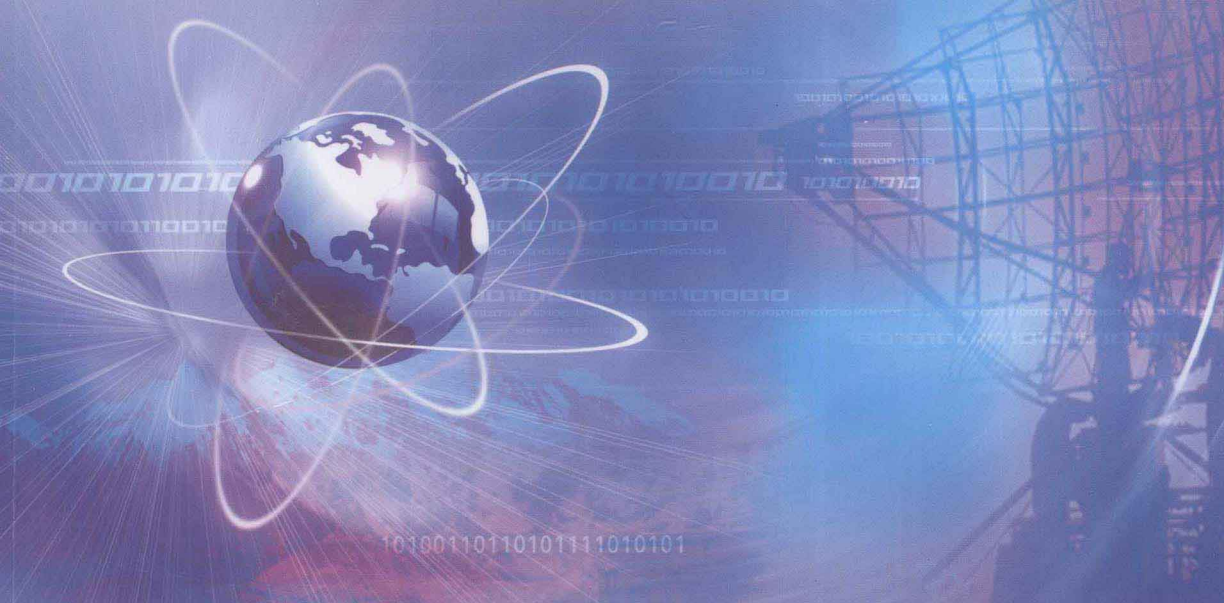




逆合成孔径雷达 理论与对抗

NIHECHENG KONGJING LEIDA
LILUN YU DUIKANG

李源 著



國防工業出版社
National Defense Industry Press

逆合成孔径雷达理论与对抗

李源 著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书分两部分。第一部分介绍了逆合成孔径雷达(ISAR)成像的基本原理和信号处理的基础知识,第二部分介绍了对于ISAR实施电子对抗的基本原理和主要干扰技术。

在第一部分中,首先介绍了雷达基础理论,如雷达散射截面、雷达距离方程、雷达波形分析等基本概念,重点介绍了步进频率信号和线性调频信号的性质等;其次介绍了ISAR成像的电磁场理论,讨论了不同转角不同带宽下的成像算法;最后介绍了ISAR信号处理理论和运动补偿技术等。

在第二部分中,首先介绍了对ISAR电子对抗的压制式干扰和欺骗干扰技术;接着介绍了干扰效果的评估方法;最后介绍了实施欺骗干扰的数字图像合成器的工程实现方法。

本书可作为高等院校电子信息工程及信息与通信工程的高年级本科生和研究生的参考书,也可供从事雷达系统研究与设计的科技工作者自学参考。

图书在版编目(CIP)数据

逆合成孔径雷达理论与对抗/李源著. —北京:国防工业出版社,2013.12

ISBN 978-7-118-09153-3

I. ①逆... II. ①李... III. ①逆合成孔径雷达—理论②逆合成孔径雷达—电子对抗 IV. ①TN958

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第270195号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100048)

北京嘉恒彩色印刷责任有限公司

新华书店经售

*

开本 710×960 1/16 印张 17¼ 字数 306千字

2013年12月第1版第1次印刷 印数1—2000册 定价48.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

前 言

现代军事斗争中,电子战是重要的组成部分。电子器件和信息处理技术已深入到武器系统的各个领域,是武器系统的神经中枢,发挥着感知、理解、寻的、攻击和防护等重要功能。在这些电子系统中,高分辨率成像雷达一直是非常重要的信息获取工具,尤其是逆合成孔径雷达(ISAR),它不仅可以探测动目标,而且还可以估计目标的运动状态和运动轨迹。一方面作为武器系统攻击方,它可以准确对目标定位,实施精确打击;另一方面作为防御方,它可以测量来袭目标的方位和状态,从而对目标实施精确拦截,最大限度地保护己方阵地。因此,ISAR 的研究以及相应的电子对抗技术,一直是该领域研究的热点。本书就 ISAR 成像的机理以及相关信号处理技术和电子对抗技术做一系统阐述。

本书首先介绍了 ISAR 成像及电子对抗的相关应用背景,探讨了 ISAR 成像的基本特点和常用干扰方法。接着介绍了雷达理论基础,包括雷达散射截面的有关概念、雷达距离方程、电磁波散射理论、匹配滤波、模糊函数等雷达信号处理和信号设计领域内的重要概念。同时,就常用信号及其基本性质做了简单介绍,并重点介绍了步进频率信号和线性调频信号的特征。

从电磁场的角度,本书介绍了 ISAR 成像的基本原理,重点介绍了目标反射电磁场信息处理中的空间分集和频率分集方法。又从信号处理的角度,分别以步进频率和线性调频信号为例进行了 ISAR 成像算法的详细阐述,包括距离向压缩和方位向压缩算法等,重点介绍了距离多普勒算法和时频分析方法。运动补偿是 ISAR 信号处理中的重点,是 ISAR 信号处理中的关键技术。本书介绍了基于包络相关方法的距离对齐技术,以及基于异常值检测的转动补偿技术,并利用大量的仿真实例对这些方法做了详细说明。

最后本书介绍了雷达电子对抗技术。首先介绍了压制式干扰和基于正弦调相技术的距离像干扰技术,接着探讨了对抗两种 ISAR 信号波形的欺骗干扰技术,介绍了数字图像合成器理论,并对其工程实现做了详细的设计。

为方便读者理解掌握该书所提到的基本原理,在相关章节之后提供了 MATLAB 代码,这些代码都经作者调试通过。读者可在这些代码的基础上做更深入的研究。

作者从事 ISAR 和电子对抗研究多年,得到了诸多同行专家的鼓励支持。在这里,衷心感谢中国工程物理研究院[陈惠连]研究员、彭定之研究员,他们为作者的研究指明了方向、提供了坚实的研究基础;感谢山东省青年科学家奖励基金项目(BS2010DX021)、自然科学基金项目(61070175 和 61175053)以及山东省高校智能信息处理重点实验室提供的资助。

由于 ISAR 成像技术和电子对抗技术不断发展,一些新的理论和方法不断涌现,又限于作者水平,成书时间仓促,恳请读者对书中错误与不妥之处提出批评指正。

作者
2013.8

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 雷达概述	1
1.2 成像雷达	4
1.2.1 实孔径雷达成像	4
1.2.2 成像雷达的研究历史	5
1.2.3 ISAR 特点	5
1.2.4 关于运动和运动补偿	6
1.3 目标的距离像	7
1.4 雷达电子对抗	9
1.4.1 电子支援系统	9
1.4.2 电子对抗	10
第 2 章 雷达理论基础	20
2.1 雷达散射截面	20
2.2 雷达距离方程	21
2.3 雷达探测距离和信噪比	24
2.4 电磁散射理论与雷达回波	26
2.5 匹配滤波与模糊函数	28
2.6 常用雷达波形	29
2.6.1 连续波	30
2.6.2 调频连续波	30
2.6.3 步进频率连续波雷达	31
2.6.4 短脉冲	31
2.6.5 chirp 脉冲	32
2.7 ISAR 发射信号特征	33
2.7.1 步进频率信号的模糊函数	34

2.7.2	chirp 信号的模糊函数	37
2.8	窗函数	39
2.8.1	Hanning 窗	40
2.8.2	Hamming 窗	40
2.8.3	Kaiser 窗	40
2.8.4	Blackman 窗	40
2.8.5	Chebyshev 窗	40
2.9	本章小结	41
第 3 章	ISAR 成像理论基础	48
3.1	概述	48
3.2	散射场与 ISAR 成像	49
3.2.1	成像原理	49
3.2.2	一维距离像	50
3.2.3	一维方位像	51
3.3	小带宽小转角下的 ISAR 成像	52
3.4	大带宽大转角下的二维 ISAR 图像表达	55
3.4.1	直接积分方法	56
3.4.2	极坐标格式化算法	57
3.5	本章小结	59
第 4 章	ISAR 成像信号处理	69
4.1	雷达图像的分辨率	69
4.1.1	距离向分辨率	69
4.1.2	方位分辨率	70
4.2	一维距离像	72
4.2.1	时域处理方法	72
4.2.2	频域处理方法	78
4.3	对步进频率信号的讨论	82
4.3.1	最大无模糊距离	82
4.3.2	径向运动引起的图像失真	83
4.3.3	$\tau\Delta f$ 的意义	84
4.3.4	参数讨论	86

4.4	距离多普勒成像算法	89
4.4.1	方位维概念	90
4.4.2	基于步进频率波形的距离多普勒成像算法	92
4.4.3	基于傅里叶变换的 chirp 波形 ISAR 成像	93
4.4.4	联合时频变换成像法	97
4.4.5	傅里叶变换方法和时频分析方法成像技术的比较	99
4.5	成像算例	100
4.5.1	基于步进频率波形的成像结果	100
4.5.2	基于 chirp 信号波形的算例	101
4.5.3	基于联合时频分析算法的算例	102
4.6	本章小结	103
第 5 章	ISAR 信号运动补偿	122
5.1	ISAR 成像的困境	122
5.2	目标运动引入的多普勒效应	126
5.3	基于傅里叶变换的 ISAR 图像运动补偿方法	128
5.3.1	平动补偿概述	129
5.3.2	距离跟踪	130
5.3.3	多普勒跟踪	133
5.3.4	成像结果及讨论	134
5.3.5	转动补偿	136
5.4	本章小结	144
第 6 章	逆合成孔径雷达的压制式干扰	159
6.1	ISAR 干扰分析	159
6.1.1	ISAR 雷达方程与干扰方程	159
6.1.2	ISAR 接收信号的干信比和成像处理的干信比	161
6.1.3	ISAR 干扰途径分析	162
6.2	ISAR 干扰机理	163
6.2.1	ISAR 干扰机理分析	164
6.2.2	ISAR 干扰仿真实验	166
6.2.3	ISAR 压制干扰和 SAR 压制干扰比较	166
6.3	一种基于正弦调相的 ISAR 干扰方法	168

6.3.1	目标的一维距离像及运动补偿	168
6.3.2	干扰信号的设计及分析	170
6.3.3	干扰信号对目标一维距离像的影响及 运动补偿的影响	172
6.3.4	干扰仿真实验	174
6.4	本章小结	177
第7章	欺骗干扰	180
7.1	欺骗干扰概述	180
7.2	基于修正的相位调制系数的 chirp ISAR 单目标欺骗干扰	181
7.2.1	概述	181
7.2.2	基于修正的相位调制系数的欺骗信号的产生	181
7.2.3	基于修正的相位调制系数的欺骗信号成像处理	185
7.2.4	仿真结果及讨论	186
7.3	chirp 多(两)目标欺骗干扰	188
7.3.1	两个假目标图像合成原理	188
7.3.2	欺骗信号在 ISAR 中的处理	192
7.3.3	成像仿真	195
7.4	SFW ISAR 单目标欺骗干扰	196
7.4.1	图像合成原理	196
7.4.2	SFW ISAR 接收到假目标信号后的处理过程	199
7.4.3	图像合成系统仿真	200
7.4.4	SFW ISAR 单目标欺骗干扰小结	204
7.5	SFW ISAR 多目标欺骗干扰	204
7.5.1	图像合成器原理	204
7.5.2	图像合成系统仿真	206
7.6	本章小结	211
第8章	干扰效果评估	213
8.1	主观评估法及其缺点	213
8.2	ISAR 工作的特点	214
8.3	基于均方误差干扰效果评估方法	214
8.3.1	均方误差评估方法原理	214
8.3.2	ISAR 干扰效果评估模型	215

8.3.3	仿真结果及分析	216
8.4	基于二维相关系数的干扰评估方法	216
8.4.1	评估原理	216
8.4.2	仿真结果及分析	218
8.5	本章小结	219
第9章	数字图像合成器的工程设计	220
9.1	理想图像合成器和数字图像合成器	221
9.1.1	理想图像合成模型	221
9.1.2	数字图像合成器模型	221
9.2	数字图像合成器的量化位数选择	222
9.2.1	相位量化位数选择	222
9.2.2	查表量化位数选择	223
9.2.3	DAC 位数选择	224
9.2.4	乘法器的输出位数选择	225
9.2.5	增益量化位数选择	225
9.3	数字图像合成器的系统结构设计	227
9.3.1	总体结构	227
9.3.2	模块设计	228
9.4	数字图像合成器组件设计	231
9.4.1	5 位计数器	231
9.4.2	4-16 译码器	232
9.4.3	调制系数锁存器	232
9.4.4	截获信号相位锁存器	234
9.4.5	查表器	235
9.4.6	移位寄存器	237
9.4.7	5 位加法器	238
9.4.8	16 位加法器	239
9.5	数字图像合成器电路仿真	240
9.5.1	控制逻辑电路仿真	240
9.5.2	数据锁存电路仿真	241
9.5.3	距离单元调制器仿真	241
9.5.4	系统仿真	242
9.6	本章小结	243
参考文献		265

第1章 绪 论

1.1 雷达概述

电磁波在空间中传播,遇障碍物后致使其信号能量衰减与传播方向发生变化,称为电磁散射。由于传播环境中变数繁多,且电磁波长与障碍物尺寸的数量级变化很大,要掌握或评估目标的电磁散射特性,一直都是极具挑战性的课题。然而电磁散射的机制对于无线通信、雷达、遥测等电磁应用在运作时的特性影响至巨,是以有实际的研究需求。成像雷达就是根据目标散射的电磁波对目标成像,进而观测其散射点分布情况。

雷达(Radar)是英文 RAdio Detection And Ranging 的缩写,是一种应用非常广泛的电磁感知系统。一般工作波长为 $1\text{cm} \sim 30\text{cm}$ 。由于空气对该波段的电磁波吸收很少,因此使用微波探测目标可全天候工作。起初其主要作用是探测目标并测量目标和雷达之间的距离,后来随着信号处理技术的发展以及一些新概念的不断涌现,雷达亦可以用于地理遥感成像、气象探测、空中管制和卫星、导弹的导航制导等。雷达自其概念提出之日起,就得到广泛的研究及发展,在军事和民用领域发挥着至关重要的作用。

雷达的测量方式按照收发天线的配置可分为单基站(Monostatic)雷达和多基站(Multistatic)雷达。多基站雷达之间相互通信,可发展为组网(Networking)雷达。在单基站雷达中,电磁波的发射和接收共用同一幅天线,如图 1.1(a)所示,其发射机和接收机之间使用一双工器隔离开。多基站雷达通常是一部雷达发射,多个雷达接收回波并进行处理,从而获得不同视角下对目标的多维观测结果,如图 1.1(b)所示。若各个基站之间相互通信,基站之间互相交流观测结果,可以通过对目标的综合观测对目标进行分类识别,并提取目标的运动参数,从而判定目标的威胁程度并采取对应的措施。同时可控制雷达发射机的系统参数和照射方向,从而获得对目标的最优观测。

本书主要介绍单基站逆合成孔径雷达的探测和对抗原理。单基站雷达的系统组成通常如图 1.2 所示。波形发生器产生基带信号,经本振调制后送到发射机,发射机将信号进行功率放大后通过天线发射出去。经目标散射之后部分电磁波返回接收天线,其回波在天线上激发的电流经过双工器进入接收机。在接

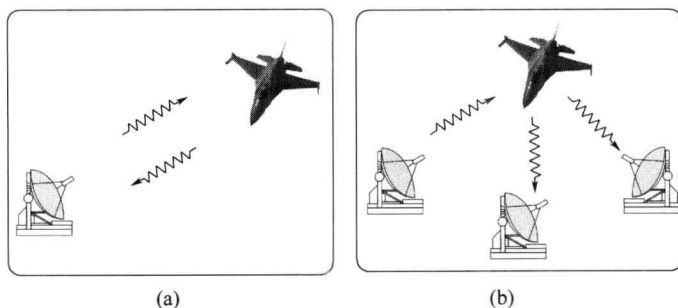


图 1.1 两种雷达系统
(a) 单基站雷达; (b) 多基站雷达。

收机内对回波进行下变频至中频,并经中频放大后进入 I/Q 正交解调器,解调后获得回波信号的相位信息,从而提取目标的有关参数。

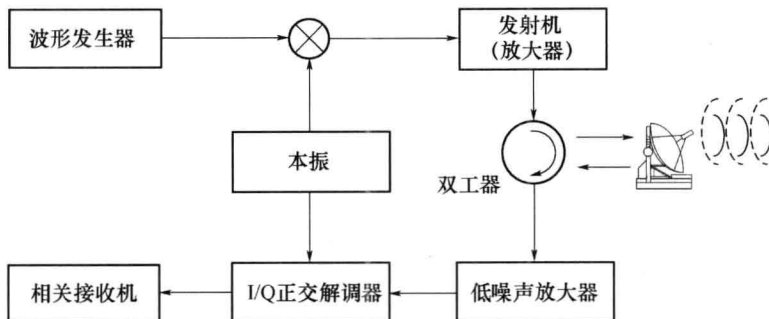


图 1.2 单基站雷达系统组成框图

I/Q 正交解调器在雷达系统中是非常关键的,它将接收信号分为同相(In - Phase)和正交相(Quadrature Phase)两路输出,以得到接收信号的复数表达形式,然后这两路信号传送到相关接收机。在相关接收机内执行脉冲压缩(或匹配滤波)之后得到目标的距离像。若使用多个脉冲,则经过相干处理之后,还可得到目标的方位图像。

在发射机和接收机部分,混频和正交检测是两个非常重要的概念。这里对其做一简要介绍。

混频就是变换射频信号的载频。在发射机,混频器将基带波形调制到射频,并经放大后发射出去;在接收机,使用混频可将接收到的射频回波转换到更低的中频。这里重点讲述接收机中的混频处理过程。

雷达天线接收到回波信号以后,通常的做法是将一个固定频率的本振信号与目标回波信号相混频,产生一个差频输出,该差频称为中频。这种将接收信号

的载频转换到中频的接收机通常称为超外差接收机。图 1.3 给出了标准的下变频过程。回波与参考信号相乘后得到乘积 $s_i(t)$, 该乘积信号包含两个不同的频率, 一个是频率之差, 另一个是频率之和。使用带通滤波器滤掉混频后的高频成分, 获得中频信号。通过带通滤波器后, 只有差频信号 (中频) 出现在接收机的输出端。

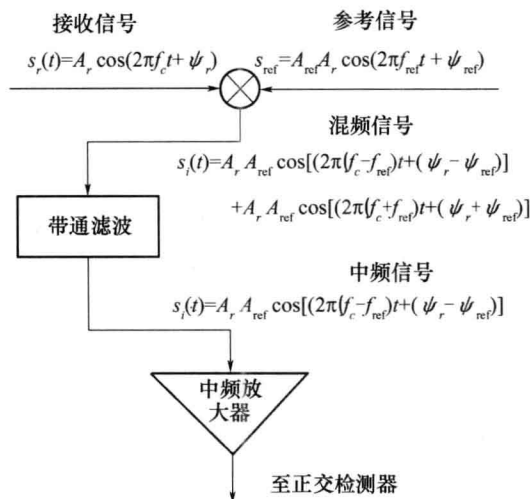


图 1.3 下变频过程

正交检测是用来恢复回波信号中与发射载波有关的相位。前文已提及的接收信号中的相位信息, 如目标的多普勒相移, 对 ISAR 成像是至关重要的。正交检测将接收信号转换到基带信号, 以提取其幅度和相位。

图 1.4 给出了标准的正交检测器原理图。在该图中, 下方的滤波器输出是同相输出 I , 上方的滤波器输出称为正交相输出 Q 。 I 和 Q 统称为基带信号。回波信号表现为以一个多普勒频率为中心的基带信号形式。之所以将其转换到基带, 是因为在低频段可以更方便地对信号进行滤波和放大。

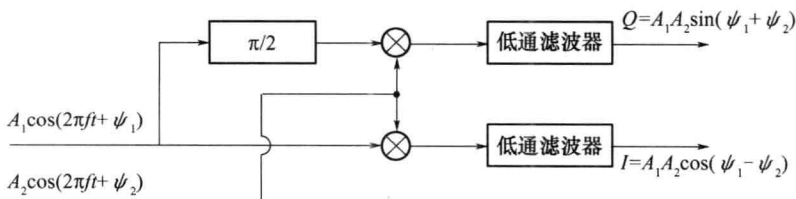


图 1.4 正交检测过程

1.2 成像雷达

1.2.1 实孔径雷达成像

通常高分辨率是指用于分辨单个目标上多个散射中心的能力,而不是用于区分不同的目标。因此高分辨率雷达是目标探测、分类、识别的基础。通过使用大带宽雷达信号可获得高距离向分辨率,通过使用窄波束或者合成孔径处理可获得高方位向分辨率。

使用射频信号对目标成像并不是像 ISAR 和 SAR 这类合成孔径雷达的专利,实孔径成像雷达(或阵列成像雷达)早在 SAR 和 ISAR 的概念提出之前就已经投入应用了。合成孔径和实孔径成像雷达获得距离分辨率的方法都是基于相同的原理,即通过控制发射脉冲,然后在接收端利用脉冲压缩或图像合成的方式实现。

它们之间的不同在于方位向图像的构建方法。实孔径雷达通过控制天线波束获得方位向分辨率,它所依赖的是天线物理特性。如图 1.6 所示,阴影部分波束是长天线的方向图,它比短天线波束窄,因此有更好的角分辨率。

由于在每个方向上的波束宽度和该方向上的雷达长度成反比,因此实孔径成像雷达的方位向分辨率是通过加长天线的方式改善的。这意味着实孔径雷达的方位向分辨率和雷达与目标之间的距离成正比,即距离雷达越近的目标在方位向分辨率越好,距离雷达越远的目标在方位向分辨率越差。因此一个很自然的想法是,能否利用平常大小尺寸的雷达天线获取与长天线相同的分辨率?随着该问题的研究深入,催生了 SAR 的发明。

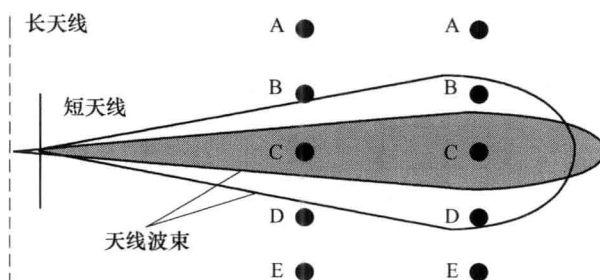


图 1.6 长天线和短天线的角分辨示意图

1.2.2 成像雷达的研究历史

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)的概念于1951年由 Carl Wiley 提出。他指出,使用多普勒频率信息通过信号处理的方式可以获得高角分辨率。后来研究者们对其思想不断丰富和发展,形成了一套完整的理论体系。第一幅 SAR 图像于1958年在 Michigan 大学使用光学处理的方法获得。在20世纪60年代中叶,光学精密仪器得到飞速发展,人们提出了全息雷达的概念并获得了首幅条带 SAR 图像。70年代初,人们开始用数字信号处理的方法获取非实时的 SAR 图像。80年代初,科学家提出了逆合成孔径雷达(Inverse Synthetic Aperture Radar, ISAR)成像的基本概念,同时对动目标 ISAR/SAR 成像技术进行了深入的研究,并提出了一些方法进行运动补偿。到了90年代,人们更深入地研究了 ISAR 信号分析、补偿方法,并将其运用到目标分类和识别实践中,如联合时频变换技术等。

需要指出的是, SAR 系统通常是机载的或星载的,它一般用来实现对地或海洋观测,主要实现对静止目标的观测和监视;而 ISAR 一般是地基的,它用来对运动目标成像,主要对空中运动目标监视、分类、识别和跟踪等。也有一些机载的 ISAR,用来对舰船之类的海上目标成像。

1.2.3 ISAR 特点

ISAR 成像系统是根据目标的电磁散射特性,将目标散射体中的组成部分,如机翼、机舵、机头、引擎等部位,映射到一个二维的平面图上,从而获得目标的大体图像轮廓,进而获得目标的运动状态,实现对目标进行分类、识别和跟踪。

ISAR 图像的维分为距离维和方位维。所谓距离维,就是雷达视线方向,本书中统称为距离向(Range);方位维就是与视线垂直的方向,且垂直于目标旋转轴,又称为横向,在本书中统称为方位向(Azimuth)。ISAR 图像的清晰程度依赖于图像在这两个维度上的分辨率。距离分辨率可通过控制雷达波形参数(如信号类型、重复周期、处理算法等)来实现,其值可从几厘米到几十米不等。有了距离分辨率,目标上的散射点才能映射到不同的距离单元(又称距离门)中,如图1.5所示。方位向的分辨率取决于雷达载波频率以及成像期间目标相对于雷达的视角变化。为获取方位向上各点的分辨率,目标需要相对于雷达做旋转运动。由于旋转过程中各散射点相对雷达有不同的速度,因此会在反射波中表现出不同的多普勒频率。通过使用信号处理方法将这些多普勒频率加以区分,就可以通过合成的手段区分目标上的散射点在方位维上的分布。

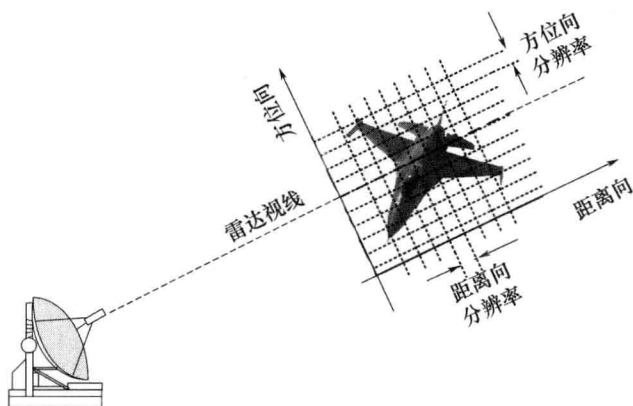


图 1.5 ISAR 几何结构及其图像的维

方位维的合成需要在特定时间内对回波信号做相干处理,这个时间称为相干积分时间 (Coherent Integration Time, CIT), 又称相干处理间隔 (Coherent Processing Interval, CPI)、建帧时间 (Image Frame Time, IFT) 或驻留时间 (Dwell Time, DT)。由于方位维和多普勒信息相互关联,在目标运动参数未知的情况下,无法给出目标在方位维上的刻度,只能以多普勒谱的形式给出目标方位向上的轮廓,因此在一些文献中,有时也称 ISAR 图像为距离多普勒图像。另外需要说明的是,能够在方位向分辨散射点的前提是目标的平动分量在信号中引入的相位误差已经得到补偿,且散射点已经在距离向对齐。

1.2.4 关于运动和运动补偿

合成孔径的前提是目标相对于雷达做旋转运动,并在转动期间采集雷达目标的回波信号加以分析合成方位像和距离像。虽然目标的转动是雷达图像产生的必要条件,但在一些情况下,目标的平动和转动会影响 ISAR 图像的质量。另外,由于较长的相干处理间隔会导致图像的散焦或拖尾,因此需要通过信号处理的方式将这些运动参数加以补偿,否则成像几乎不可能,尤其是当目标快速运动或机动运动的时候。

雷达需要补偿的运动分量包括:

- (1) 平动分量,即目标沿雷达视线运动。
- (2) 转动分量,导致目标相对于雷达的方位角发生变化。

所谓运动补偿,就是要最大限度地消除上述两种运动对成像带来的影响,使 ISAR 图像最优聚焦。为此,研究人员提出了不同的运动补偿方法,这些将在本书中加以阐述。

1.3 目标的距离像

ISAR 图像的两个维分别为距离维和方位维(多普勒维)。所谓距离像,实际上就是被照射目标的反射波形状,它表示的是目标的电磁响应在雷达视线轴上的一维距离投影。若发射波是一时域脉冲,则接收机接收到的雷达回波将表现为随时间变化的电磁场。图 1.7 表示了某目标上 7 个散射点所成距离像的草图。若照射波形是步进频率信号,则其回波的傅里叶逆变换就是目标的一维距离像;若照射波形是脉冲压缩信号(一般为 chirp 信号),则距离像表示的是单脉冲回波在做完脉冲压缩之后的图像轮廓。

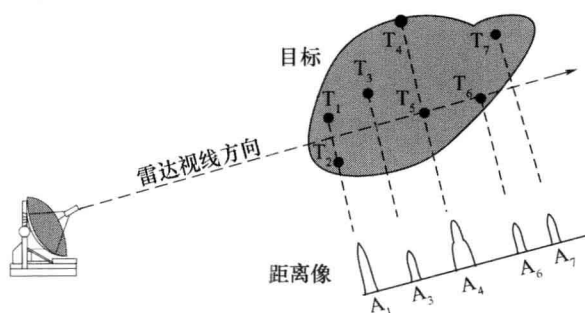


图 1.7 距离像示意图

图 1.7 说明了距离像的物理意义。设目标上的散射点分别用 $T_1 \sim T_7$ 表示。雷达波照射到目标时,会有一部分能量返回到雷达天线,若散射中心不在同一个距离位置处,那么各散射中心对应的回波也会在不同时刻到达接收机,因此可以通过不同时间上对应的反射信号幅度区分目标的距离像。但距离像无法区分出在相同距离处的两个散射中心。如 T_1 和 T_2 两个目标在距离雷达相同的距离单元之内且两散射点距离雷达有同样的距离,因此它们的距离像幅度相互叠加,表示为 A_1 ; T_4 和 T_5 虽然在同一个距离单元之内,但和雷达之间的距离不同,因此表现为 A_4 的形式。从该图可以看出距离像仅在距离维上将目标上的散射点区分开。若多个目标散射点存在于相同的距离单元内,则无法在距离像上将它们区分开来。图 1.8 正是说明了该问题。

图 1.8 展示了三个仿真目标的距离像,图 1.8(a)、(c)和(e)展示了其 ISAR 图像,图 1.8(b)、(d)和(f)展示了对应的距离像。注意,图 1.8(b)、(d)和(f)展示的是距离像的幅度图。实际上距离像是一个复数信号,它包含每个散射点回波的相位信息。正是这些相位信息,使得 ISAR/SAR 成像成为可能。