，当像素值得大小与最大值的一半最接近时停止搜索，返回该像素与最大值像素之间的距离  $d_{r2}$ （单位为像素）

(4)把 $d_{r1}$ 和 $d_{r2}$ 的值相加后减一,在乘以距离向像素元距离,得到距离向分辨率

(5)寻找方位向 3dB 像元宽度

①在插值后的图像的每一行找最大值,把这些最大值组成一方向行,并保存在数组中。

②在数组中找到最大值

③以最大值为中心,在方位向往上逐像素搜索,像素值得大小与最大值的一半最接近时停止搜索,返回该像素与最大值像素之间的距离 $d_{a1}$ (单位为像素)

④以最大值为中心,在方位向往下逐像素搜索,像素值得大小与最大值的一半最接近时停止搜索,返回该像素与最大值像素之间的距离 $d_{a2}$ (单位为像素)

(6)把 $d_{a1}$ 和 $d_{a2}$ 的值相加后减一,在乘以方位向像素距离,得到方位向分辨率。

流程如下:



图 4-15 距离向 (方位向) 分辨率计算过程

Figure 4-15 Range(azimuth)resolution calculation

## 峰值旁瓣比计算方法

在插值后的距离(方位)行中,找到最大值点的位置和 3dB 宽带,最大值点亮度  $P_m$ , 以 3dB 宽带的 2.3 倍作为第一个零点的位置, 从第一个零点的位置向右找到最大值作为旁瓣的最大值  $P_{smax}$ 。

$$PSLR = 10 \lg \frac{P_{s \max}}{P_m} \quad (4-12)$$

## 积分旁瓣比计算方法

①第一零点之间的宽度取-3dB 主瓣宽度的 2 倍作为主瓣和旁瓣交点的位置。则两个零点之间为主瓣宽度。

②计算两个零点之间所有像元的幅值之和作为  $E_s$ 。

③计算两个零点之外所有像元的幅值之和  $E_m$ , 计算积分旁瓣比。

$$ISL = 10 \lg \frac{E_s}{E_m} \quad (4-13)$$

根据以上定义和具体的操作过程, 得到各项指标的值如下所示。

表 4-1 合成孔径雷达图像各项参数仿真计算结果  
Table 4-1 Simulation results of the parameters of synthetic aperture radar image

SAR 图像质量指标参数名称	各项参数计算的结果
空间分辨率	3.0(m)
峰值旁瓣比	-13.6(db)
积分旁瓣比	-10.85(db)
图像动态范围	24.3521(db)
等效噪声系数	-28.1647(db)
等效视数	0.8571(db)
辐射分辨率	3.1810(db)
测绘带宽度	6858(M) (一个像素点 3m)
图像饱和度	17852<65535 (未饱和)

#### 4.4.5 分析与总结

由于合成孔径雷达（合成孔径雷达）在民用和军事侦察中的重要作用越来越广泛。因此，图像的应用具有现实意义和广泛的前景，但由于合成孔径雷达图像的特殊性会造成一些特殊的质量问题，使得合成孔径雷达图像中存在着较难的解读，并最终影响到合成孔径雷达图像的应用。因此，对合成孔径雷达图像质量评价及其应用研究具有重要意义。

本文所讨论的一些合成孔径雷达图像参数，部分是由我们自己提出的新概念，在一般情况下，对合成孔径雷达图像质量参数进行了总结，另一方面也为以后进一步讨论合成孔径雷达图像质量提供了良好的参考依据，这些参数提出了不完整、不完善的工作需要进一步扩展。

## 第五章 SAR 图像质量主观评价

### 5.1 SAR 图像质量主观评价提出的必要性

实际上,随着星载 SAR 的应用越来越广泛,对于图像质量的评价体系越来越完善,但是基于客观角度的质量指标体系,尽管越来越完善,但是依然不能完全彻底的得到完美的质量指标体系,所以应该加入主观评价的标准<sup>[36]</sup>。

图像质量评价的一般方法包含有主观以及客观评价。主观评价是指参与测试者获得图像,然后对得到的图像直接进行评价。而客观评估则不同,客观评估是首先通过定义一些进行质量评估的若干指标,并且这些指标按照权重有所区分,然后通过建立图像指标模型,按照指标进行客观计算得到结果,达到与人的主观评估类似或者相等的要求<sup>[5]</sup>。但由于合成孔径雷达图像的特殊性,对一般图像的客观评价方法并不能完全适用。但是目前对于合成孔径雷达质量评估参数仅是单纯对图像特性的描述,并没有与 SAR 图像的使用联系起来动态分析,而目前常用的合成孔径雷达图像的评估是基于点目标和面目标两个层面来进行的,这种划分方式利于图像质量评估系统的实现。然而,在一般情况下,以上的两种评价指标都是直接从图像层面进行的,但并没有有效的方式来评价和表示合成孔径雷达图像内容(如增益、重影、模糊等)等方面的质量<sup>[37]</sup>,然而,在一般情况下,之前描述的两种评价评估指标都是直接从图像层面进行获取的,但对于合成孔径雷达图像内容(如增益、重影、模糊等)的质量评估并没有有效的方法进行表达,但解决这些问题对于提高图像质量评估具有重要的意义。

### 5.2 SAR 图像质量主观评价的内容和方法

主观评价是指判读人员依据一定的判读准则,对 SAR 卫星图像进行判读,用来定义和说明 SAR 图像质量,进行考核方法如下:针对要评价的图像质量指标,选取相关典型图像样本,由判读人员根据一定的判读标准与判读经验,对图像判读,确定是否得到指标。本课题将根据以往的判读经验,并针对 SAR 图像特点进行研究,通过对多次主观判读的分析研究,设计主观评价计分表,研究主观判读评分表的评价参数,包括定性评价和定量评价。同时,从总体上设计较为客观实用的主观评价方法,分别对观测人员,测评图像,测试环境,评测流程,数据处理等方面进行设计和规定,以克服主观评价的随意性<sup>[38]</sup>。



具体方法是：首先，由各项指标的测量结果，计算达标系数；然后根据该项指标对综合效益的影响程度设定加权系数，计算综合效益系数，最后，按照综合效益系数计算结果，给出定量质量评定意见。如某项指标包含分项指标，按照指标对最终使用影响程度，设定各项指标加权系数，按照各项权重，获得某项指标的达标系数，获得人眼对于需要进行测试的图像的质量的整体感觉，一般认为图像的主观质量的认定是实际评价得到的图像质量的真实值，判断客观方法是否准确的主要标准是客观方式得到的评价结果与主观评价的质量结果是否一致或极其接近。

### 5.2.1 SAR 图像主观评价人员安排

人员组成：由训练有素的专业判读人员和少量从事图像处理工作的非专业人员构成。由于专业人士有相关的经验和判读基础，因此这类人员得到的对于图像质量评价的结果具有较好的准确度和可靠性；而非专业人员几乎没受过训练，主要注意的是图像失真方面的因素，所得到的图像质量代表平均观察者对图像评价的基本感觉。

人员数量：将判读人员的数量控制在适当范围，既使主观评价分值充分接近真实的图像质量，又不至于人员过多难以实现。

根据统计估计理论，可知均值和方差的估计在其相应真值附近波动，主观评价的人数为  $n$  时，均值和方差的标准差分别为： $\frac{\sigma}{\sqrt{n}}$  和  $\frac{\sqrt{2}\sigma^2}{\sqrt{n-1}}$ ，而单个判读员的均分和方差的标准差分别为  $\sigma$  和  $\sigma^2$ 。因此，多个判读员的主观评价均分误差小，更接近图像质量的实际值。

打分的独立性：每个判读员均独立进行主观评价工作，互不干扰，以保证主观评价的独立性。

## 5.3 图像质量主观评价的各项国际标准

在主观质量评估方面国际上已经存在许多成熟的技术和国际上制定的各项标准，主观质量评分法(MOS Mean Opinion Score)是对图像质量进行主观评价中最具经典最常用的方法<sup>[40][42]</sup>，主观质量评分法又包含有绝对评价和相对评价。

绝对评价是按照视觉感受来对图像进行分等级实现的，下表罗列出了国际上

制定的 5 级绝对评价标准尺度，分为妨碍尺度和质量尺度。质量尺度标准适用于一般人来评价图像质量；妨碍尺度标准通常适用于专业人士对图像进行评价<sup>[40] [41]</sup>。

相对评价方法是指测试人员首先获得一系列图像，然后对图像进行好坏划分，得到差异化的划分结果，依据这个结果，定义划分等级，并给出评分的结果。相对尺度如表 5-2 所示。

表 5-1 国际规定的图像质量评价绝对尺度  
Table 5-1 Absolute scale of image quality evaluation

质量尺度标准		妨碍尺度标准	
5 分	不能发觉图像质量有丝毫变坏	5	非常好
4 分	不妨碍观看的基础上图像质量略微差	4	好
3 分	图像质量变差，观看变困难	3	一般
2 分	观看困难变得明显	2	差
1 分	观看障碍严重	1	很差

表 5-2 国际规定的图像质量评价相对尺度  
Table 5-2 Relative scales of image quality evaluation in international regulations

分数	相对测量尺度	绝对测量尺度
5 分	一群中最好的	非常好
4 分	处于该群中平均水平的	好
3 分	该群中的平均水平	一般
2 分	差于该群中的平均水平的	差
1 分	该群中最差的	非常差

## 第六章 总结和展望

### 6.1 工作总结及创新点

合成孔径雷达是微波遥感的代表，是当今世界众多微波成像传感器的类型之一，合成孔径雷达不受时间和天气与环境的限制，具有理想的成像效果，因此遥感技术的应用就突显出了格外的优势，作为一种获取微波遥感图像信息的技术，并且伴随合成孔径雷达技术的不断提高，雷达在军事目标探测和民用勘察中发挥的作用越来越大，合成孔径雷达图像的应用也越来越广泛，也正是基于这一原因，对合成孔径雷达图像质量提出了更高的要求，对图像质量的评估标准也有待完善，目前在大多数情况下，对于合成孔径雷达图像质量评价与光学图像评价相似，最大的弊端在于并不能与图像应用结合起来进行开展，因此，研究合成孔径雷达图像的应用研究具有十分重要的意义。同时也意味着对雷达图像质量的评估提出了更高的标准和要求。围绕这一课题，全文的主要工作归结为以下几个方面：

本文首先在绪论中对合成孔径雷达的原理和发展历史进行了基本说明和简要的介绍，随后深入进行探讨了合成孔径雷达和合成孔径雷达图像使用的重要意义，最后对 SAR 图像质量评估的研究现状进行了描述和说明，接下来在全文的第二章给出了合成孔径雷达几种常见的成像算法，因为图像质量评价的前提是可以从原始回波得到 SAR 图像，所以对图像的质量进行评价，对成像算法进行了一定的描述和说明显得十分重要，得到承上启下的作用，同时也充实了文章的逻辑结构，在全文的第三部分，说明现有图像质量指标与方法，主要内容包含对成像质量和图像质量的界定和图像产品分类进行了说明介绍和介绍了现有星载 SAR 图像质量指标的具体定义和物理意义和具体的算法说明，基于这些，在实际场景进行成像，通过以上的说明，成像后得到各项指标的具体情况，最后介绍各项指标对军事目标侦察的影响，并说明目前的图像质量指标体系的优点与所存在的不足，并基于此，创新的提出了星载 SAR 分布式目标成像质量，分布式目标能局部有效的解决传统质量指标的不足，因为在实际成像中传统的质量指标是相互联系和制约的，不能单独对某个指标进行评价，并在接下来的第四章对星载 SAR 分布式目标成像质量一一进行了详细介绍，最后从图像质量评价的整体层面考虑，提出 SAR 图像的主观评价方法。

本文的创新点在于以下几个方面，首先，对于传统指标进行了完善实现了全面的说明与总体的概括和物理意义的说明，包含的指标不仅包含有点目标指标，

还包含有面目标指标,并结合项目的实际需求,不同的指标对于评价不同的 SAR 图像,所占有的权重和比例是不一样的,并在实际场景中成像并通过算法得到仿真的实验结果,第二,对于图像质量的评估,不仅是从传统角度出发,进一步从分布式目标角度出发,提出了分布式的质量评价指标,主要包含有空间频率调制度,点簇扩散函数,平面栅格分辨率,并进行了实验验证,第三,对于合成孔径雷达图像质量的评估应该与图像的应用相结合起来说明,比如用于军事目的 SAR 图像,可能强调的重点是对于特定军事目标的发现和探测,但对于地质探测,主要看中的是整体的地貌的识别情况,第四,拓展的提出成像链的概念,忽略成像链中的所有环节,只考虑成像链的开始端口和终端输出对质量进行描述。最后,发展并拓展了 SAR 图像质量评估的主观评价方法的具体实现过程。

## 6.2 后续工作展望

基于本文所探讨的内容,后续的研究方向包含以下一些内容,首先实现对传统的合成孔径雷达质量指标体系的充实和进一步完善,并添加丰富的实际场景实验的数据和结果分析,所得到的这些结果反过来同时得到各项指标的具体情况可以用来指导和改进 SAR 系统的成像情况和 SAR 系统的各项参数设置。同时对于新提出的星载 SAR 分布式目标成像指标有待进一步的完善和发展,现有的这些只有有效的对大量 SAR 图像进行定性和局部的定量分析,通过应该增加对于星载 SAR 分布式目标成像指标的验证性实验,并且提出更多的符合实际并且有效果的更多的新指标,同时,目前提出的成像链只是一个模糊笼统的概念,可以具体研究,逐步细化,并进行各种试验和实验测试。最后,对于一幅合成孔径雷达图片的综合评价绝对少不了主观评价的内容,所以应该结合主观评价和客观评价给出最后的整体评价结果,同时,应该加强,主观评价过程的规范化和准确化进程。因此,应该加强这方面的工作。

## 参 考 文 献

- [1] Cumming I.G., Wong F.H., 合成孔径雷达成像-算法与实现. 北京:电子工业出版社, 2007:2,93.
- [2] 叶映宇, 合成孔径雷达干扰方法的研究[硕士论文], 电子科技大学, 2007.
- [3] 耿佳佳, 干涉合成孔径雷达的关键技术研究[硕士论文], 西安电子科技大学, 2009.
- [4] 王赞, BAQ数据压缩分块对 SAR 图像质量的影响研究[硕士论文], 华东理工大学, 2009.
- [5] 张倩, SAR 图像质量评估及其目标识别应用[博士论文], 中国科学技术大学, 2007.
- [6] Y.Grevier, T.J.Pultz,T.I.Lukowski.T.Toutin Temporal Analysis of ERS-1 SAR Backscatter for Hydrology Applications.Canadian Journal of Remote Sensing,1995,22(1):65-76
- [7] C.Dobson,Soil Moisture Measurement Using Synthetic Aperture Radar. IGARSS'81.198:427-436
- [8] H.Skriver,J,K,Ji,J,Dall,K.Woelders,A.Thomsen,A Multi-Tempirale and Multi-Frequency Study of Polarimetric Signatures of Soil and Crops,European Conference on Synthetic Aperture Radar,Germany,1996:481-484
- [9] 曲小宁, 合成孔径雷达干涉测量及若干关键技术研究[博士论文], 西安电子科技大学, 2009.
- [10] F.M.Seifert,H.Kietzmann,M.Zink.Monitoring Central European Forests Using SIR-C/X-SAR Data. European Conference on Synthetic Aperture Radar, Germany,1996:461-464
- [11] 王开志, 斜视条件下高分辨率合成孔径雷达成像技术 [博士论文], 上海交通大学, 2006.
- [12] M.L.Imhoff,M.Story,C.Vermillion,et al.Forest Canopy Characterization and Vegetation Penetration Assessment with Spaceborne Radar.IEEE Trans.on GRA,1986,24(4):535-542
- [13] 刘泉, 星载合成孔径雷达图像滤波及理解[硕士论文], 东南大学, 2007.
- [14] Harris JE,Ostler R S,Chabries D M,et al,Quality measures for SAR images[C]//Acoustics,Speech, and Signal Processing,1988,ICASSP,1988 International Conference on. IEEE,1988:1064-1067.
- [15] Martinezl A,Marchand J.SAR image quality assessment[J], Revista de

- Teledeteccion,1993,2:12-18.
- [16] Meadows P. The Use of Ground Receiving Stations for ERS SAR Quality Assessment[C]//SAR workshop: CEOS Committee on Earth Observation Satellites. 2000,450:525.
- [17] Cheng J., Han S., Incoherent coincidence imaging and its applicability in X-ray diffraction[J]. Phys. Rev. Lett., 2004, 92:093903.
- [18] 王卫威, 基于最优估计的 SAR 图像提高分辨率方法研究[博士论文], 国防科技大学, 2009.
- [19] R Janssen. Computational Image Quality [M]. SPIE Press, 2001.
- [20] I G Cumming, F H Wong. Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithm and Implementation [M]. Norwood, MA: Artech House, INC, 2005.
- [21] Y Wang, T L Ainsworth, J S Lee. Assessment of system polarization quality for polarimetric SAR imagery and target decomposition [J]. IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, 2011, 49 (5): 1755-1771.
- [22] 韩国强, 对 SAR 干扰效果的评估方法. 雷达科学与技术. 2013.
- [23] D Small, S Biegger, Nüesch. Automated tiepoint retrieval through heteromorphic image simulation for spaceborne SAR sensors [C]. ERS-ENVISAT Symposium, Gothenburg, Sweden, 2000, 16-20.
- [24] Borg G. G., Harris J. H., Martin N. M., et al, Plasma as antennas: Theory, experiment and applications[J]. Physics of Plasma, 2000, 7:2198.
- [25] D R Held, J R Bennet, R A Shuchman. The SEASAT SAR: Engineering Performance Evaluation [C]. IGARSS Symposium, Munich, Germany, 1982, 126-129.
- [26] 刘兆军. 一种光学遥感成像系统优化设计新方法研究, 航天返回与遥感. 2013.
- [27] Tonks L., Langmuir I. Oscillations in ionized gases[J]. Physical Review, 1929, 33(2):195.
- [28] Borg G. G., Harris J. H., Martin N. M., et al, Plasma as antennas: Theory, experiment and applications[J]. Physics of Plasma, 2000, 7:2198.
- [29] Sohrab Ahmadi Handjani, Reza Kheradmand, Neda Dadashzadeh, Ghost Imaging with Pseudo-Thermal Light[C]. Transparent Optical Networks, 2011, 1-4.
- [30] 韩晓波, 视频目标跟踪算法研究及应用[硕士论文], 中国科学技术大学, 2009.
- [31] Ori Katz, Yaron Bromberg, Yaron Silberberg, Compressive Ghost Imaging[J]. Applied Physics Letters, 2009, 95:131110.
- [32] 巨西诺, 基于小波域灰度梯度共生矩阵的遥感影像模糊度分析, 北京工业大学学报, 2009.

- [33] Scarcelli G., Berardi V., Shih Y., Can two-photon correlation of chaotic light be considered as correlation of intensity fluctuations?[J]. Phys. Rev. Lett., 2006, 96(6):063602.
- [34] Jeffrey H., Shapiro, Computational Ghost Imaging[J]. Lasers and Electro-Optics, 2009.
- [35] Cao D., Xiong J., Wang K., Geometrical optics in correlated imaging systems[J]. Phys. Rev.A., 2005, 71:013801.
- [36] Howell J. C., Bennink R. S., Bentley S. J., Boyd R. W., Realization of the einstein-polsky-rosen para-dox using momentum and position entangled photons from spontaneous parametric down conversion[J]. Phys. Rev. Lett., 2004, 92:210403.
- [37] 汪岨, 干涉合成孔径雷达成像及其遮掩盖式干扰技术研究[硕士论文]. 西安: 电子科技大学, 2013.
- [38] Gatti A, Brambilla E, Bache M and Lugiato L. A., Ghost imaging with thermal light: comparing entanglement and classical correlation[J], Phys. Rev. Lett., 2004, 93:093602.
- [39] Cai Y., Zhu S. Y., Ghost interference with partially coherent radiation[J]. Optics Letters, 2004, 29:2716.
- [40] 胡安洲, 主客观一致的图像感知质量评价方法研究[博士论文]. 合肥: 中国科学技术大学, 2012.
- [41] Abouraddy AF, Saleh BE and Sergienko AV, et al. Role of entanglement in two photon imaging[J]. Phys. Rev. Lett., 2001, 87:123602.
- [42] 任雪, 图像质量客观评价方法的研究与实现[硕士论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.

## 致 谢

转眼间，两年半的硕士生求学生活即将结束，站在毕业的门槛上，回首往昔，内心有着复杂的情感，有感恩，有不舍。在硕士毕业论文即将完成之时，谨此向帮助过我和支持我的人表示最真诚的感谢和最美好的祝愿。

本论文是在我的导师王开志老师的细心指导之下完成的，两年多来，导师渊博的专业知识，严谨的治学态度，诲人不倦的高尚师德，平易近人的人格魅力，幽默却深含哲理的生活态度对我影响深远。导师不仅授我以雷达领域的专业知识，而且教我做人，本论文从选题到完成，每一步都是在导师的指导下完成的，倾注了导师大量的心血，在此我向我的导师王开志老师表示深切的谢意与祝福！

本论文的完成也离不开其他各位老师、同学和朋友的关心与帮助。在此也要感谢刘兴钊，王军锋，高叶盛等各位老师，在论文开题、初稿、预答辩期间所提出的宝贵意见和在两年多的学习生涯中给予的在学习和生活的各种帮助，感谢两年多来在我的学习阶段给予的各种帮助和建议的生辉博士，朱炳祺博士，林欣博士，陆钱融博士，郑红超博士，张琳坚博士，还要感谢金翼然师兄，侯英杰师兄，王瑞学姐，谢辨学姐，郭睿师兄等同门的师兄师妹们，以及同一届的林超博，靳猛，王皇龙，杨箫，杨皓天，杨路江，他们给我的生活带来了进步和欢乐在科研过程中给我以许多鼓励和帮助。还有刘磊博士，张晓文博士，戴金鸿，国际，王哲，张洁，颜佳丽，任杰，也在我的学习和生活中给予了源源不断的帮助，还有才入学的博士一年级和研究生一年级的同门师弟师妹们。回想整个论文的写作过程，虽有不小，但是也正是在面临一个个问题，解决一个个问题中得到了自我的提高，因此倍感珍惜。

还要感谢父母和姐姐在我求学生涯中给予我无微不至的关怀和照顾，一如既往地支持我、鼓励我。给予我经济上的帮助，使我在学习之外没有其他的忧虑，不管我遇到什么问题，他们都深信不疑地支持我，帮助我。

同时还要感谢的就是我宿舍的同学，我的室友韩李飞，桂超，顾时豪，刘弟文，高祥路，孟庆阳，李文成。

最后向百忙之中抽空对我的论文进行审阅和评估的各位老师和专家表示衷心的感谢。



## 攻读硕士学位期间已发表或录用的论文

- [1] Jiajia Guo, Kaizhi Wang, Yiran Jin, Xin Lin, Yesheng Gao, Xingzhao Liu, High Precision Calculation of SAR Image Quality Parameters. APSAR 2015: 5th Asia Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar, Singapore, 2015. (已录用)