

成像雷达并行仿真优化技术

汪连栋 杜 静 著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

成像雷达并行仿真优化技术

汪连栋 杜静 著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书全面系统地论述了成像雷达并行仿真的基本理论、优化方法、软件开发和实验评测等关键技术。为了便于研究的开展和成果的验证,本书以主流的并行体系结构——工作站机群为平台,针对重要的仿真应用——SAR 成像处理程序的并行仿真优化技术进行深入研究,重点研究了仿真程序的并发性、平台与程序的适用性、并行模式选择、并行优化方法、并行软件实现与性能评测等关键技术。基于研究的并行仿真优化技术,开发了 SAR 并行成像软件系统,并进行了详细的实验评测和性能分析。本书条理清晰、内容新颖、分析严谨、系统性强、理论联系实际、强调优化技术的工程实现,具有较强的实际应用背景。

并行计算是计算机发展的必然趋势,而并行优化技术已是许多学科领域的科技工作者都应熟练掌握和应用的一门技术。本书可供在高性能仿真尤其是雷达信号并行仿真等领域进行研究工作的科技工作者和工程师们使用;也可作为高等院校计算机应用、信号处理仿真、电子工程等专业的教师和研究生进行有关课题研究或课程学习时的参考书。本书所附的并行成像代码也能够为并行仿真开发人员和并行优化设计人员提供有益的学习参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

成像雷达并行仿真优化技术/汪连栋,杜静著. —北京:电子工业出版社,2012.8

ISBN 978-7-121-17047-8

I. ①成… II. ①汪… ②杜… III. ①雷达信号处理—图象处理—仿真 IV. ①TN957.52

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第099076号

策划编辑:康霞

责任编辑:刘凡

印刷:

三河市鑫金马印装有限公司

装订:

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开本:720×1000 1/16 印张:12 字数:263千字

印次:2012年8月第1次印刷

印数:3000册 定价:49.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

前 言

当前，仿真技术要求数值模拟达到高分辨、高逼真、全系统的规模和能力，导致仿真程序通常具有极大规模的数据量和计算量，对高性能计算的需求巨大。特别以 SAR 为代表的新一代成像雷达，高实时性更成为其关键的性能需求。SAR 成像处理通常需要十亿至百亿次的运算速度，该运算能力需求已远远超过了目前单 CPU 所能达到的程度。在这种背景下，以 SAR 成像为代表的仿真技术与并行计算技术的结合变得自然而迫切，产生了高性能并行仿真技术。

目前，主流的并行计算平台形式多样，仿真程序特点也各不相同，如何采用并行计算平台加速仿真程序是值得深入研究的问题。本书以基于并行计算平台的高性能仿真技术为主题，从硬件和软件的角度，着重讨论了并行仿真程序开发过程中涉及的仿真程序的并发性、平台与程序的适用性、并行模式选择、并行优化方法、并行软件实现与性能评测等关键技术；并以典型的并行计算机——多核工作站机群为平台，以重要的信号处理应用——SAR 成像处理程序为示例，详细阐明并评测了本书所研究的高性能并行仿真技术。

本书主要内容共分 7 章。

第 1 章系统介绍了高性能并行仿真技术的研究动机、研究内容和本书的研究重点，使读者不但能够了解雷达对抗信号级仿真的原理与方法，而且有利于掌握并行仿真所关注的核心技术。本章重点总结了 SAR 成像技术对高性能的迫切需求，分析了并行计算平台能够提供的性能优势，自上而下明确提出了 SAR 成像仿真程序适合采用的并行优化关键技术。

第 2 章剖析了雷达对抗信号级仿真的并发性。根据雷达对抗信号级仿真本身的特点，提出该应用具有信号级、任务级和数据级三种并发性，适合采用任务并行、数据并行和流水线并行三种并行方式。典型 SAR 成像算法的并发性分析进一步说明了，并发性研究是算法并行化的前提，能够充分发掘算法的可并行化潜力，指导选择正确的并行优化方向。

第 3 章研究了并行计算平台和高性能仿真程序之间的适用性。重点提炼出仿真程序特性集合、并行计算平台性能指标体系和并行优化目标要素集合。基于这三项研究，提出了确定程序适用性和平台适用性的方法。该研究是一种开拓性的研究思想。实例分析表明，研究成果能够根据给定程序准确高效地选择适合的并行计算平台，以及根据给定平台来设计面向平台性能的并行优化技术。

第 4 章研究了基于程序特性的并行模式选择技术。确定适合的并行模式是设计并行优化技术的基础。因此，本章重点研究了并行模式框架中的选择并行化区域、确定并行粒度、确定映射层次和确定控制模式四个关键部分。以典型 SAR 成像程序为例，根据程序特性确定了合适的并行模式，为并行优化技术的实施研发了易于

优化的软件平台。

第 5 章研究了面向性能的普适性并行优化技术。当前主流并行计算机的性能瓶颈主要体现在访存和通信方面，因此，以典型 SAR 成像程序为代表，重点针对访存开销优化、通信开销优化和延迟隐藏三种关键技术进行了研究。该研究采用程序变换技术，能够优化存储局部性、提高网络带宽利用率，从而增强对计算单元的持续供数能力。

第 6 章设计开发了 SAR 成像并行软件系统，重点介绍了并行软件的设计策略和方法，具体内容包括两个方面。首先，详细介绍了软件实现的多个不同版本，以及多机版本所采用的四种关键并行策略；其次，全面给出了每个版本设计的 UML 类图、类功能描述表、相关算法的流程图和关键代码段。所实现的 SAR 成像并行软件为第 7 章的并行优化技术评测提供了良好的实验对象。

第 7 章介绍了 SAR 成像并行软件在多核工作站机群上的多项关键性能指标测试结果。这些指标具体包括：加速比、可扩展性、各功能代码段优化情况、CPU 和内存使用率、网络带宽利用率和访存局部性等。其目的在于测试各种数据规模、不同计算复杂度和多种并行优化技术对程序运行时性能的影响。通过实验评测和性能分析，验证了所采用的并行优化技术的有效性，并且为开发其他并行程序时选择并行策略、配置硬件平台和设置软件参数提供了有力的参考依据。

本书是成像雷达并行仿真中关于并行优化与性能评测的一本专著，是作者多年理论研究成果和工作实践经验的总结。本书全面分析了高性能仿真程序的特点和并行计算平台的特征，探索适合开发不同体系结构性能优势的并行仿真优化技术，形成关于成像雷达并行仿真性能评测的系统理论和方法，能够为更多并行仿真应用的开发提供可借鉴的优化手段。本书介绍的并行优化技术和并行仿真程序具有高效性、普适性、可扩展等多种技术优势，为解决开发高性能仿真程序所需要的并行体系结构、并行优化算法、并行程序设计、并行性能评测等问题打下了基础，具有重要的理论意义和应用价值。本书内容是复杂大规模仿真研究的必然趋势，在基础科学研究和国家安全的尖端科技领域中起着不可替代的作用。本书取材先进、内容精炼、体系完整，理论联系实际，具有很强的实际应用背景，基本反映了近年来成像雷达并行仿真优化技术研究领域的新理论、新方法和新成果，国内未见同类书籍出版。

本书主要面向高性能仿真尤其是雷达信号并行仿真等领域研究工作的科技工作者和工程师。对于那些不具有较强并行计算背景的读者，本书也介绍了一些相关理论。本书也可作为高等院校并行计算、信号处理仿真、电子工程等专业的教师和研究生进行有关课题研究或课程学习时的参考书。本书附录的并行成像代码能够为并行仿真开发人员和并行优化设计人员提供有力的学习参考。

在本书的撰写出版过程中，得到了许多科技人员的大力支持与帮助，在此向他们表示深深的感谢并致以崇高的敬意。首先要感谢中国洛阳电子装备试验中心的领导们，他们对本书的撰写一直给予悉心的关心和指导，并提出了大量宝贵的意见。其次

要感谢王华兵、敖富江、韩文彬、李晓燕、符淑琴，他们利用丰富的编程技术与技巧进行了书中大量示例的实践测试，并且直接参与了本书部分内容的编写与修订工作。再次要感谢 63880 部队研究所和博士后科研工作站的同事们，特别感谢马孝尊、张德峰、刘世军、曾勇虎、戚宗峰、蒙洁、狄东宁、李林、赵艳丽、柏仲干、聂纯、陈瑛、朱利晶、陈冬冬、郭金良、韩国强等，他们对本书的研究和撰写给予了热情的帮助并提出了宝贵的建议。还要感谢家人的支持，使本书的撰写无后顾之忧。特别感谢多名同志撰写的论文和专著，我们从中得到了很大的启发和借鉴，参考的各类文稿都尽量列到参考文献之中，但还有遗忘或遗漏，在这里也一并感谢那些无名英雄。感谢评审人员对本书提出的许多充满智慧且实用的批注，这对本书的结构、内容和质量都有着重要的影响。最后，本书得到了电子工业出版社的大力支持，在此一并表示感谢。

由于本书涉及内容领域较新，有些问题还有待进一步深入研究，加之作者学识有限，书中错误和短见之处，恳请读者不吝批评指正。

汪连栋 杜 静

电子信息系统复杂电磁环境效应国家重点实验室
2012 年 4 月 15 日

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 高性能并行仿真技术	(1)
1.1.1 现代仿真技术对高性能的计算需求	(1)
1.1.2 并行计算平台的性能优势	(2)
1.1.3 基于并行计算平台加速高性能仿真程序	(3)
1.2 SAR 成像处理概述	(4)
1.2.1 SAR 简介	(4)
1.2.2 SAR 成像算法	(7)
1.3 并行计算基础	(9)
1.3.1 并行体系结构	(10)
1.3.2 并行编程模型	(14)
1.3.3 并行优化算法	(20)
1.4 SAR 成像并行仿真	(22)
1.4.1 SAR 成像并行算法	(22)
1.4.2 工作站机群体系结构	(23)
1.4.3 并行化关键技术	(24)
1.5 小结	(26)
第 2 章 雷达对抗信号级仿真的并发性	(27)
2.1 并发性特点	(27)
2.1.1 矢量信号并发性	(27)
2.1.2 仿真流程并发性	(28)
2.1.3 数据区域并发性	(29)
2.2 并行计算分解	(31)
2.2.1 并行分类	(31)
2.2.2 任务并行	(32)
2.2.3 数据并行	(33)
2.2.4 流水线并行	(34)
2.3 SAR 成像算法的并发性	(35)
2.3.1 SAR 实测数据的存储访问特点	(35)
2.3.2 基于实测数据的 R-D 算法并发性	(36)
2.4 小结	(37)

第 3 章 并行计算平台和仿真程序的适用性	(39)
3.1 问题的提出	(39)
3.2 高性能仿真程序的特性	(41)
3.3 并行计算平台的性能指标	(42)
3.4 并行优化目标要素	(43)
3.5 平台和程序的适用性	(44)
3.5.1 确定平台的适用性	(45)
3.5.2 确定程序的适用性	(51)
3.6 小结	(55)
第 4 章 基于程序特性的并行模式选择技术	(56)
4.1 问题的提出	(56)
4.2 选择并行化区域	(57)
4.2.1 时间开销比重因素	(57)
4.2.2 并行化特性因素	(60)
4.3 确定并行粒度	(63)
4.3.1 控制并行粒度的基本准则	(63)
4.3.2 R-D 算法的并行粒度	(65)
4.4 确定映射层次	(69)
4.4.1 确定映射层次的方法	(70)
4.4.2 R-D 算法的映射层次	(72)
4.5 确定控制模式	(73)
4.5.1 控制模式分类	(73)
4.5.2 R-D 算法的控制模式	(75)
4.6 小结	(76)
第 5 章 面向性能的并行优化技术	(77)
5.1 访存延迟避免技术	(78)
5.1.1 问题的提出	(78)
5.1.2 访存开销优化技术	(79)
5.1.3 R-D 算法的访存开销优化技术	(80)
5.2 通信延迟避免技术	(84)
5.2.1 问题的提出	(84)
5.2.2 通信开销优化技术	(84)
5.2.3 R-D 算法的通信开销优化技术	(87)
5.3 延迟隐藏技术	(94)
5.3.1 问题的提出	(94)
5.3.2 延迟隐藏优化技术	(95)

5.3.3 R-D 算法的延迟隐藏优化技术	(100)
5.4 小结	(102)
第 6 章 SAR 成像并行软件设计与实现	(104)
6.1 软件说明	(104)
6.1.1 单机版本	(106)
6.1.2 多机版本	(106)
6.2 软件设计	(109)
6.2.1 线程安全队列	(109)
6.2.2 单机版本	(111)
6.2.3 多机版本	(114)
6.3 运行界面及输出图像	(130)
6.4 小结	(131)
第 7 章 SAR 成像并行软件实验评测	(133)
7.1 加速比	(134)
7.1.1 加速比定律	(134)
7.1.2 实验评测	(136)
7.2 可扩展性	(139)
7.2.1 可扩展性定律	(139)
7.2.2 实验评测	(140)
7.3 各功能段优化情况	(142)
7.3.1 功能代码段优化理论	(142)
7.3.2 实验评测	(151)
7.4 CPU 和内存使用率	(153)
7.4.1 指标说明	(153)
7.4.2 实验评测	(154)
7.5 网络带宽利用率	(160)
7.5.1 指标说明	(160)
7.5.2 实验评测	(160)
7.6 访存局部性	(162)
7.6.1 存储重用理论	(162)
7.6.2 实验评测	(165)
7.7 其他测试	(168)
7.7.1 文件读取耗时测试	(168)
7.7.2 MPI 线程模式测试	(169)
7.8 小结	(170)
参考文献	(171)

第1章 绪 论



并行计算是加速高性能仿真程序运行的主要手段。随着仿真应用的日益复杂,以及并行系统规模的不断扩大,并行仿真开发在平台选择、优化设计、实验评测等阶段都涌现出制约性能提高的大量问题。本书以成像雷达并行仿真的优化实现为例,针对其中一些关键问题进行了深入探讨和研究,并以多核工作站机群为平台,针对典型 SAR 成像算法实现了所提出的优化技术,获得了指导性的结论和高效的 SAR 成像仿真软件。研究工作跨越体系结构领域和仿真应用领域,涉及 SAR 成像算法、并行计算相关研究、SAR 成像并行仿真技术等内容。这些内容是实现 SAR 成像并行仿真优化技术的基础,为此本章将对这些内容进行了总结。首先介绍现代仿真技术对高性能的需求;其次概述 SAR 原理和 SAR 成像算法;然后总结并行计算的基础知识——并行体系结构、并行编程模型和并行优化算法;最后介绍 SAR 成像并行仿真研究的相关工作,并总结本书在并行仿真优化方面的研究内容。

1.1 高性能并行仿真技术

1.1.1 现代仿真技术对高性能计算的需求

随着数值计算的发展和计算机能力的提高,越来越多的科学领域开始采用仿真模拟方法进行问题建模与数值求解,以解决科学研究与工程设计中的实际问题。采用仿真模拟不仅节约了大量的人力和物力开销,还能解决许多实验方法所不能解决的问题。目前,仿真技术在基础科学研究、国民经济和国家安全的尖端科技领域中起着不可替代的作用,成为推动科学发展和社会进步的重要研究手段。

当前,仿真技术要求数值模拟达到高分辨、高逼真、全系统的规模和能力^[1],导致其仿真程序通常具有极大规模的数据量和计算量,对高性能计算的需求巨大^{[2][3]}。

例如, 据估计, 蛋白质折叠程序的计算量达到 10^{21} 量级, 需要 10^{15} 量级的计算能力; NASA 研究中心专家分析, 要在 15min 内完成对飞机机翼或整架飞机的大涡流模拟, 分别需要 10^{15} 量级或 10^{18} 量级的计算能力^{[4][5]}。该运算能力需求已远远超过了目前单 CPU 所能达到的程度, 导致当前的单机计算平台已无法满足现代仿真技术对高性能的巨大需求。在这种背景下, 仿真技术与并行计算技术的结合变得自然而迫切, 产生了高性能并行仿真技术。

在仿真领域中, 实时、高分辨率合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar, SAR) 成像技术是当前军事领域的热点研究问题^{[6][7]}。SAR 是一种高分辨率成像雷达, 广泛应用于侦察、武器制导、导航、定位、对机动目标探测和跟踪、导弹目标识别等军事领域。现代战场信息瞬息万变, 为了获得战场先机, 对实时、高精度 SAR 成像技术的需求越来越迫切^{[8][9][10]}。SAR 成像处理具有庞大的数据量和运算量, 通常需要十亿至百亿次的运算速度。大量的数据处理和复杂的运算操作制约了 SAR 成像处理的实时性。例如, 对于规模为 $24 \times 17.7 \text{ km}^2$ 的某 L 波段 SAR 成像条带, 飞行时间仅 7min16s, 发射脉冲 37 万个, 数据采样达 7.86 亿次, 采用浮点数据 (4 个字节) 来存储, 需占用空间 29.28GB。对于该次采样的回波数据进行成像处理, 基于当前较为先进的单台 Dell Precision 690 工作站 (CPU 为 Intel Xeon x5355@2.66GHz, 内存 8GB), 即使采用忽略了部分复杂计算操作的串行成像算法也需要运行 1.67h, 远远超过了整个飞行时 SAR 的工作时间。而且, 随着 SAR 成像处理系统朝着高带宽、高分辨率方向不断发展, 其处理的数据量和运算量还会急剧增加^{[11][12]}。普通计算机和代价昂贵的专用硬件系统已远远无法满足日益增长的 SAR 成像处理需求, 而传统的串行算法也无法利用并行计算平台, 运算速度慢, 难以扩大规模, 不能满足日趋复杂的雷达对抗信号仿真需求^[13]。在这种背景下, 采用并行处理技术是实现高性能 SAR 成像的必经之路。

1.1.2 并行计算平台的性能优势

与串行计算相比, 并行计算能够有效利用高性能并行计算机的系统资源, 实现系统性能最大化, 从而加快求解问题的速度, 提高求解问题的规模, 是目前唯一能满足实际大规模计算需求的支撑技术^{[14][15]}。其中, 并行计算平台是并行计算研究的基础, 它结合了并行计算机系统和并行编程模型, 为程序提供了多任务可同时并发执行的处理模式。并行计算机是具有多个内部处理器的单计算机或者多个计算机互联构成的计算机系统, 支持并行编程模型。并行编程模型不同于传统的串行编程模型, 可以采用专用的并行编程语言或者对现有高级语言进行并行控制方面的扩展, 为并行程序设计者和并行计算机系统的交互提供接口。开发高性能并行仿真程序时, 需要结合并

行计算平台的特性和程序的并行特性, 选择适合的并行优化算法, 编写出正确高效的并行程序。并行计算平台具有强大的性能优势, 具备提高并行程序性能的潜力, 主要体现在以下四个方面。

1. 强大的计算能力

并行计算平台具有大量的运算单元, 通过充分利用这些丰富的运算资源, 并且采用访存优化和通信优化技术来保证计算所需的数据带宽, 并行计算平台能够获得强大的计算能力。

2. 数据局部性

并行计算平台通常采用多级存储层次来保证持续的供数能力, 这样能够提供寄存器重用、Cache 重用以及本地存储访问局部性。通过数据布局优化, 尽可能地将数据访问集中到本地存储器, 避免远程访存开销, 加快数据访问速度。

3. 多级并行性

层次式的并行计算平台是目前主流并行体系结构。该平台不但能够提供结点内部的线程级并行, 还可以提供结点间的数据级并行及任务级并行。多种并行方式的粒度和适用范围各不相同, 单纯依靠任意一种并行都难以开发并行计算平台的优势, 需要综合考虑这三种并行方式的优劣, 采用最优的并行方式组合来构造高效的并行处理模式。

4. 延迟隐藏

并行计算平台打破以“计算”为中心的程序员思维习惯, 将访存和通信提升到与计算同等重要的高度。尽管结点间复杂的互连网络能够引起并行计算平台的远程访存和通信开销, 但是可以通过程序的优化设计, 将计算、访存、通信显式分离并降低三者之间的相关性, 这样系统可以利用缓冲区技术将这三种长延迟事件重叠执行, 从而有效隐藏访存或通信延迟。

综上所述, 通过采用目前先进的 VLSI 技术、应用并行处理模型以及开发多级存储带宽利用率, 并行计算平台不但能够有效避免或隐藏访存和通信延迟, 而且能够充分利用片上丰富的运算资源, 提供强大的并行计算潜力。

1.1.3 基于并行计算平台加速高性能仿真程序

为了满足现代仿真程序对高性能的需求, 需要选择高性能并行计算平台, 同时根据平台的性能优势对仿真程序进行优化, 以充分开发并行计算平台的计算潜力。为了

便于研究的开展和成果的验证, 本书针对典型仿真程序——SAR 成像处理程序设计了高效并行化方法, 以研究普适性的并行仿真优化技术。

基于并行计算平台的并行优化技术为实现快速 SAR 成像处理提供了高效的解决途径。高性能 SAR 成像程序是高性能并行计算平台和优化程序相结合的产物。采用并行体系结构和并行编程模型加速 SAR 成像程序, 主要基于以下两方面原因。

(1) 具有强大性能优势的并行计算机体系结构和并行编程模型为加速 SAR 成像程序提供了平台支持。首先, 片上存储局部性为 SAR 成像程序的性能提高准备了快速供数的途径。其次, 延迟重叠技术能够有效地隐藏访存和通信延迟, 使所有运算单元保持高效、持续运转。并且, 大量的运算单元为程序的并行任务划分、映射和执行提供了易于并行的计算资源。

(2) SAR 成像程序具有开发并行体系结构和并行编程模型的性能优势的潜力。首先, SAR 成像程序对大量连续数据做相同处理, 能够以单程序多数据 (Simple Program Multiple Data, SPMD) 模型在多结点上并行执行。其次, SAR 成像程序通常具有大规模数据量, 有利于挖掘程序的数据并行性。此外, SAR 成像程序的计算量通常集中于循环结构, 因此循环天然地成为了对 SAR 成像程序并行化的良好候选。

为了使 SAR 成像程序能够充分开发并行体系结构的性能潜力, 必须根据程序特点, 采用面向性能的并行优化技术, 将串行程序转化为计算密集和带宽利用率高的并行程序, 从而映射到并行计算平台上高效执行。因此, 基于并行计算平台, 研究 SAR 成像并行仿真优化技术具有重要意义。本书选择易于配置、性价比高、应用广泛的工作站机群作为并行成像技术的研究平台, 该平台同时具有分布存储和共享存储两层存储层次, 覆盖了目前主流并行计算机体系结构的典型特性。基于工作站机群, 以典型 SAR 成像程序——距离-多普勒 (R-D) 程序为代表, 着力于研究高性能仿真程序的普适性并行优化技术。同时, 研究工作也致力于开发高性能、可扩展的 SAR 成像并行处理软件, 实现实时、高分辨率成像, 以期推动雷达对抗试验及仿真的研究和建设, 为加快 SAR 成像的速度, 提高 SAR 成像的规模和精度奠定基础。并且, 随着高性能并行计算机技术的发展, 研究成果也能够高效地运行于更大规模的机群系统, 为高性能 SAR 成像软件的快速可持续性发展提供有力的技术支持。

1.2 SAR 成像处理概述

1.2.1 SAR 简介

在仿真领域中, SAR 成像技术是当前的热点研究问题^{[16][17]}。SAR 是一种微波对

地探测的高分辨率成像雷达, 可被装配于飞机、卫星等移动载体中。其成像原理并非像光学成像这种无源系统利用目标对光线的反射信息成像, 而是作为一种有源系统, 主动在运动中通过不断发射和接收微波信号来获得所探测目标的回波信息, 然后通过回波信号在距离向和方位向实施双向脉冲压缩技术获得二维高分辨率图像^[18]。SAR 成像的几何示意图如图 1.1^[18]所示。合成孔径雷达与各种光学和红外遥感器相比, 其成像过程和效果不受昼夜和气候等因素的影响, 并且微波能够穿透天然植被、人工伪装甚至地表土壤层得到目标图像, 具有全天时、全天候、高分辨率、宽覆盖率的特点^{[16][17][18]}。

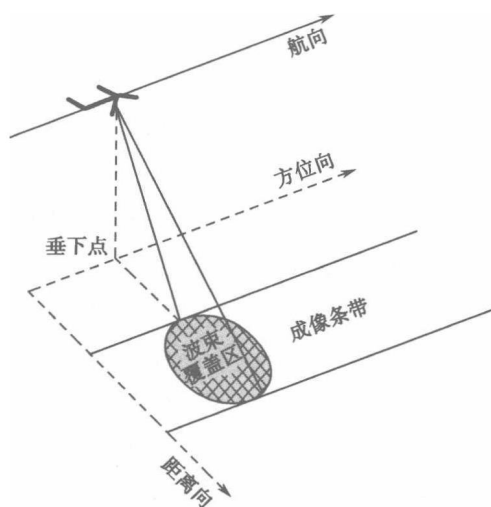


图 1.1 SAR 成像几何示意图^[18]

目前, 合成孔径成像雷达技术越来越受到国际上的高度重视, 在军事领域和遥感领域中占有绝对重要的地位^{[19][20][21]}。在军事领域, SAR 已被广泛应用于侦察、武器制导、导航、定位、对机动目标探测和跟踪、导弹目标识别等战场环境监测工作, 如美国已在“长曲棍球”军用成像卫星上装备合成孔径雷达, 能够对移动目标实现连续实时空地监视, 大大提高了战场感知能力^[22]。在遥感领域, SAR 已被应用于海冰监测、地质勘察、地形测绘、灾情预报、浮油探测和天体观测等方面, 如以加拿大“RADARSAT-2”为代表的商用合成孔径雷达卫星采用了多极化、超精细分辨等 10 余种工作模式^[23], 大大增加了可识别地物或目标的类别, 提高了获取被监测信息的能力。可见, 合成孔径雷达在国防建设和经济建设上都发挥了巨大的作用, 具有广泛的应用前景和发展潜力。

SAR 的提出思想源于早期雷达对方位向分辨率的限制。文献^[18]中介绍, 早期雷

达采用真实波束方法,通过条带式成像获得被测区域的微波图像。假定在条带模式下的分辨率约为 $\rho_r \times \rho_a$,那么该图像的距离向分辨率公式为

$$\rho_r = \frac{c}{2B}$$

式中, ρ_r 为距离向分辨率; c 为光速; B 为雷达压缩后的信号带宽。

该图像的方位向分辨率为:

$$\rho_a = \frac{\lambda}{D} R$$

式中, ρ_a 为方位向分辨率; λ 为发射信号波长; D 为雷达天线的方位向尺寸; R 为雷达到目标的距离。

从上述两个公式可以看出,距离向分辨率的大小由发射信号的带宽决定。而方位向分辨率一方面取决于雷达系统本身的参数——波长、天线尺寸,另一方面又与目标距离成反比。如果要提高雷达的方位向分辨率,雷达系统的天线需要具备巨大的孔径尺寸。在实际中,具有这样巨大孔径尺寸的雷达系统往往难以建造和安装。为了提高方位向分辨率,1951年6月,Goodyear航空公司的Carl Wiley首次提出合成孔径雷达的概念。他认为通过分析回波信号中的多普勒频率可以得到更加精确的方位向分辨率,并于1952年做成了一台简单的演示装置,证明了该想法的可行性。SAR的提出,突破了早期雷达的真实孔径天线对方位向分辨率的限制,通过对合成孔径范围内的雷达回波进行相干处理,实现较高的雷达方位向分辨率。SAR的方位向分辨率与波长和距离无关,取决于天线实孔径,具体表示为:

$$\rho_a = \frac{D}{2}$$

依据上述公式进行参数设置,能够对SAR进行点目标成像仿真。

可见,SAR成像原理是通过雷达发射宽频带信号使目标在雷达视线方向(距离向)具有较高的分辨率;再利用目标与雷达之间的相对运动轨迹合成出一个等效的合成孔径,以取代庞大的真实孔径阵列;然后在不同相对空间位置处发射多次脉冲,对所接收的目标回波进行相干处理,得到目标在与雷达视线垂直方向(方位向)的高分辨率,从而形成目标的二维分辨图像^{[24][25]}。

SAR在时域中采用二维滤波器直接对回波信号进行处理,导致巨大的计算量。早期SAR成像只能采用光学处理来实现,虽然能够得到聚焦良好的图像,但是胶片冲洗等因素制约了成像的实时性。随着计算机技术的发展,SAR成像处理已经由光学成像发展为利用计算机进行数字信号处理,不断涌现出更高效的成像算法和并行成像软件设计方法^{[23][26][27]}。数字处理方式能够保证成像在任意复杂条件下的准确性、可编程性和可重复性,成为SAR成像处理的主导发展方向。

1.2.2 SAR 成像算法

SAR 成像的原理可以简述为从接受回波数据到目标图像建立的过程, 该过程包含了不同数据类型的转换和不同空间的映射, 具体的实现流程如图 1.2 所示。前面介绍的 SAR 研究动机指出, SAR 通过在不同位置接收回波并构成一个巨大的等效孔径, 从而实现高度的方位向分辨率, 这正是合成孔径雷达与其他雷达的本质不同所在。可见, 方位向的脉冲压缩是 SAR 成像的关键, 根据方位压缩的不同实现方法和成像质量的不同要求, 形成了多种 SAR 成像算法。成熟的 SAR 成像算法主要包括距离-多普勒 (Range-Doppler, R-D) 算法、Chirp Scaling (CS) 算法和波数域 (ωK) 算法^{[16][17][23]}。下面对这三种算法分别进行简要介绍。

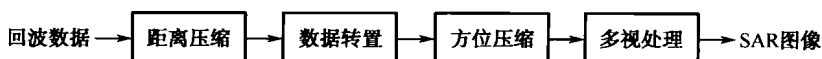


图 1.2 合成孔径雷达成像步骤

R-D 成像算法的基本思想是利用雷达目标的回波信号可近似看成在距离向和方位向独立的线性调频信号的原理, 将 SAR 的二维成像处理运算转换为两个一维运算, 分别在距离向和方位向进行匹配滤波, 最终得到 SAR 的图像数据^{[28][29]}。这种简化的成像处理过程忽略了距离向和方位向的耦合, 其主要目的在于寻找方位向上的最佳匹配滤波器, 以便在距离-多普勒域实现聚焦。若距离徙动操作导致雷达信号在距离向和方位向存在耦合时, 由于其距离徙动相同, 可以通过采用距离徙动校正过程 (RCMC) 将回波曲线校正为直线。若校正点不在采样点上, 可以通过在距离-多普勒域插值来精确高效地实现距离徙动校正。距离徙动校正能够消除距离向和方位向的耦合, 使这两维可以分别独立处理。图 1.3 所示为 R-D 基本算法的流程图^[28]。

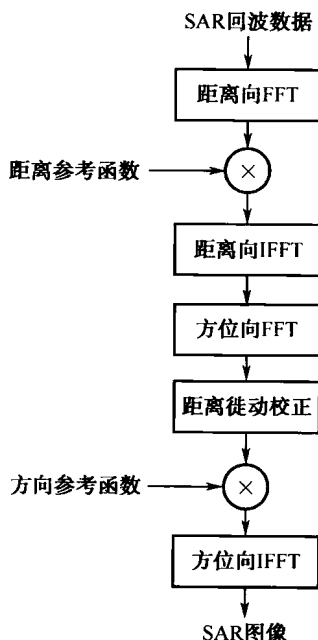


图 1.3 R-D 成像算法流程图

CS 算法也是一种在距离向和方位向进行二维处理的成像算法。与 R-D 算法不同的是, 该算法避免了距离徙动校正中的插值操作。CS 算法在距离压缩之前, 在距离-多普勒域中对原始信号沿距离向乘以一个 Chirp Scaling 因子, 使得不同距离上的点目标有了相同的徙动

轨迹，即校正了不同点目标的信号距离徙动差量^{[28][30]}。这样，在二维频域上易于通过相位相乘来实现距离徙动校正、距离压缩和二次距离压缩。然后将数据变回到距离-多普勒域，并实现方位压缩。CS 算法的流程图如图 1.4 所示^[28]。

ω K 算法最初是由 C.Cafforio 等人借鉴地球物理勘探数据处理中的“地震波迁移技术”，根据波动方程提出的。该算法首先通过二维傅里叶变换（FFT）将回波信号变换到波数域。然后通过频率变换和 Stolt 插值，实现距离迁移和方位压缩，从而在波数域实现大片区域的精确聚焦^{[28][31]}。最后通过二维傅里叶逆变换（IFFT）将信号反变换，实现 SAR 成像。可见 ω K 算法的主要操作都是在波数域完成的，其关键步骤是对“距离频率”进行 Stolt 插值，插值精度直接影响到成像精度，而插值运算带来的巨大数据量和运算量延缓了成像速度。该算法的成像流程图如图 1.5 所示^[28]。

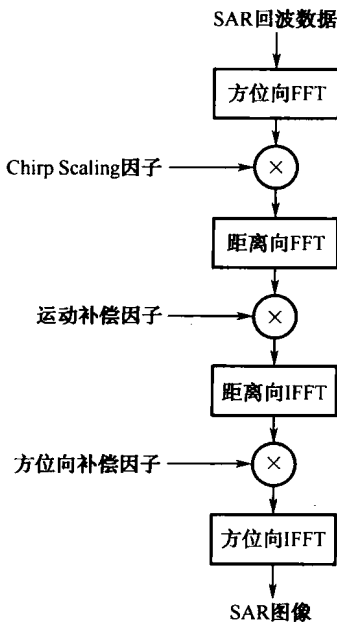


图 1.4 CS 成像算法流程图

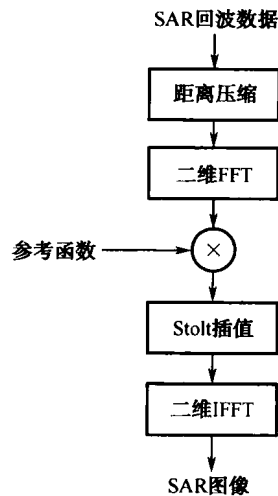


图 1.5 ω K 成像算法流程图

以上这三种 SAR 成像算法目前都已经得到了广泛应用。然而，这三种算法都在距离向和方位向进行了复杂的运算操作，并且部分算法还需要加入插值处理，使得 SAR 成像过程需要庞大的存储空间和惊人的计算量。现代战场信息和遥感环境瞬息万变，为了获得战场和商业先机，对实时、高精度 SAR 成像的需求越来越迫切。采用并行处理技术是实现高性能 SAR 成像的必经之路。SAR 成像并行化需求主要体现在以下两个方面。