# 机载和星载合成孔径雷达导论

张直中　编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

需要全本请访问 www.ertongbook.com

## 内 容 简 介

本书由德高望重的雷达领域专家张直中院士编著。主要阐述机载和星载合成孔径雷达的基本原理、用途,以及国际、国内合成孔径雷达的发展动态和最新技术,旨在引起国内对合成孔径雷达的重视,推动雷达技术的研究与开发。

本书技术先进,叙述简练,层次清晰,可读性强,适合从事雷达研究与使用的技术人员及相关专业的大专院校师生阅读。

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

机载和星载合成孔径雷达导论/ 张直中编著 . —北京:电子工业出版社,2004.1
ISBN 7-5053-9439-8

Ⅰ. 机… Ⅱ. 张… Ⅲ. ①机载雷达:合成孔径雷达—研究②卫星载雷达:合成孔径雷达—研究 Ⅳ. TN958

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 119901 号

责任编辑: 邓小瑜(dxy@phei .com .cn)
印 刷:
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: 850×1168 1/ 32 印张: 8.625 字数: 216.4 千字
印 次: 2004 年 1 月 第 1 次印刷
印 数: 3000 册 定价: 35.00 元

凡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。

# 序

合成孔径雷达(SAR)是一种先进的微波对地观测设备,具有全天候、全天时工作的特点,对地面植被有一定穿透能力,能获得类似光学照片的目标图像,在国民经济和军事应用领域有着十分重要的作用。世界上技术先进的国家都在大力发展 SAR 技术。美国在 20 世纪 50 年代就开始了 SAR 遥感成像技术的研究,1978 年 6 月 28 日美国发射了载有 SAR 的“海洋卫星”,入轨 10 天后星载 SAR 系统首次启用,这标志着 SAR 已成功地进入太空对地观测新时代,也标志着星载 SAR 由实验研究向应用研究的重大转变。进入 20 世纪 90 年代,欧洲、日本、加拿大、俄罗斯等国均发射成功 SAR 卫星。近年来,对 SAR 的研究又进入了新的技术领域,即研究对地面动目标进行检测和跟踪及发展三坐标 SAR 技术。

近 20 年来,通过科研人员的努力,我国 SAR 技术的研究也取得了重大进展。“九五”以来,机载 SAR 技术取得了突破性进展,目前国内机载 SAR 工程演示验证样机,条带模式空间分辨率已达 0.5～1m,正在向工程化、实用化方面发展。我国也开始研究星载 SAR,并取得了一定的成果。相信,经过广大科技人员的努力,我国 SAR 技术和研究会跻身于国际先进水平的行列。

中国工程院资深院士张直中研究员,从事雷达工程技术研究 40 余年,是中国雷达科技事业的开创人之一。20 世纪 50 年代初他领导并参加了中国第一代自行设计的中程警戒雷达,20 世纪 60 年代初提出并领导、参加了单脉冲技术和脉冲压缩技术的研究。这两项技术在我所研制的多种雷达中被广泛应用。1964 年他领导研制成功中国第一台单脉冲跟踪雷达。1964 年毛主席提出要搞远程导弹预警雷达,张直中老师指出如照搬美国 20 世纪 50 年

代二坐标机械扫描的超远程雷达作预警用会有严重漏警,因此确定采用当时国际上刚开始研制的相控阵电子扫描体制雷达的道路。经过 10 年努力,终于研制成第一台三坐标二维相扫超远程预警雷达。20 世纪 60 年代起他领导并参加超远程靶场再入段跟踪雷达的方案论证和科研。1980 年,张直中老师作为总工程师接受机载脉冲多普勒雷达的研制任务,指导制订雷达方案。20 世纪 80 年代后期他领导 863 逆合成孔径雷达(ISAR)成像技术的研究,取得成功并荣获部级科技进步一等奖。1999 年张直中老师荣获何梁何利基金“技术科学奖”。近十几年来,张直中老师在青年骨干培养方面倾注了大量精力,培养硕士生和博士生多名,为我国雷达事业的发展作出了重大贡献。80 岁高龄的他还在研究机载 SAR 和星载 SAR 的最新进展,紧密跟踪 SAR 技术的最新动向,发表了多篇论文,并在此基础上编著《机载和星载合成孔径雷达导论》。本书综述了近 10 年来高分辨 SAR 遥感成像技术的进展,介绍了高分辨 SAR 原理,并给出大量实例。

张直中老师严谨治学和对知识永不知疲倦的钻研精神,深深地感动着我,他值得我们年轻人好好学习。我也希望更多的科研人员能像张直中院士那样,学习、学习、永远学习,掌握更多的科学知识,为我国雷达事业的发展,为我国电子信息产业的发展作出更大的贡献。

中国电子科技集团公司
第十四研究所所长



2003 年 11 月

# 前　言

遥感信息技术可在极宽广的电磁波范围内进行,主要可分为可见光、红外和微波,这也是遥感技术发展中的三个阶段。

机载遥感摄影在中国早就有应用,在 20 世纪 90 年代初,它应用于卫星上光学遥感摄影,但必须有太阳光源的照射,黑夜不能应用,云雨天较困难。红外遥感是测量不同地物具有的不同热辐射量,因此白天黑夜均可进行遥感摄影,但云雨对红外遥感有影响,且红外遥感的质量较差,信息量较少,灰度等级不够。美国在 20 世纪 30 年代开始发展微波遥感技术,早期是微波辐射计遥感技术。由于天空中存在接近恒定的微波辐射源,使地面不同物体具有不同强度的微波辐射,用宽频带天线和噪声接收机可得到它们的遥感信息,但分辨率差,灰度等级不够,达不到遥感成像的要求。20 世纪 50 年代,美国开始研究合成孔径雷达(SAR)遥感成像技术,先是以飞机作平台的机载 SAR 成像。1978 年,美国发射了名为海洋卫星(SEASAT)的星载 SAR。这个雷达可靠性差,只工作了 99 天。最近 20 年来,世界上许多国家研制了多种不同频段、不同用途的机载 SAR,其中也包括中国。20 世纪 90 年代前半期,欧洲、日本、加拿大、俄罗斯均发射了微波卫星 SAR,美国航天飞机则有三个频段的 SAR。但它们均是对固定目标的距离和方位二坐标测定。

近十多年来,国际上大力发展机载动目标检测和跟踪的合成孔径雷达(SAR/ MTI)和机载三坐标合成孔径雷达(3D-SAR)。美国航天飞机曾在 1994 年对某些地区进行了双航过测高 3D-SAR,现在 C 波段和 X 波段加装伸向机外 60m 的接收天线,成功



需要全本请访问 www.ertongbook.com

后将可进行单航过 3D-SAR,可比双航过 3D-SAR 在测高精度上提高三倍左右。

中国最早进行机载 SAR 研制的是中科院电子所。现在,中科院电子所、中国电子科技集团公司第十四研究所等单位均在研制不同微波频段的相控阵卫星 SAR,在国家 863 高科技项目中也列有机载 SAR/ MTI。这些项目的完成,可使我国在 SAR 领域接近国际水平。

本书是综述近十余年来高分辨率合成孔径雷达遥感成像技术的原理和实例的专业书籍。全书共分三大部分计十二章。第一部分共四章,综述距离和方位二维高分辨率合成孔径雷达(2D-SAR)的原理和实例。实例中先讲机载的,再述卫星和航天飞机的 2D-SAR。我国正在研制卫星 2D-SAR,因尚未上天故不能列入实例。第二部分共四章,综述动目标显示和跟踪合成孔径雷达(SAR/ MTI),先简述 SAR/ MTI 的原理,再分别叙述应用多端口偏置相位中心(DPCA)技术的机载 SAR/ MTI 的实例,然后列举空时自适应处理(STAP)三种方法的模拟比较结果及用机载二通道 STAP 处理飞行试验的结果。最后叙述德国和法国正在设计的用多颗卫星(用一颗发/ 收卫星和三颗接收小卫星)组合成的卫星群 SAR/ MTI,以及多通道卫星 SAR/ MTI 的计算机模拟。第三部分共四章,综述三维(距离、方位和高度)高分辨率合成孔径雷达(3D-SAR)的原理和实例。在原理中指出对物体测高主要是根据上、下两天线的相位差,但斜度大的山坡相位差可能超过 2π,这种情况必须先做相位解开,才能得到正确高度。相位解开的方法很多,文内列举了几种不同方法。关于获取两天线之间的相位差,有两种方式,其一是双天线单航过法,另一是单天线双航过法。对机载 3D-SAR 来说,由于双天线间隔只需 1～2m,故均用双天线单航过测高,文中列举了几种欧美研制的机载 3D-SAR 及它们的效果。至于卫星和航天飞机的测高,由于它们高度甚高,故双天线间

距需 100m 左右,这是不可能的,只能采用单天线双航过测高,例如 1994 年美国航天飞机就进行了一次双航过测高。德国的 Terra SAR—X 卫星由于轨道高度可由地面精确控制,研制成功上天后可进行单天线双航过测高。法国正在研制的 Cartwheel 三颗小卫星群,据研制人员论证它既可作 SAR/ MTI 又可作 3D-SAR(见第八章"Cartwheel 的干涉技术:接收小卫星群用相干合成产生雷达像")。此外,德国已为美国航天飞机的 X 波段相控阵天线加装能伸出航机外 60m 的接收小天线,并于 2000 年进行了试飞,发现尚有一些技术问题干扰双天线测相位的正确性,必须先将这些问题解决,才能进行双天线单航过测高。据估算若能伸出航机 100m 测高精度则更好,但实际做不到,故决定伸出 60m。估算伸出 60m 的测高精度比单天线双航过提高三倍左右。

本书在写作过程中,得到了中国电子科技集团公司第十四研究所所长左群声研究员的大力支持,并亲自为本书作序,还得到了倪晋麟研究员的帮助。林幼权研究员、王友林高工为本书中国内合成孔径雷达部分提供了大量资料。此外,赵玉洁高工、王炳如工程师为使本书顺利出版做了大量工作,陈艳同志为本书的资料复制提供了帮助。在此一并表示感谢!

# 目　　录


第一章　二维合成孔径雷达的基本原理(2D-SAR) …… 1
　第一节　合成孔径的横向分辨率 …… 1
　第二节　相关积累的基本方法 …… 7
　参考文献 …… 8
第二章　多种不同频段先进机载 2D-SAR …… 9
　第一节　中国 KLC—9 型机载 1m 和 0.5m 高分辨率
　　2D-SAR …… 9
　　一、用途 …… 9
　　二、主要战术技术指标 …… 10
　　三、工作原理 …… 10
　　四、已解决的关键技术 …… 10
　　五、0.5m 分辨率接收主要技术指标 …… 11
　　六、0.5m 分辨率内场整架联试结果 …… 12
　　七、雷达分辨率定量分析 …… 12
　　八、地貌成像图 …… 14
　第二节　瑞典 CARABAS 雷达 …… 14
　第三节　美国林肯实验室的超宽带 UHF 雷达 …… 18
　第四节　荷兰 PHARUS 雷达 …… 19
　第五节　加拿大高分辨率 SAR …… 20
　第六节　美国林肯实验室研制的毫米波自动识别雷达 …… 22
　第七节　多频率多极化 SAR …… 27
　第八节　二维侧视机载 SAR 的自聚焦处理 …… 28
　第九节　用极化技术获得 SAR 像相干斑降解 …… 35

参考文献 …… 36
第三章　2D-SAR 各种用途综述 …… 37
第一节　简介 …… 37
第二节　我国的 2D-SAR 及其应用中的一些情况 …… 39
一、土壤水分监测 …… 39
二、植被鉴别 …… 39
三、岩性识别 …… 39
四、构造分析 …… 40
五、古河道探测 …… 40
六、土地利用 …… 40
七、洪涝灾害损失调查 …… 42
第三节　2D-SAR 技术与不同用户的要求 …… 43
参考文献 …… 45
第四章　卫星和航天飞机 2D-SAR …… 46
第一节　20 世纪前半期的情况 …… 46
第二节　RADARSAT 成像特性和应用要求 …… 46
一、应用要求 …… 49
二、RADARSAT 系统特征 …… 50
三、结论 …… 53
第三节　多频多极化 SIR—C/ X—SAR …… 54
一、简介 …… 54
二、任务概况 …… 54
三、雷达系统模式 …… 55
四、系统叙述 …… 57
五、雷达地面处理 …… 60
六、雷达系统性能要求 …… 60
七、实际达到的性能 …… 61
八、成像举例 …… 61
九、结论 …… 63
第四节　Terra SAR—X 设计和性能 …… 65

一、简介 …… 65
二、导言 …… 65
三、系统设计 …… 66
四、Terra SAR—X 各部分情况 …… 67
五、X 波段 SAR 设备 …… 68
六、基本成像状况及性能 …… 70
七、结论 …… 70
第五节 卫星载轻小型 SAR 设计及其功能 …… 71
一、简介 …… 71
二、雷达系统设计 …… 72
三、系统设计和性能分析 …… 74
四、设计的雷达性能 …… 77
五、结论 …… 78
参考文献 …… 78
第五章 SAR 动目标原理简介 …… 79
参考文献 …… 83
第六章 机载 SAR/ MTI …… 84
第一节 干涉法地面动目标成像 …… 84
一、背景材料 …… 84
二、干涉法动目标聚焦 …… 84
三、概念的履行 …… 85
四、SAR 处理 …… 86
第二节 AN/ APY—6,SAR/ MTI 的试飞结果 …… 88
一、雷达基本结构 …… 88
二、雷达的功能 …… 90
三、试飞结果 …… 90
第三节 机载多通道 SAR 系统 AER—Ⅱ试飞结果 …… 94
一、简介 …… 94
二、AER—Ⅱ系统 …… 94
三、MTI 处理 …… 95

第四节　用多频多端口多极化 SAR 对在森林里的动目标成像 …… 97
一、简介 …… 97
二、多频 SAR (MF-SAR)对单个动目标成像 …… 98
三、多频多天线多极化(MFMAPOLSAR)对树林中动目标的成像 …… 99
四、模拟结果 …… 103
第五节　多通道 SAR 数据用时-频分布对动目标自聚焦 …… 106
一、导言 …… 106
二、动目标的 SAR 模型 …… 107
三、时-频分布 …… 109
四、多维时-频分布 …… 110
五、多通道估值算法 …… 111
六、真实数据求值和成像 …… 113
第六节　SAR 对动目标检测成像的试验 …… 114
一、简介 …… 114
二、固定目标对消的计算 …… 115
三、实验结果 …… 118
第七节　有关 SAR 对地面动目标的探讨 …… 120
一、简介 …… 120
二、目标运动对 SAR 成像的影响 …… 122
三、地面动目标 SAR 多接收系统成像 …… 122
四、分析 AN/ APY—6 地面动目标数据 …… 124
参考文献 …… 127
第七章　空时自适应处理(STAP) …… 128
第一节　三种次佳 STAP 的比较 …… 128
一、导言 …… 128
二、空时自适应处理方式 …… 128
三、算法的质量 …… 129



需要全本请访问 www.ertongbook.com

第二节　二通道 STAP 处理 SAR/ MTI 实时系统飞行试验结果 …… 131
一、简介 …… 131
二、MTI 论证飞行试验 …… 131
三、处理和成像情况 …… 132
四、对 MTI 结果的评价 …… 134
五、结论 …… 136
参考文献 …… 136
第八章　多卫星 SAR/ MTI …… 137
第一节　用相控阵天线对多通道卫星 SAR/ MTI 进行计算机模拟 …… 137
一、导言 …… 137
二、模拟内容 …… 138
三、模型 …… 138
四、模拟器的结构 …… 142
五、初次模拟的结果 …… 143
六、结论 …… 144
第二节　用多颗卫星作 SAR/ MTI …… 145
一、导言 …… 145
二、系统考虑 …… 146
三、MTI 分析 …… 148
四、多天线设计 …… 149
五、需解决的问题 …… 150
六、系统工作要求 …… 150
第三节　Cartwheel 的干涉技术:接收小卫星群用相干合成产生雷达像 …… 151
一、背景材料 …… 151
二、相干处理两颗接收小卫星 …… 152
三、Cartwheel 的相干原理 …… 160
四、应用及讨论 …… 164

参考文献 …… 165
第九章 三维合成孔径雷达(3D-SAR)的原理 …… 167
第一节 3D-SAR 的测高原理 …… 167
第二节 误差的影响 …… 169
第三节 相位噪声 …… 170
第四节 遮蔽和重叠 …… 170
第五节 相位解开 …… 171
参考文献 …… 174
第十章 若干机载 3D-SAR 实例 …… 175
第一节 机载 SAR 单航过和双航过测高 …… 175
一、简介 …… 175
二、单航过结果 …… 176
三、单航过干涉测高举例 …… 177
四、双航过结果 …… 177
五、DERA‘ ESR ’系统 …… 179
第二节 瑞士研制的干涉测高 3D-SAR …… 180
一、测高性能 …… 182
二、第一次试飞结果 …… 185
第三节 毫米波干涉测高 SAR …… 187
一、简介 …… 187
二、试验参数和试验区 …… 187
三、干涉 SAR 相位解开 …… 188
第四节 美国 NASA/ JPL 三频率机载先进 SAR 系统 … 191
一、处理办法 …… 192
二、飞行结果 …… 193
第五节 机载双天线测高飞机滚动纠正方法 …… 194
一、滚动对测高的影响 …… 194
二、双视法 …… 196
三、试飞结果 …… 197

四、结论…… 200
参考文献 …… 200
第十一章 3D-SAR 的相位解开方法 …… 202
第一节 用快变换和重复法做加权和不加权的
相位解开 …… 202
一、导言…… 202
二、数学推导…… 203
三、二维相位解开举例…… 208
第二节 干涉法 3D-SAR 的自动相位解开法 …… 210
一、数据组 1 …… 212
二、数据组 2 …… 214
第三节 干涉测高用多基线法解相位模糊 …… 218
一、导言…… 218
二、实验系统…… 219
三、图像获取…… 219
四、实验和结果…… 220
五、结论…… 223
参考文献 …… 224
第十二章 航天飞机和卫星干涉测高三维像 …… 226
第一节 X—SAR 第一次干涉测高情况 …… 226
一、简介…… 226
二、基线问题…… 226
三、多普勒中心…… 227
四、结果…… 228
第二节 航天飞机成像的八种应用…… 230
一、简介…… 230
二、SIR—C/ X—SAR 的应用价值 …… 231
第三节 航天飞机地形测量任务
(X 波段 SAR 干涉试验) …… 236

一、简介…… 236
二、本次试验情况…… 237
三、初试结果…… 238
第四节　卫星雷达 SAR2 和 SAR3 三维成像任务…… 240
一、简介…… 241
二、工作模式的选择…… 241
三、覆盖能力…… 243
四、成像处理…… 243
第五节　Terra SAR—X:设计和性能 …… 244
一、简介…… 244
二、任务和系统设计…… 245
三、Terra SAR—X 空间部分 …… 246
四、X 波段 SAR …… 247
五、图像的基本功能…… 248
六、结论…… 250
第六节　对多卫星干涉 SAR 的比较 …… 250
一、简介…… 251
二、信噪比分析…… 252
三、几何去相关情况…… 253
四、测高误差…… 255
五、结论…… 257
参考文献 …… 257



· ·

# 第一章
# 二维合成孔径雷达的基本原理
# (2D-SAR)

二维是指能精确测定固定目标的距离和方位。若雷达发射脉冲压缩信号,例如线性调频信号,若脉冲内带宽为 150MHz,则经脉压后距离分辨率为 1m,这对雷达工作者是众所周知,不必多费笔墨。

二维的要点是如何精测目标的方位。这就是合成孔径雷达的特点。众所周知,如果一个实孔径天线越长,则一定距离目标的方位精度越好,方位精度和分辨率是和天线长度成反比的。但实孔径天线均在百米以内,而合成孔径天线则可在千米以上。且从原理上讲,合成孔径天线与同样长度的普通发/收双程天线相比,其分辨率可提高$\sqrt{2}$倍。

## 第一节　合成孔径的横向分辨率

天线孔径的合成是由于飞行的雷达对固定目标相对运动时目标回波脉冲列信号中存在多普勒频率变化,信息处理是将这种多普勒变化用匹配滤波或相关积分提取出来,这两者是等效的,数学表达式为:

$$V(t) = \int_{-\infty}^{\infty} u(t')u^*(t'-t)\mathrm{d}t'$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} U(f)U^*(f)\mathrm{e}^{\mathrm{j}2\pi ft}\mathrm{d}f \qquad (1.1)$$

式中，$V(t)$ 为处理后的输出信号，$u(t)$ 为接收信号，它的频谱为 $U(f)$。式(1.1)的上式为接收信号经相关积分后的输出，下式为接收信号谱经匹配滤波后做傅里叶反变换转换的波形。它们二者的等效性及具体实现方法见参考文献 1。

图 1.1 示出计算机载合成孔径接收回波的相位和多普勒频率一般表达式的几何关系。雷达在 $A$ 点发射信号至 $C$ 点，距离为 $R_0$，由 $C$ 反射至雷达，由于载机航行，斜距为 $R(t)$。图中 $vt$ 为航距。由图可得，在 $t$ 时刻的斜距 $R(t)$：

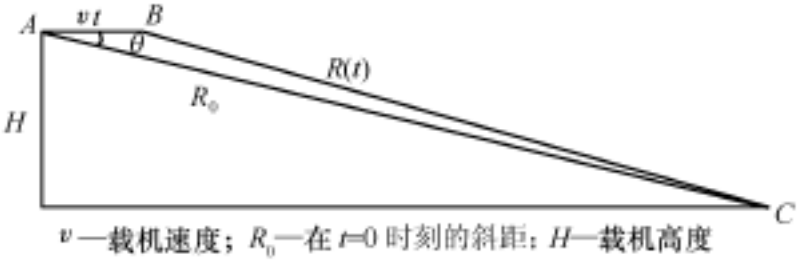



图 1.1　相位和多普勒频率的几何关系

$$R(t) = (R_0^2 + v^2t^2 - 2R_0vt\cos\theta)^{1/2}$$
$$\approx R_0 - vt\cos\theta + \frac{v^2t^2\sin^2\theta}{2R_0} \tag{1.2}$$

雷达信号往返双程距离变化为：

$$\Delta R = 2[R_0 - R(t)]$$
$$\approx 2vt\cos\theta - \frac{v^2t^2}{R_0}\sin^2\theta \tag{1.3}$$

转换成 $t$ 时刻的相位变化有：

$$(t) = \frac{2\pi}{\lambda}\Delta R$$
$$= \frac{2\pi}{\lambda}\left(2vt\cos\theta - \frac{v^2t^2}{R_0}\sin^2\theta\right) \tag{1.4}$$

这个相位变化转换成 $t$ 时刻的多普勒频率为：



需要全本请访问 www.ertongbook.com