



宁夏师范学院学人文库·第三辑

刘德全 著

空中目标ISAR 实时成像技术研究

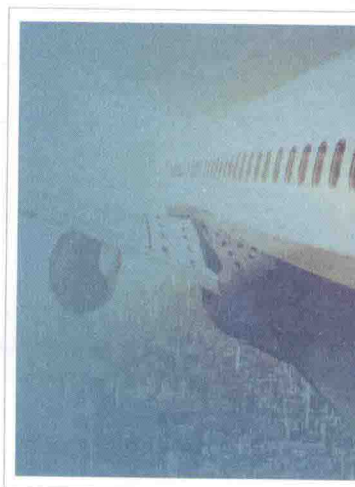




宁夏师范学院学人文库·第三辑

刘德全 著

空中目标ISAR 实时成像技术研究



黄河出版传媒集团
阳光出版社

图书在版编目(CIP)数据

空中目标ISAR实时成像技术研究 / 刘德全著. — 银川: 阳光出版社, 2014.11
(宁夏师范学院学人文库 / 李星主编. 第3辑)
ISBN 978-7-5525-1592-3

I. ①空… II. ①刘… III. ①合成孔径雷达—成像原理—研究 IV. ①TN957.52

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第281228号

空中目标ISAR实时成像技术研究

刘德全 著

责任编辑 靳红慧 段继科

封面设计 石磊

责任印制 岳建宁

黄河出版传媒集团

阳光出版社

出版发行

地址 宁夏银川市北京东路139号出版大厦(750001)

网址 <http://www.yrpubm.com>

网上书店 <http://www.hh-book.com>

电子信箱 yangguang@yrpubm.com

邮购电话 0951-5036103

经销 全国新华书店

印刷装订 宁夏飞马彩色印务有限公司

印刷委托书号 (宁)0000188

开本 720mm×980mm 1/16

印张 12

字数 200千字

版次 2014年12月第1版

印次 2014年12月第1次印刷

书号 ISBN 978-7-5525-1592-3/G·1585

定价 36.00元

版权所有 翻印必究

“学人文库”编委会

主 编：李 星

副 主 编：钟正平

执行主编：武淑莲 方建春

编委会成员：

梅 军 张 波 孙 宁 于永森 马 旭 王安治

王建全 王得盛 方建春 田凤俊 朱进国 伏振兴

刘世巍 苏晓虎 张建国 陈昌举 虎西山 虎维尧

金周宏 郑海洋 赵晓红 郭亚平 唐宏瑛 蔺 勇

薛正斌

前 言

在学校特色发展、内涵发展、科学发展，全面提高人才培养水平，提升教育质量的跨越式发展之际，宁夏师范学院“学人文库”终于破壳问世了。

为了呈现近40年来一批学科中坚的代表性成果，推进学术繁荣，让宁夏师范学院这所年轻的本科院校师生的学术结晶有展示的平台，“学人文库”的付梓出版，必将是一件福荫后学的事业。

“学人文库”的著作与宁夏师范学院近40年的历史相比，还是一个“新生儿”，但是有了这个开始，她会在阳光、风雨中成长、进步。我们相信，有前辈学者的筚路蓝缕，又有“后学”的薪火相传，诸多的学术积累定然会在漫长岁月中留下回响。值此之始，我们期望更多的学人以此为契机，潜心研究，锐意创造，积学、向学，奉献出更多更好的智慧成果。

“清水河畔静读书，六盘山下育英才”。宁夏师范学院得清水河之涓秀，六盘山之伟豪，虽然僻远贫闭，但有了宁夏师范学院一批批“学人”智慧的烛照，固原——这座历史文化古城必将焕发新的文化内涵。

“学人文库”会本着开放的视野，以系列丛书的形式融汇宁夏师范学院学人研究成果中的华彩乐章。无论以时间为序，还是按学科分类，或者依专业建类，我们需要呈现的就是术业有专攻的各类文风，彰显“宁师学苑”的片片风景。

学人文库编委会

序

空中目标 (Aerospace Target) 包括大气层中的飞机、飞艇等航空目标和在稠密大气层外, 距离地球表面1000公里以上的宇宙空间的人造飞行器 and 空间碎片等航天目标。ISAR (Inverse Synthetic Aperture Radar, 逆合成孔径雷达) 已经成为非合作运动目标成像的有力的数字信号处理工具, 通过对空中目标的逆合成孔径雷达成像, 能够获得其运动态势和各种结构特征参数, 为后续的目标分类、识别和编目提供有力的技术支持, 因此空中目标ISAR成像技术在国防安全等方面发挥着重要的作用。

本书主要研究空中目标ISAR实时成像处理技术。通过建立ISAR实时成像的数学模型, 分析了ISAR实时成像处理的几个关键因素, 对距离像分辨率、方位向分辨率以及平动补偿中的包络对齐和初相校正等因素进行了分析和推论, 结合实测飞机回波信号, 利用Matlab进行了实时成像仿真。利用CCS平台研究了TMS320C6678 DSP代码算法和优化问题, 提出了“任务流水线”的并行编程方法, 雷达采用步进频工作模式, 信号处理板卡采用FPGA+ TMS320C6678 DSP构架, 对DSP进行了任务映射, 采用C语言和汇编语言混合编程, 在FPGA的控制下对飞机实测回波数据实现了实时成像, 仿真和实测数据的成像结果验证了相应算法的有效性和研究方案的可行性, 达到了高实时性处理的要求。

2014年10月



目 录

第一章 绪 论

- 1.1 ISAR 成像研究意义与国内外现状 / 1
- 1.2 ISAR 实时成像 / 7
- 1.3 本书章节安排 / 9

第二章 影响 ISAR 实时成像的几个因素分析

- 2.1 ISAR 转台成像的数学模型 / 12
- 2.2 ISAR 成像中的二维分辨率 / 16
- 2.3 ISAR 成像平动补偿原理 / 17
- 2.4 线性调频信号及脉冲压缩技术 / 25
- 2.5 线性调频步进信号 / 48
- 2.6 高速目标成像 / 57
- 2.7 成像质量评价 / 70

第三章 ISAR 成像算法

- 3.1 ISAR 成像算法概述 / 74
- 3.2 距离-多普勒成像算法 / 75
- 3.3 基于超分辨率估计的成像方法 / 86
- 3.4 非平稳运动目标成像 / 88

第四章 ISAR 成像算法仿真

- 4.1 引言 / 93
- 4.2 距离-多普勒算法仿真 / 93
- 4.3 KEYSTONE 徙动校正算法 MATLAB 仿真 / 103
- 4.4 飞机目标成像 / 107

第五章 TMS320C6678 概述

- 5.1 DSP 芯片基本概述 / 110
- 5.2 TMS320C6678 内核结构 / 114
- 5.3 存储器结构 / 117
- 5.4 CPU 结构 / 119
- 5.5 EDMA3 数据传输 / 121

第六章 ISAR 实时成像软件设计

- 6.1 Matlab 与 CCS 软件 / 132
- 6.2 TMS320C6678 代码优化 / 133
- 6.3 基于 Matlab 软件的 ISAR 成像仿真 / 147
- 6.4 Matlab 与 CCS 之间的数据导入与导出 / 150
- 6.5 CCS 软件基础 / 152

第七章 基于 C6678 的 ISAR 实时成像并行设计

- 7.1 ISAR 成像实时处理板设计 / 155
- 7.2 ISAR 实时成像流程图 / 160
- 7.3 ISAR 实时成像算法软件映射 / 165
- 7.4 多核编程 / 168
- 7.5 ISAR 实时成像处理结果对比 / 178

参考文献 / 179

后记 / 182

第一章 绪 论

1.1 ISAR 成像研究意义与国内外现状

1.1.1 ISAR 成像研究意义

雷达(Radio Detection and Ranging Radar)是无线检测和测距的英文缩写。这也表明了雷达最初的设计目的和任务是检测和发现目标并测量其距离的。随着先进的 DSP 技术的出现,雷达现在已经从一维的距离信息获取扩展到距离、方位和高度的三维,从静止的目标扩展到了运动的目标,从普通的目标检测扩展到了目标形状、大小和图像信息的获取与识别等。目前高分辨率成像雷达的研究如空间目标成像、海面目标成像、多目标成像、小目标成像、三维成像、实时成像等成为研究的热点。

雷达目标识别技术可以分为特征识别和成像识别两大类,都是在 20 世纪 50 年代就已经提出的设想,并且平行发展,成像技术发展比较快。特别是近几年来,雷达成像技术不仅在军事方面获得了广泛的应用,而且在民用方面也占有广阔的市场。因为 SAR/ISAR 对目标具有高分辨、全天候、全天时的成像能力,特别是 ISAR,它可以对非合作目标,如飞机、舰船、卫星、导弹、天体等进行远距离成像,得到目标散射特性的空间分布,即微波图像,从而获得目标的几何形状、尺寸以及结构特征,便于对目标的分类与识别。现代成像雷达不仅分辨率高、穿透性能好而且抗干

抗能力也很强,极大程度地弥补了可见光与红外线成像技术的不足。尤其是随着现代科学技术的不断进步,雷达成像技术也在日臻完善。

按照雷达的工作原理和成像的不同方式,分为合成孔径雷达(SAR, Synthetic Aperture Radar)和逆合成孔径雷达(ISAR, Inverse Synthetic Aperture Radar)两个重要的方面。它们的基本原理都是利用雷达与目标间的相对运动获得大的合成孔径,从而获得高的分辨率。合成孔径雷达(SAR)是目标固定,通过雷达平台的运动形成合成孔径;而逆合成孔径雷达(ISAR)则是雷达平台往往保持不动,针对运动的目标,例如飞机、舰船、空间站、导弹等形成大的合成孔径。如图 1-1 所示,ISAR 对空间站、飞机的成像。随着雷达的应用越来越广泛,SAR 和 ISAR 的界线不再是很清晰,若将 SAR 与 ISAR 两种技术结合起来,便可以在运动的雷达平台上,既对不动的目标成像,又对运动的目标成像。



(a) 和平号空间站 ISAR 图像



(b) 航天飞机的 ISAR 图像

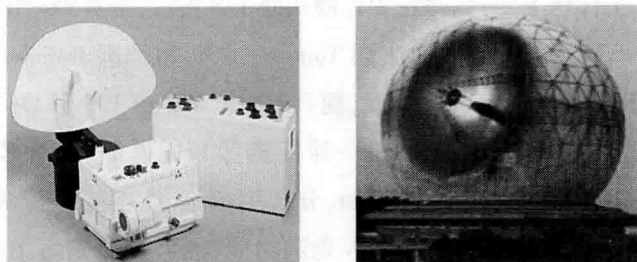
图 1-1 ISAR 图像

1.1.2 国内外现状

逆合成孔径雷达(ISAR)是在 SAR 的基础上发展起来的。起初 ISAR 技术也主要是对合作性目标进行成像,后来随着技术的发展渐渐地向非合作性目标进行成像。20 世纪 60 年代初,美国密西根大学 Willow Run 实验室的 Brown 等人开展了对旋转目标成像的研究,并提出了逆合成孔径雷达的基本概念,并在 1980 年获得了真实飞机的 ISAR 图像,并将其发表在相关的论文中。他们还对 ISAR 的运动补偿、信号预处理等问题做了研究。后来,有很多国家开始研究逆合成孔径雷达成像,并出现公开报道的飞机 ISAR 的动态图像。20 世纪 70 年代初,美国林肯

实验室获得了高质量的近地空间目标的 ISAR 图像,美国 V.C Chen 在 1996 年利用联合时频分析方法对机动目标进行成像,获得了好的效果。近几年,V.C Chen、Jian Li 等人又将微多普勒分析的方法引入到 ISAR 成像,研究了具有游动部件目标成像,并给出了飞机的游动部件成像结果。

伴随着对 ISAR 技术不断深入的研究,现在,国外已有多种成像雷达投入装备使用。其在军事中得到了广泛的应用,成功地获得了飞机、舰船、导弹、卫星等运动目标的成像,对目标的识别、打击效果评估、成像等方面取得了丰硕的成果;ISAR 已经成为战略防御系统中非常重要的目标识别手段,如德国 FGAN 研究所的 TIRA ISAR 雷达,法国 Ocean Master 100 和 Ocean Master 400 雷达,如图 1-2 所示。



(a) Ocean Master 雷达组件

(b) TIRA 雷达

图 1-2 ISAR 雷达

早期的 ISAR 技术是针对合作目标成像的。20 世纪 60 年代初,美国密西根大学 Willow Run 实验室的 Brown 等人开展了对旋转目标成像的研究;随后西屋公司、通用电器、航天公司等相继研制对空间轨道目标的成像雷达。20 世纪 70 年代初,美国 MIT 林肯实验室首先获得了高质量的近地空间目标(轨道可精确预测)的 ISAR 图像。1980 年,美国的 C.C. Chen 和 Andrew 较早发表了真实飞机的 ISAR 图像,并对信号预处理、距离弯曲及运动补偿等问题均做了分析与研究;之后陆续出现公开报道的飞机 ISAR 图像,有 DC-10 和 Boeing727 以及 DC-9,convair CV580 等等。美国海军实验室与德克萨斯仪器公司合作,于 20 世纪 80 年代初成功实现了对舰船目标的成像。1993 年英国 Thorn EMI 公司还给出了安装在悬崖顶上的雷达对舰船成像的图片。20 世纪 70 年代还对金星进行了雷

达成像。

由于 ISAR 能够获得运动目标(如飞机、舰船、导弹、卫星等目标)的精细图像,已经成为战略防御系统中极为重要的一种目标识别手段。现在,主要发达国家都已将 ISAR 技术广泛应用于实际雷达系统中。

舰载雷达系统中,曾经报道过的 Cobra Judy 与 Cobra Gemini 雷达系统都具有 ISAR 成像功能。装载在美国军舰瞭望号上的 Cobra Judy 雷达系统 1981 年开始工作,为 S 波段相控阵雷达,后又加装 X 波段宽带成像功能,是目前最大的移动雷达,主要用于对弹道导弹的监视与预警。1999 年为了更加有效对弹道导弹进行防御,美国又在无敌号上安装了 Cobra Gemini 雷达系统,该雷达系统宽带工作模式具有带宽 1 GHz,分辨率为 0.25 m,工作在 X 波段,跟踪工作模式处于 S 波段,带宽 300 MHz。

机载 ISAR 更是普遍,如法国 Tomson-CSF 和德国 Daimler-Benz 联合研究的机载 Ocean Master 家族,现有 Ocean Master 100 和 Ocean Master 400 两个型号,工作在 L 波段,有一维距离像和先进的 ISAR 模式,其中中心频率 8~10 GHz,探测距离 30km,分辨率 3m。能够提供探测、战术处理、情景展示和绕过恶劣天气区等先进功能,能够探测到海上各种小目标,包括潜望镜、小船和救生艇等。

美国雷声(Raytheon)公司在 1998 年为美国海军研制了 AN/APS-137B(V)5 雷达系统,安装在海军的 S-3B 反潜飞机上,具有 ISAR 和 SAR 功能,其中心频率 9.75 GHz,带宽为 500 MHz。美国电传公司(Telephonics Corporation)研制了 AN/APS-147 监视雷达和机载多模监视雷达装置 APS-143B(V)3“大洋眼”,有 ISAR, SAR/MTI 等功能。洛克希德·马丁公司研制了 ALQ-147 多功能雷达(Multimode Radar, MMR),装在海军的多用途直升机 MH-60R(其由 UH-60 的机架和 SH-60 发动机改装而来),并在加勒比海的大西洋海下试验及评估中心完成了三周的开发试验,公司称飞机的多模雷达(MMR)在试验中表现不错,该雷达具有逆合成孔径雷达(ISAR)成像、声探测和潜望镜及小目标探测特点,能够提供 MH-60R 直升机的远程和短程搜索能力。MMR 在试验中首次进行了海下探测试验,并产生了一个水面潜水艇 ISAR 图像。俄罗斯也已把

ISAR 作为功能部件装备于许多雷达上。

地基雷达系统中最具代表性的 ISAR 应用是位于夸贾林环礁上的 (Kiernan Reentry Measurement, KREMS) 设施。这个设施拥有美国最先进与最重要的宽带雷达探测中心,在美国国家导弹防御系统(NMD)起着重要的作用。图 1-3 展示了这个系统中的两个宽带雷达,照片左边的为 1970 年为宽带目标识别研究而建造的 ALCOR 雷达,是世界上建造的第一个宽带雷达。这个雷达工作于 C 波段,利用带宽为 512 MHz 的宽带 Chirp 信号波形对目标进行观测。当我国于 1970 年发射第一颗卫星时,ALCOR 雷达通过对助推火箭的成像得到目标的尺寸大小的信息,而且这部雷达于 1971 年对前苏联的礼炮 1 号空间站进行了成像以获得目标信息。靠近照片中间的为工作在 Ka 波段的 Kwajalein 毫米波雷达,带宽可达 2 000 MHz。两个雷达都处于白色的雷达天线屏蔽罩中,不仅可以对付弹道导弹,还可以用来跟踪太空垃圾等。



图 1-3 Kiernan 系统设施

随着 ALCOR 雷达对空间目标成像获得的成功,美国又研发和建造了几个宽带雷达用于 BMD 研究和空间目标的识别,如 Haystack 山上雷达站所拥有的干草堆远距离成像雷达(LRIR)与干草堆辅助雷达等等。LRIR 开始工作于 1978 年。发射线性调频信号,带宽 1 GHz,可以对 40 000 km 的轨道目标跟踪成像。干草堆辅助雷达 1993 年开始投入使

用,工作于 Ku 波段,是第一部带宽达到 2 G 的雷达,使距离分辨率达到 0.12 m,使 LRIR 卫星图像分辨率得到了提高,而且这部雷达可对 NASA 提供非常有用的空间碎片详细信息。

德国 FGAN-高频物理和雷达技术研究所(FHR)拥有的空间观测雷达 TIRA(跟踪成像雷达),具有目前世界上最大的天线罩,直径为 49m,里面有 34m 的抛物面天线系统,包括 L 波段窄带跟踪雷达和 Ku 波段宽带

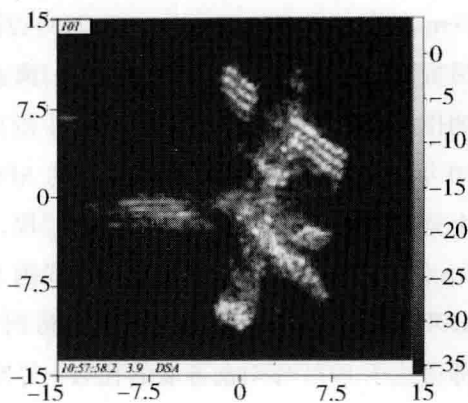


图 1-4 礼炮-7 空间站 ISAR 图

成像雷达。这部雷达于 1990 年成功地对前苏联礼炮-7 空间站的再入过程和物理特性进行了观测,并获得空间站不同姿态下的 ISAR 图像,从图像中得到空间站的形状、尺寸、运动姿态等特征信息。图 1-4 为该部雷达对礼炮-7 空间站所成的 ISAR 图像。除了在军事应用上,ISAR 在民用上,如空中交通管制、机场调度、港口交通管制等许多领域也有广泛的应用。日本、澳大利亚、加拿大等国都有大量有关 ISAR 应用研究的报道。

我国于 20 世纪 90 年代中期研制出逆合成孔径雷达实验样机,并获得了清晰的飞机目标图像。在国家“863”高科技计划的支持下,1993 年国内 400 MHz 的宽带实验雷达研制完成,并成功地录取到了几组很有价值的数,获得了平稳目标的 ISAR 图像,大大推动了 ISAR 研究工作。北航的“高分辨率二维成像系统”是 ISAR 技术在我国的首次成功应用,该成像系统被用于“863”课题 ISAR 的初期实验,对我国 ISAR 技术发展起到促进作用,1987 年该项目通过了航空部组织的成果鉴定,1988 年获航空部科技进步一等奖,1988 年还获得国家科技进步奖。在“九五”电子预研计划的支持下,从 1996 年开始,西安电子科技大学雷达信号处理

实验开始对成像雷达进行研究,参与国防预研项目、国家“九五”“十五”“十一五”项目、国家自然科学基金、国家“863”计划和国家 973 子项等多项与成像雷达相关的横向和纵向科研项目,取得了丰硕的成果,实现对空中动目标的清晰成像,获得了舰船目标的清晰图像,掌握了具有国际先进

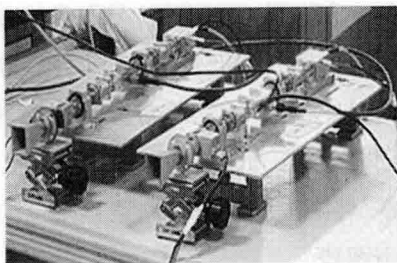


图 1-5 中物院 0.14THz 高分辨率 ISAR 成像系统

水平的 SAR/ISAR 成像算法和 SAR/ISAR 成像系统。2011 年中国工程物理研究院成功地将 0.14 THz 的通信技术与 ISAR 快速视信号处理机结合起来,成功地获取了高分率、高清晰的 THz—ISAR 图像,其成像分辨率达到 $3\text{ cm} \times 3\text{ cm}$,如图 1-5 所示。特别是近年,在国防科技预研基金的支持下,ISAR 实时成像信号处理机的研制工作已经逐步开展起来,由此可见,我国的 ISAR 研究正在蒸蒸日上,不久的将来会取得瞩目的成就。

1.2 ISAR 实时成像

一般来说,对处在远距离的雷达目标,雷达的波束宽度要比目标体对雷达的张角大的多,这时利用雷达角分辨率是很难分辨清目标中的组成部件。利用 ISAR 成像技术,不但可以在横向上(距离向)能够识别出目标的具体细节,而且在纵向上(方位向)还可以得到目标的外形结构特征。这种能获得目标横向与纵向高分辨率的逆向合成孔径雷达(ISAR)技术得到国内外雷达界和先进科技技术拥有国家的关注和重视,目前利用 ISAR 实现雷达目标成像已经是一个重要的研究课题。

图 1-6 是 ISAR 的工作原理图,在图中距离向是与电磁波方向平行的方向即垂直于雷达视线(LOS, radar line of sight)方向的一组等距离平行线,即平行于 x 轴的平行线,通常称其对应的单元为距离单元。方位向则是利用目标运动时各点的多普勒频移不同而形成的多普勒分辨率,等多普勒线来表示分辨单元的,即等多普勒平面,其平行于目标转轴与

LOS 方向形成的平面(与电磁波方向垂直的方向),为平行于 Y 轴的平行线,称其对应的分辨率单元为多普勒单元。逆合成孔径雷达通过发射大的时宽带信号,然后对其采用脉冲压缩技术实现距离方向的高分辨率,同时也对回波进行相干积累以此合成大的孔径来获取方位向的高分辨率,将距离像和方位向通过一定的耦合算法耦合起来获得目标的二维清晰图像。

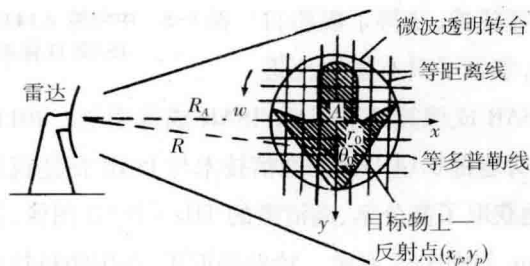


图 1-6 ISAR 成像原理示意图

图 1-7 是 ISAR 成像的软件设计流程图,可以看出 ISAR 成像软件设计主要包括平动补偿和成像处理两大步骤。平动补偿主要的目的是将目标中相对于雷达运动中的平动分量进行补偿,只保留目标相对雷达的转动分量,这样就可以等效为转台模型进行 ISAR 数据处理。常用的方法主要包括包络对齐和相位补偿。成像处理是对目标回波数据进行多普勒估计,完成横向距离压缩得到目标散射中心对电磁波散射系数的空间分布。

成像雷达要进行实时成像,因此其数据传输速率很高、捕捉数据量大、对信号实时性处理很复杂,硬件难以实现。目前用于实时成像处理的硬件技术主要包括专用 ASIC 芯片技术、DSP 技术和大规模 FPGA 技术等。

TMS320C6678 是一款基于 TI 的 KeyStone 多核结构、性能极高的 8 核 CPU 和丰富的片上资源的 DSP 芯片, TMS320C6678 是业界首款时钟频率高达 10 GHz, 包含 320GMACS 和 160GFLOPS 的定/浮点于一体的高性能 DSP 处理器,其单核能高速运行达到 1.25 GHz,同时为开发者提供了一系列的应用平台,比如:医学成像、自动检测控制以及其他高性能应