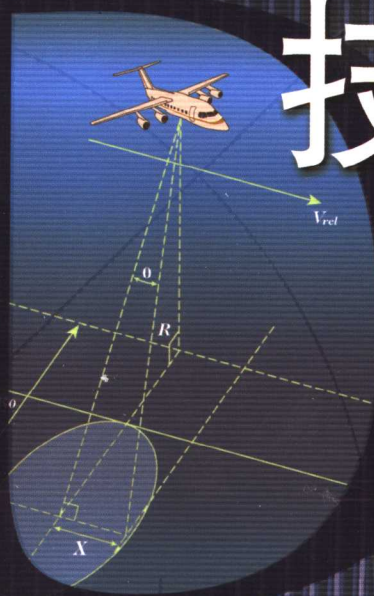




雷达技术丛书  
<http://www.phei.com.cn>

# 雷达成像技术

保铮  
邢孟道  
王彤  
编著



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

国家科学技术学术著作出版基金  
电子信息科技专著出版专项资金 资助出版

雷达技术丛书

# 雷 达 成 像 技 术

保 铮 邢孟道 王 彤 编著

電 子 工 業 出 版 社

**Publishing House of Electronics Industry**

北京 · BEIJING

## 内 容 简 介

雷达技术的发展使其具有高的二维分辨率,能对场景和目标成像,因而成像已成为雷达的一种新的功能,极大地提高了获取目标信息的能力。它在各类雷达的许多方面得到越来越广泛的应用。

本书共分8章,主要内容有:雷达高分辨的原理和实现的处理方法,一维距离像,合成孔径雷达,逆合成孔径雷达,干涉技术在合成孔径雷达和逆合成孔径中的应用等。本书在内容的安排上更着重于理论联系实际,在将基本原理和算法介绍清楚的基础上,主要讨论实际实现中的各类工程技术问题,力求帮助雷达工程技术人员尽快地掌握这一新技术,并能用以解决实际工程问题。

本书具有的设计性和实用性,将会指导从事雷达研究、制造的工程技术人员设计、制造出性能优异的雷达,对于从事雷达系统与教学的高等院校师生也是一本很有实践价值的教材或参考书,对于广大从事雷达装备使用与维护的雷达部队官兵和各行各业操作人员来说也是系统性学习雷达工程技术知识的参考书。

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

雷达成像技术/保铮,邢孟道,王彤编著. —北京:电子工业出版社,2005.4  
(雷达技术丛书)

ISBN 7-121-01072-0

I. 雷… II. ①保… ②邢… ③王… III. 雷达信号—图像处理 IV. TN957.52

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第026686号

责任编辑:刘宪兰 特约编辑:叶皓彤

印刷:北京智力达印刷有限公司

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

经销:各地新华书店

开本:787×960 1/16 印张:22 字数:422千字

印次:2005年4月第1次印刷

印数:4000册 定价:66.00元

购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。联系电话:(010)68279077。质量投诉请发邮件至zlts@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至dbqq@phei.com.cn。

“雷达技术丛书”编辑委员会

主 任：王志刚

副 主 任：王小谟 张光义 徐步荣 左群声 王 政 文宏武

委 员：（以下按姓氏笔画为序）

于景瑞 弋 稳 王德纯 平丽浩 匡永胜 李文辉 吴顺君

吴曼青 张祖稷 张润逵 张德斌 周文瑜 金 林 郑 新

柯建波 保 铮 贺瑞龙 贲 德 梅晓春 黄 槐 黄培康

董庆生 焦培南

主 编：王小谟 张光义

编辑部主任：邱荣钦

编辑部副主任：刘宪兰 赵玉洁 赵启成

编 辑：李玉兰 毛 宏 李盛沐 王炳如 黄昭华

## 出版说明

“雷达技术丛书”是由中国工程院王小谟院士和张光义院士倡导并担任主编、中国电子科技集团公司负责组织、电子工业出版社负责出版的一套大型设计性系列丛书。这套“雷达技术丛书”（以下简称“丛书”）共 15 册，是我国雷达界多个单位的知名专家学者集体智慧的结晶，是他们长期实践经验的总结，是一套理论与实践相结合的佳作。

这套“丛书”的内容十分丰富，概括地说包括了 3 个主要方面的内容：一是介绍了影响雷达性能的目标特性和环境特性，包括目标（含隐身目标）的频率特性、散射特性、极化特性和起伏特性，地杂波、海杂波和气象杂波特性和噪声与干扰特性，大气与电离层传播特性等；二是介绍了雷达各分系统的设计，包括面天线与阵列天线、微波网络与微波传输线、固态与电子管发射机、频率源与模数接收机、信号处理与数据处理的基本原理、技术指标、设计方法和性能测试，还介绍了雷达系统与分系统的结构设计与制造工艺，包括微组装与柔性制造工艺，可靠性、可维性、环境适应性设计以及传动、架拆与运输规范的设计等；三是介绍了典型雷达系统的设计，包括各种二坐标与三坐标防空雷达、有源与无源相控阵雷达、机载预警与火控雷达、多普勒与相控阵制导雷达、脉冲与连续波精密跟踪测量雷达、合成孔径与逆合成孔径成像雷达、天波与地波超视距雷达等的基本原理、技术体制、战技性能、设计方法和联试与试飞等。

这套“丛书”的定义准确，原理清晰，语言简练，图文并茂，公式齐全，数据丰富，集设计性、实用性、新颖性于一体，是雷达科技工作者的设计指南，是雷达部队培训的良好教材，是高校电子工程专业及相关专业师生不可多得的教材和参考书。

“雷达技术丛书”编辑委员会编辑部

2004 年 12 月 29 日

# 序

雷达在第二次世界大战中得到迅速发展，为适应战争需要，交战各方研制出从米波到微波的各种雷达装备。战后美国麻省理工学院辐射实验室集合各方面的专家，总结二战期间的经验，于1950年前后出版了雷达丛书共28本，大幅度推动了雷达技术的发展。我刚参加工作时，就从这套书中得益不少。随着雷达技术的进步，28本书的内容已趋陈旧。20世纪后期，美国Skolnik编写了雷达手册，其版本和内容不断更新，在雷达界有着较大的影响，但它仍不及麻省理工学院辐射实验室众多专家撰写的28本书的内容详尽。

我国的雷达事业，经过几代人40余年的努力，从无到有，从小到大，从弱到强，许多领域的技术已经进入了国际先进行列。总结这些成果，为我国今后的雷达事业发展做点贡献是我长期的一个心愿，在出版社的鼓励下，我和张光义院士倡导并担任主编，由中国电子科技集团公司负责组织编写了这套“雷达技术丛书”（以下简称“丛书”）。它是我国众多专家、学者长期从事雷达科研的经验总结，具有较好的系统性、新颖性和实用性。

雷达技术发展之快，使得传统的雷达观念、体系结构不断更新，在20世纪50年代的接收、发射、天线、显示典型的分机基础上，又发展到现在的雷达数据处理和信号处理分系统。本“丛书”就是按此体系进行了分册。随着微电子技术的发展，数字化还在不断前移，天线收发已经并继续不断引入了数字处理内容，信号和数据处理的界限越来越模糊，雷达体系正从流程型向网络型转变，由于目前其技术都尚未成熟，本“丛书”只在现有的体系中把这些新的内容进行了分别叙述。

“丛书”内容共分3个部分15分册：第一部分主要介绍雷达的目标特性和环境，第二部分介绍了雷达各组成部分的原理和设计，第三部分按典型应用雷达系统的分类对各雷达系统作了深入浅出的介绍。“丛书”各册著者不同，写作风格各异，但其内容的科学性和完整性是不容置疑的，通过对各分册结构和内容的审定，使各分册之间既具有较好的衔接性，又保持了各分册的独立性，读者可按需

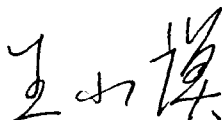
要读取其中一册或数册。希望此次出版的“丛书”能对从事雷达设计、制造的工程技术人员，雷达部队的干部、战士以及高校电子工程专业及相关专业的师生有所帮助。

“丛书”是从事雷达技术领域各项工作专家们集体智慧的结晶，是他们长期工作成果的总结与展示，专家们既要完成繁重的科研任务，又要在百忙中抽出时间保质保量地完成书稿，工作十分辛苦，在此，我代表“丛书”编委会向各分册作者和审稿专家表示深深的敬意！

“丛书”的出版，得到了中国电子科技集团公司、电子科学研究院、南京电子技术研究所、华东电子工程研究所等各参与单位领导的大力支持，得到了电子工业出版社领导和参与编辑们的积极推动，得到了“丛书”编辑部各同志的热情帮助，借此机会，一并表示衷心的感谢！

中国工程院院士

中国电子科技集团公司科技委副主任

A handwritten signature in black ink, appearing to read '王小华' (Wang Xiaohua), written in a cursive style.

## 前 言

雷达成像技术是 20 世纪 50 年代发展起来的。它是雷达发展的一个重要里程碑。从此，雷达的功能不仅仅是将所观测的对象视为“点”目标，来测定它的位置与运动参数，而且它能获得目标和场景的图像。同时，由于雷达具有全天候、全天时、远距离和宽广观测带，以及易于从固定背景中区分运动目标的能力，从而使雷达成像技术受到广泛重视。

雷达成像技术应用最多的是合成孔径雷达 (SAR, Synthetic Aperture Radar)。当前，机载和星载 SAR 的应用已十分广泛，已可得到亚米级的分辨率，场景图像的质量可与同类用途的光学图像相媲美。利用 SAR 的高分辨能力，并结合其他雷达技术，SAR 还可完成场景的高程测量，以及在场景中显示地面运动目标 (GMTI)。

SAR 的高分辨，在径向距离上依靠宽带信号，几百兆赫的频带可将距离分辨单元缩小到亚米级；在方位上则依靠雷达平台运动，等效地在空间形成很长的线性阵列，并将各次回波存储作合成的阵列处理，这正是合成孔径雷达名称的来源。合成孔径长度可达几百米或更长，因而可获得高的方位分辨率。

雷达平台相对于固定地面运动形成合成孔径，实现 SAR 成像。反过来，若雷达平台固定，而目标运动，则以目标为基准，雷达在发射信号过程中，可视为等效反向运动而形成阵列，据此也可对目标成像，通常称为逆合成孔径雷达 (ISAR)。ISAR 显然可以获取更多的目标信息。

最简单的雷达成像是只利用高距离分辨 (HRR) 的一维距离像。当距离分辨率达米级，甚至亚米级时，对飞机、车辆等一般目标，单次回波已是沿距离分布的一维距离像，它相当目标三维像以向量和的方式在雷达射线上的投影，其分布与目标相对于雷达的径向结构状况有关。同时，高距离分辨率有利于检测和区分距离相接近的多个目标，以及目标回波的直达波及其多径信号。

本书将对当前已经广泛应用和具有应用潜力的内容作较为全面的介绍。

本书是“雷达技术丛书”中的一册，主要面向从事雷达研制工作的工程技术人员，因此，本书编著时考虑到读者已有“雷达原理”和“雷达系统”方面的基础，对雷达各部件的基本情况也已比较熟悉，与上述内容有关的部分，本书均作了省略。对这些内容不熟悉的读者，可以从本丛书的其他分册里找到。

国内外有关雷达成像的专著和书籍已经不少，一般着重于原理的叙述和分析，其中有许多学术性很强的佳作。本书作为“雷达技术丛书”中的一册，力求



写出自己的特色。由于雷达成像为雷达技术中较新的内容，为便于读者掌握雷达成像的内容，我们的设想是用雷达工程技术人员熟悉的概念、方法和术语对新的问题进行研究，而且根据雷达的实用性来安排本书的体系结构，如雷达的高分辨一维距离像，在原理方面比较简单，但在雷达里很实用，并有许多实际问题需要研究，本书将其专门列为一章。又如与合成孔径雷达相结合的地面动目标显示（GMTI），严格说在原理上不属于雷达成像，但对军用雷达来说，是不可或缺的重要内容，本书也将它列为介绍的重点。

编著本书时，还考虑到雷达成像技术的迅速发展，成像技术已不仅用于专门的成像雷达，而已作为一种新的功能用于各种雷达，如在机载地对地警戒雷达，以及对地火控和轰炸雷达里增加合成孔径和/或逆合成孔径成像功能，而在对空警戒和跟踪的地基雷达中增加逆合成孔径成像功能。可以说，成像已成为一般雷达工程技术人员所必须掌握的一门技术。为此，本书编写时，力求做到能概念清晰地把工作原理、设计原则、设计方法，以及有关的实际问题交待清楚，从而使读者能通过对本书的学习掌握问题的本质，并能用本书提供的原理和方法，灵活地解决实际问题。

雷达成像及其有关问题现仍在迅速发展中，本书力求将最新的内容介绍给读者。可以肯定地说，本书出版后还会不断有新的内容发表。因此，本书尽可能把新概念、新原理、新方法在其基础层面介绍清楚，做到能与现在发展中的新内容接轨，便于读者今后能用新的知识不断充实自己。

本书是由保铮、邢孟道、王彤编著的，通过集体讨论作了分工，邢孟道编写第 5、6 两章，王彤编写第 8 章的初稿，保铮编写其余几章。然后再通过集体讨论，由保铮整理定稿。本书编著过程中曾得到冯大政教授和研究生黄源宝、周峰、王琦、匡晓霞、陈渤、李燕平、丁金闪、吴建新、裘磊、蔡伟纲、常文胜、张欢等的帮助。

虽然我们在编著本书时做了努力，但由于水平的限制和经验不足，缺点一定不少，甚至还有错误，希望读者批评指正。

在本书编著中融入了我们近十余年来的一些成果，这些研究工作是在国防预研项目“雷达成像技术”、863 计划项目“用外场数据进行 ISAR 成像与运动补偿”和国家自然科学基金重点项目“用信号处理方法提高雷达成像质量”的资助下进行的。此外，本书中所举的实例基本上来自国内多个研究单位，其中有中国电子科技集团十四所、三十八所，中国航天科工集团二十三所和中国航天科技集团五〇四所。对他们在编著本书过程中给予的帮助，在此表示感谢。

编著者

2004 年 12 月

# 目 录

<b>第 1 章 概论</b> .....	(1)
1.1 雷达成像及其发展概况 .....	(2)
1.2 雷达成像的基本原理 .....	(6)
1.2.1 逆合成孔径技术 .....	(6)
1.2.2 合成孔径技术 .....	(9)
1.3 本书的内容安排 .....	(11)
参考文献 .....	(18)
<b>第 2 章 距离高分辨和一维距离像</b> .....	(19)
2.1 宽带信号的逆滤波、匹配滤波和脉冲压缩 .....	(22)
2.2 线性频调信号和解线频调处理 .....	(24)
2.3 散射点模型与一维距离像 .....	(30)
2.3.1 单个距离单元的回波特性 .....	(30)
2.3.2 距离像随转角的变化 .....	(31)
2.3.3 平均距离像 .....	(32)
2.4 一维距离像回波的相干积累 .....	(35)
2.5 高距离分辨雷达的检测和测高 .....	(39)
2.5.1 宽频带雷达信号的检测 .....	(39)
2.5.2 宽频带雷达信号的测高 .....	(44)
参考文献 .....	(45)
<b>第 3 章 方位高分辨和合成阵列</b> .....	(47)
3.1 合成阵列的特点 .....	(48)
3.1.1 实际阵列天线 .....	(48)
3.1.2 合成阵列的工作方式 .....	(51)
3.1.3 合成阵列的远场和近场 .....	(53)
3.1.4 合成阵列的近场处理 .....	(56)
3.2 运动平台的合成孔径雷达的横向分辨率 .....	(60)
3.2.1 运动平台合成孔径雷达的横向分辨原理和简单分析 .....	(60)
3.2.2 运动平台合成孔径雷达回波的多普勒特性 .....	(64)
3.2.3 运动平台合成孔径雷达回波的匹配滤波 .....	(69)

3.3 用波数域分析合成孔径雷达的横向距离分辨率 .....	(70)
3.3.1 波数域的基本概念 .....	(70)
3.3.2 用波数域方法重建目标横向位置 .....	(74)
3.3.3 用波数域方法重建二维目标的位置 .....	(76)
3.3.4 聚束模式合成孔径雷达成像的波数域分析 .....	(82)
参考文献 .....	(87)
<b>第4章 合成孔径雷达</b> .....	<b>(89)</b>
4.1 条带模式合成孔径雷达成像的基本原理 .....	(90)
4.1.1 合成孔径雷达的系统响应函数 .....	(90)
4.1.2 用时域相关法重建目标图像 .....	(92)
4.1.3 距离-多普勒成像算法简介 .....	(94)
4.2 合成孔径雷达在三维空间里的二维成像 .....	(98)
4.2.1 三维空间数据录取、聚焦和成像的二维选择原则 .....	(99)
4.2.2 合成孔径雷达的数据录取 .....	(100)
4.2.3 聚焦和包络时延校正 .....	(101)
4.2.4 成像平面 .....	(101)
4.3 场景高程起伏引起的几何失真 .....	(103)
4.4 合成孔径雷达的性能指标 .....	(105)
4.4.1 合成孔径雷达的信噪比方程 .....	(105)
4.4.2 地面后向散射系数 $\sigma_0$ .....	(109)
4.4.3 点散布函数 .....	(112)
4.4.4 噪声 .....	(115)
4.5 合成孔径雷达的电子反对抗 .....	(118)
参考文献 .....	(120)
<b>第5章 合成孔径雷达成像算法</b> .....	<b>(123)</b>
5.1 距离徙动 .....	(125)
5.2 距离-多普勒(R-D)算法及其改进算法 .....	(132)
5.2.1 原始的正侧视距离-多普勒算法 .....	(132)
5.2.2 校正线性距离走动的距离-多普勒算法 .....	(134)
5.2.3 频域校正距离走动和弯曲的距离-多普勒算法 .....	(139)
5.2.4 时域校正线性距离走动并频域校正弯曲的距离-多普勒算法 .....	(146)
5.3 线频调变标(CS,Chirp Scaling)算法 .....	(151)
5.3.1 正侧视时的线频调变标算法 .....	(151)
5.3.2 大斜视情况下的非线性频调的变标算法 .....	(157)

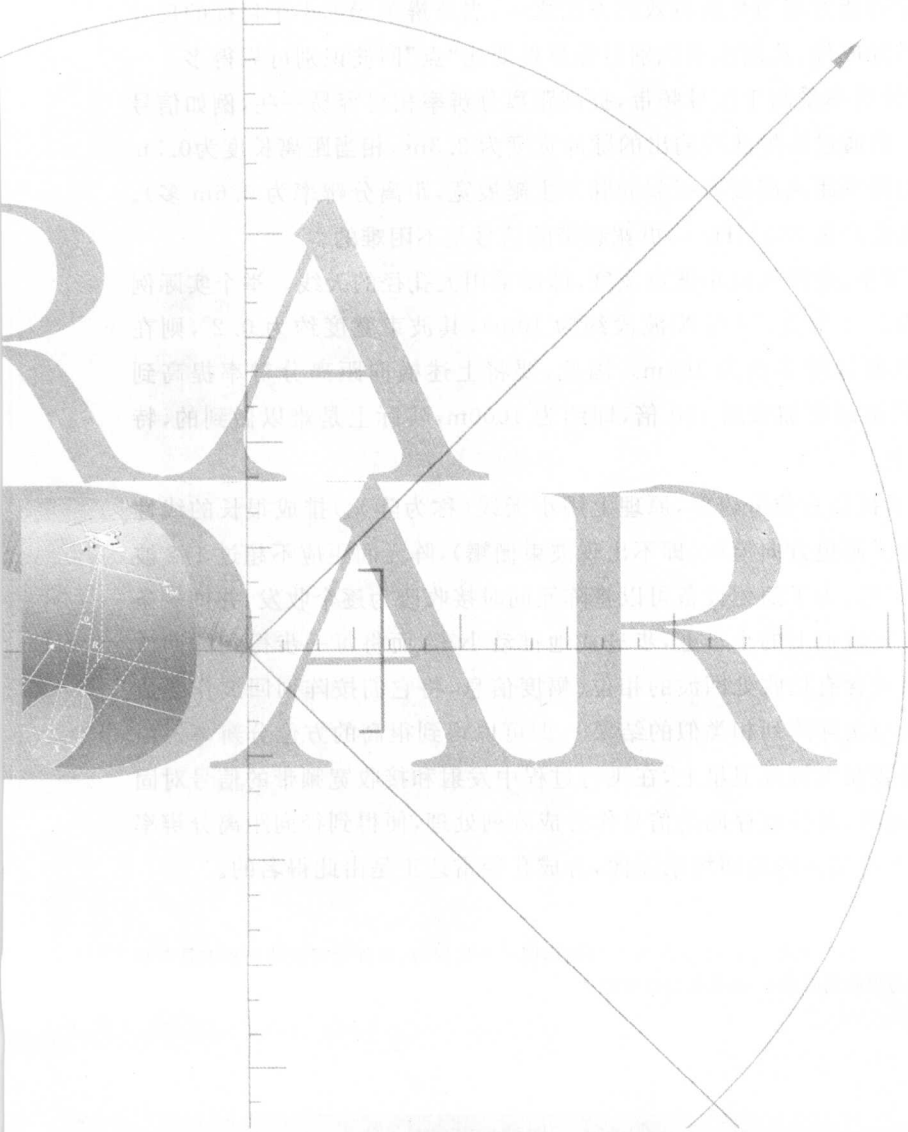
5.4	频率变标(FS, Frequency Scaling)算法	(165)
5.4.1	信号的距离-多普勒域分析	(165)
5.4.2	频率变标	(169)
5.4.3	距离徙动校正及压缩	(171)
5.5	距离徙动算法(RMA)	(173)
5.6	极坐标格式(PFA)算法	(177)
附录 A	频率变标算法中式(5.121)的证明	(181)
	参考文献	(182)
<b>第 6 章</b>	<b>基于回波数据的合成孔径雷达运动初偿</b>	<b>(185)</b>
6.1	SAR 平台的运动情况	(187)
6.1.1	惯导系统测量的运动参数情况简介	(187)
6.1.2	基于单个特显点回波数据的机载 SAR 运动误差分析	(189)
6.1.3	基于实际回波数据的机载 SAR 运动误差估计概述	(195)
6.1.4	天线相位中心(APC)位置误差对回波数据影响的分析	(196)
6.1.5	基于多普勒参数的运动参数估计	(200)
6.2	多普勒参数估计	(203)
6.2.1	多普勒中心估计	(203)
6.2.2	多普勒调频率估计	(204)
6.3	法平面和沿航线运动误差的补偿	(206)
6.3.1	法平面运动误差的补偿	(206)
6.3.2	沿航线运动误差的补偿	(208)
6.4	相位梯度自聚焦(PGA)相位补偿方法	(216)
6.5	基于回波数据的运动补偿算法及实验结果举例	(219)
6.5.1	采用基于回波数据的运动补偿方法时的 SAR 成像算法流程	(219)
6.5.2	实测数据的分析和处理	(220)
6.5.3	几种基于回波数据的运动补偿的性能比较	(223)
	参考文献	(227)
<b>第 7 章</b>	<b>逆合成孔径雷达</b>	<b>(229)</b>
7.1	ISAR 成像的转台模型和平动补偿原理	(231)
7.1.1	ISAR 成像的转台模型	(231)
7.1.2	运动目标平动补偿的原理	(232)
7.2	平动补偿的包络对齐	(237)
7.2.1	包络对齐的互相关法	(237)
7.2.2	包络对齐的模-2 距离和模-1 距离方法	(240)

7.2.3	包络对齐的最小熵方法	(241)
7.3	平动补偿的初相校正	(243)
7.3.1	初相校正的单特显点法	(244)
7.3.2	多特显点综合法	(246)
7.3.3	相干信号的初相校正	(249)
7.4	目标转动时散射点徙动的影响及其补偿	(250)
7.5	机动目标的 ISAR 成像	(254)
7.5.1	用波数域方法分析 ISAR 成像	(254)
7.5.2	几种不同转动情况的目标成像	(258)
7.6	用时频分析方法对非平稳运动目标成像	(263)
7.6.1	用 Radon-Wigner 滤波反投影成像	(264)
7.6.2	用最小二乘-RELAX 算法对非平稳运动目标成像	(272)
	参考文献	(275)
<b>第 8 章</b>	<b>干涉合成孔径雷达</b>	<b>(277)</b>
8.1	InSAR 高程测量的基本原理	(279)
8.1.1	InSAR 高程测量的几何原理	(279)
8.1.2	InSAR 高程测量可以采用的工作方式	(283)
8.2	InSAR 高程测量的过程	(285)
8.3	InSAR 观测去相关和预滤波	(290)
8.3.1	空间视角去相关和预滤波	(290)
8.3.2	方位去相关和预滤波	(295)
8.4	图像配准	(297)
8.4.1	图像配准的几何基础	(298)
8.4.2	图像配准过程	(301)
8.5	降噪滤波	(301)
8.5.1	多视处理	(302)
8.5.2	相位滤波	(303)
8.6	二维相位解缠绕	(307)
8.6.1	路径积分和残点(residue)	(308)
8.6.2	分支截断方法(branch cut)	(310)
8.6.3	最小二乘方法	(311)
8.7	高程测量误差分析	(315)
8.8	地面动目标检测	(316)
8.8.1	DPCA 方法的原理	(318)

8.8.2 干涉处理的原理 .....	(320)
8.8.3 两孔径干涉的性能提高——多普勒后空时自适应处理简介 .....	(326)
8.9 单脉冲 ISAR .....	(329)
8.10 本章小结 .....	(334)
参考文献 .....	(334)

# 第 1 章

# 概 论



## 1.1 雷达成像及其发展概况<sup>[1,2,3,4]</sup>

雷达的发明是无线电发展史上的重要里程碑。雷达可以全天候、全天时、远距离对目标进行检测和定位,在第二次世界大战中发挥了重大作用,至今仍然是军用和许多民用领域的重要传感器。

早期雷达的分辨能力很低,其分辨单元通常远大于目标,因而雷达是将观测对象(如飞机、车辆等)视为“点”目标来测定它的位置和运动参数。为了获取目标更多的信息,雷达科技工作者做了许多研究工作,设法从回波中提取目标特性。实际上,提高雷达的分辨能力应当是最有效的方法之一,当分辨单元远小于目标的尺寸时,就有可能对目标成像,从图像来识别目标显然要比“点”回波识别可靠得多。

雷达的距离分辨率受制于信号频带,提高距离分辨率相对容易一些,例如信号频带为 300MHz,则通过匹配滤波输出的脉冲宽度为 3.3ns,相当距离长度为 0.5m(考虑到脉压时为降低距离副瓣所引起的脉冲主瓣展宽,距离分辨率为 0.6m 多)。在微波波段,现在要产生 300MHz 或更宽频带的信号是不困难的。

提高横向分辨率,要依靠减小波束宽度,即要采用大孔径的天线。举个实际例子,若天线孔径为 300 个波长(在 X 波段约为 10m),其波束宽度约为  $0.2^\circ$ ,则在 30km 处的横向距离分辨率约为 100m。因此,要将上述横向距离分辨率提高到 1m,则天线孔径长度还要加大到 100 倍,即约为 1000m,实际上是难以做到的,特别是在飞行平台上。

如果只是为了提高方位分辨率,原理上用小天线(称为阵元)排成很长的线性阵列是可行的,为了避免方向模糊(即不出现波束栅瓣),阵元间距应不超过  $1/2$  波长。若目标是固定的,为了简化设备可以将阵元同时接收改为逐个收发,并铺一条直轨,将小雷达放在轨道上的小车上,步进式地推动小车,而将每一步得到的回波记录下来,这些回波含有接收处回波的相位、幅度信息,将它们按阵列回波作合成处理,显然能得到与实际阵列相类似的结果<sup>①</sup>,即可以得到很高的方位分辨率。由此类推,将雷达安装在飞机或卫星上,在飞行过程中发射和接收宽频带的信号对固定的地面场景作观测,将接收存储的信号作合成阵列处理,便得到径向距离分辨率和横向距离分辨率均很高的地面场景图像,合成孔径雷达正是由此得名的。

---

<sup>①</sup> 合成孔径阵列与实际阵列稍有差别,实际阵列只能用同一个发射源,各阵元回波的波程差是单程的,而合成阵列的发射与接收同时移动,波程差是双程的。



利用飞行的雷达平台对地面场景获得高的方位分辨率还可用多普勒效应来解释,当雷达载机以一定速度水平飞行时,地面的固定目标方位不同,其视线与雷达(载机)的速度向量的夹角也不相同,即它们有不同的相对径向速度和多普勒。因此,对同一波束里的固定目标回波序列作多普勒分析,只要多普勒分辨率足够高,仍然可将波束无法分辨的目标加以分辨。1951年,美国 Goodyear 公司在这种特定条件下,利用多普勒分析提高方位分辨率,他们把这种方法称为“多普勒锐化”,即通过多普勒分析将同一波束内的回波按方位不同分成一组“多普勒波束”,而将原波束宽度与“多普勒波束”宽度的比值称为“锐化比”。直至今日,多普勒锐化技术仍在机载雷达里应用,其锐化比通常可做到 32~64,以  $2^\circ$  的波束宽度为例,多普勒锐化波束宽度可窄到约  $0.06^\circ \sim 0.03^\circ$ 。图 1.1 是多普勒波束锐化的地面场景图,其信号频带为 5MHz,波束宽度为  $1.5^\circ$ ,通过锐化比约为 64 的多普勒锐化,多普勒波束宽度约为  $0.023^\circ$ 。图 1.1 的纵向分辨率约为 30m,横向分辨率为 20m。这样的分辨率是较低的,只能得到地面场景的轮廓图。

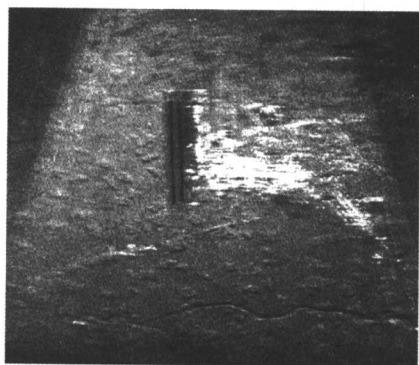


图 1.1 多普勒波束锐化的地面场景图

为了提高图像的纵向和横向分辨率,前者相对简单一些,只需加宽信号频带,而横向则决定于多普勒分辨率,因而需要加长相干积累时间,也就是要加大前面提到的合成孔径。为了得到米级的分辨率,合成孔径长度一般应为百米的数量级,即飞机要飞行几百米后才能得到所需的分辨率。前面提到,相对于雷达不同方位角的地面固定目标,多普勒值是不同的。对某一地面固定目标,在飞机飞行过程中,由于其视角不断变化,回波多普勒也随之变化。在前面所说的多普勒锐化里,只是由于相干时间不长(即合成孔径不大),多普勒的变化可以忽略。现在为提高横向分辨率采用了大的合成孔径,这时多普勒锐化波束不能再简单的傅里叶变换,而