

合成孔径雷达 成像原理

HECHENG KONGJING
LEIDA CHENGXIANG YUANLI

皮亦鸣 杨建宇 主编
付毓生 杨晓波



电子科技大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

合成孔径雷达成像原理 / 皮亦鸣等主编. —成都: 电子科技大学

出版社, 2007. 3

ISBN 978-7-81114-412-3

I. 合... II. 皮... III. 合成孔径雷达—图像处理 IV. TN958

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 023747 号

内 容 提 要

合成孔径雷达是一种具有高分辨率的成像雷达, 是雷达的一个重要发展方向。

本书从雷达的基础概念讲起, 以合成孔径雷达成像处理为主要内容。可分为两大部分: 第一部分为第二章至第五章, 包括雷达成像处理必要的关键技术: 脉冲压缩、成像处理算法以及多普勒参数估计, 其中还包括对合成孔径雷达基本原理的介绍。第二部分为第六章至第八章, 包括雷达成像的较深入的内容: 干涉测量、相干斑抑制和目标分类与识别。本书既包括雷达成像的基础知识, 也包括近年来成像领域的最新发展状况。

本书可作为高等学校雷达专业的研究生教学用书, 也可供雷达技术领域的工程技术人员和科研人员阅读参考。

合成孔径雷达成像原理

皮亦鸣 杨建宇 付毓生 杨晓波 主编

出 版: 电子科技大学出版社 (成都市一环路东一段 159 号电子信息产业大厦 邮编: 610051)

策划编辑: 杜 倩

责任编辑: 杜 倩

主 页: www.uestcp.com.cn

电子邮箱: uestcp@uestcp.com.cn

发 行: 新华书店经销

印 刷: 成都金龙印务有限责任公司

成品尺寸: 185mm×260mm 印张 14.25 字数 346 千字

版 次: 2007 年 3 月第一版

印 次: 2007 年 3 月第一次印刷

书 号: ISBN 978-7-81114-412-3

定 价: 22.00 元

■ 版权所有 侵权必究 ■

- ◆ 邮购本书请与本社发行部联系。电话: (028) 83202323, 83256027
- ◆ 本书如有缺页、破损、装订错误, 请寄回印刷厂调换。
- ◆ 课件下载在我社主页“下载专区”。

前 言

合成孔径雷达是一种具有高分辨力的成像雷达，其原理是通过飞行载体运动来形成雷达的虚拟天线，从而获得高方位分辨的雷达图像数据。与光学传感器相比，SAR 具有全天时和全天候工作能力的独特优点。随着 SAR 技术的发展和提高，其分辨率越来越高，目前已接近或超过光学成像的分辨率，因而被广泛应用于地球遥感、海洋研究、资源勘探、灾情预报和军事侦察等领域。

合成孔径雷达起源于 20 世纪 50 年代，1951 年美国 Goodyear 公司的 Wiley 首先提出了这一概念。1958 年，美国密执安大学进行了飞行试验，获得了世界上第一幅雷达图像。1978 年，美国发射了世界上第一颗搭载合成孔径雷达系统的 SEASAT 卫星，对地球表面 1 亿平方公里的面积进行了测绘，标志着合成孔径雷达成功地进入了空间领域，掀起了合成孔径雷达系统、信号处理以及应用研究的高潮。伴随信号处理、集成电路技术、微波和天线技术的迅速发展，合成孔径雷达成为了当前雷达技术领域的主流发展领域。

本书开始是作为雷达成像技术课程的讲义编写的，在电子科技大学的研究生课程中多次使用，为了适应培养雷达领域高水平研究生的需求，《合成孔径雷达成像原理》列入了电子科技大学研究生院教材规划。

作为研究生教材，全书依据通信与信息系统和信号与信息处理学科研究生培养的需要，遵循培养方案和教学大纲的基本要求，吸收国外同类教材的优秀成果，重点突出，概念清楚，易于学习。既有深入的理论分析，也有浅显的物理概念和基本原理，全书资料完备、深浅适宜、条理清楚。同时该教材还可以推广应用于电路与系统、电磁场与微波技术等学科。

本教材共分八章，包括绪论、脉冲压缩原理、合成孔径原理、成像处理算法、多普勒参数估计、干涉测量、相干斑抑制和目标分类识别。全部内容涵盖整个雷达成像基础领域，同时对雷达成像领域的最新发展状况也有兼顾。本教材的特点是力求具有理论性、实用性、系统性和方向性，密切结合当前研究生教学和雷达工作者的需要，采用有效的新经验、新方法、新体系，特别强调与工程背景和科学研究的紧密结合，有助于学生快速掌握雷达成像的基本理论，达到较高的技术水平，可作为高等学校雷达专业领域的研究生教学用书，也可供雷达技术领域的工程技术人员和科研人员阅读参考。

该教材的出版得到了电子科技大学研究生教材建设基金资助，在编写过程中，得到了电子科技大学研究生院和电子工程学院的大力支持，黄顺吉教授、向敬成教授和张扬副教授给予了关心和指导，刘筱、王海江、王金峰、尹曼、龙跃、庞伶俐、谢艳、费智婷、陈红艳等研究生为教材的写作提供了丰富的素材，并完成了本书的仿真、绘图和校对工作，在此表示

衷心的感谢。

电子科技大学最近几届的研究生们，在听取雷达成像新技术课程的讲授中，曾提出过很多宝贵意见，不断充实和完善了书稿的内容。同时，本书直接或间接地引用了许多专家、学者的文献，从而丰富了本书的内容，作者一并致谢。

本书涉及学科很多，内容十分广泛，加上作者学识有限，写作时间仓促，书中错误和片面之处在所难免，恳请读者批评指正。

编者

2006年8月于成都

电子邮件: ympi@uestc.edu.cn

目 录

第一章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 工作频率	1
1.3 目标定位	2
1.3.1 距离信息获取	3
1.3.2 方位信息获取	3
1.4 多普勒频移	4
1.5 雷达图像	6
1.6 分辨率	8
1.6.1 距离向分辨率	9
1.6.2 方位向分辨率	9
1.6.3 辐射分辨率	10
1.7 相干性	11
1.8 天线	12
1.9 检测	13
1.10 雷达方程	13
1.11 雷达系统组成	15
1.12 小结	16
第二章 脉冲压缩	17
2.1 基本概念	17
2.1.1 脉冲宽度	17
2.1.2 信号带宽	17
2.1.3 单一载频信号的缺陷	18
2.1.4 脉冲压缩	19
2.2 基本原理	20
2.2.1 基本概念	20
2.2.2 LFM 信号的时域特性	21
2.2.3 LFM 信号的频域特性	22
2.2.4 LFM 信号的特点	26
2.2.5 压缩网络	27
2.2.6 匹配滤波器的频域特性	28
2.2.7 匹配滤波器的输出波形	29
2.2.8 距离旁瓣的抑制	30

2.2.9	脉冲压缩如何改进距离分辨率	31
2.2.10	脉冲压缩系统的性能指标	32
2.3	实现方法	33
2.3.1	数字实现的优点	33
2.3.2	数字脉冲压缩处理	33
2.3.3	数字加权	36
2.4	其他脉冲压缩信号	36
2.4.1	NLFM 信号	36
2.4.2	相位编码信号	37
2.5	脉冲压缩体制的特点	37
2.6	脉冲压缩的其他技术	38
2.6.1	去调频	38
2.6.2	步进频率	39
2.6.3	合成带宽	42
2.7	小结	43
第三章	合成孔径雷达	44
3.1	雷达成像特点	44
3.2	成像雷达的种类	44
3.3	合成孔径雷达简介	45
3.3.1	合成孔径雷达的分类	45
3.3.2	合成孔径雷达的极化方式	46
3.3.3	合成孔径雷达的信号接收方式	47
3.3.4	合成孔径雷达的特点	47
3.3.5	合成孔径雷达的应用	47
3.3.6	合成孔径雷达的发展	47
3.3.7	目标的后向散射系数	48
3.4	成像雷达距离向的高分辨率原理	49
3.5	成像雷达	50
3.5.1	实孔径雷达成像	50
3.5.2	多普勒波束锐化	50
3.5.3	合成孔径雷达成像	51
3.5.4	合成孔径雷达的回波信号特性	54
3.5.5	方位向脉冲压缩处理	56
3.5.6	方位向分辨率	57
3.6	合成孔径雷达的理论模型	57
3.7	图像质量评估指标	60
3.7.1	脉冲响应函数	60
3.7.2	峰值旁瓣比和积分旁瓣比	60

3.7.3 合成孔径雷达的分辨特性.....	61
3.7.4 模糊比.....	63
3.7.5 图像动态范围.....	64
3.8 小结.....	65
第四章 成像处理算法.....	66
4.1 引言.....	66
4.2 SAR 回波信号及相关处理.....	67
4.3 基本概念.....	69
4.3.1 距离徙动.....	69
4.3.2 二维处理转换为一维处理.....	73
4.3.3 使用匹配滤波器.....	74
4.3.4 参考函数.....	74
4.3.5 加窗.....	75
4.3.6 聚焦深度.....	76
4.3.7 辐射校正.....	76
4.4 时域相关算法.....	77
4.5 距离多普勒算法.....	78
4.5.1 基本概念.....	78
4.5.2 距离压缩.....	79
4.5.3 距离徙动校正.....	79
4.5.4 方位压缩.....	81
4.5.5 运算量.....	82
4.5.6 RD 算法的特点.....	82
4.6 二次距离压缩算法.....	82
4.7 Chirp Scaling (CS) 算法.....	83
4.7.1 CS 算法原理.....	83
4.7.2 基本概念.....	84
4.7.3 Chirp Scaling 处理.....	84
4.7.4 距离压缩.....	87
4.7.5 方位压缩.....	88
4.7.6 CS 算法的特点.....	89
4.8 波数域算法.....	89
4.9 SPECAN 算法.....	91
4.10 成像处理算法的优化.....	93
4.10.1 预置方位向滤波器.....	93
4.10.2 加窗.....	94
4.11 小结.....	95

第五章 多普勒参数估计.....	96
5.1 引言.....	96
5.2 相位误差.....	97
5.2.1 相位误差的产生.....	97
5.2.2 相位误差的影响.....	98
5.2.3 相位误差的消除.....	100
5.3 多普勒质心估计.....	101
5.3.1 方位谱峰值法.....	102
5.3.2 杂波锁定法.....	103
5.3.3 能差逼近法.....	106
5.3.4 时域估计法.....	107
5.3.5 相关多普勒估计法.....	108
5.3.6 符号-多普勒估计法.....	109
5.3.7 多普勒中心频率模糊问题.....	110
5.4 自聚焦算法.....	111
5.4.1 基本概念.....	111
5.4.2 子视图相关法.....	112
5.4.3 相位梯度自聚焦算法.....	115
5.4.4 对比度最优自聚焦算法.....	120
5.4.5 提高自聚焦算法稳健性的措施.....	123
5.4.6 三种算法的比较.....	123
5.4.7 自聚焦算法的局限性.....	126
5.5 小结.....	127
第六章 干涉测量.....	128
6.1 引言.....	128
6.2 SAR 干涉测量理论.....	128
6.2.1 InSAR(Interferometric SAR)三维成像基本原理.....	129
6.2.2 InSAR 工作模式.....	130
6.2.3 InSAR 系统相干性能分析.....	131
6.3 InSAR 三维成像技术数据处理流程.....	133
6.3.1 距离向、方位向滤波.....	133
6.3.2 图像配准.....	133
6.3.3 干涉图的生成.....	134
6.3.4 平地效应的去除.....	134
6.3.5 相位滤波.....	134
6.3.6 相位解模糊.....	134
6.3.7 DEM 的生成.....	134

6.4	干涉图像对的预滤波	135
6.4.1	方位向预滤波	135
6.4.2	距离向预滤波	136
6.5	复图像配准	137
6.5.1	粗配准	138
6.5.2	精配准	140
6.5.3	干涉图质量评估	141
6.5.4	复图像配准算法	142
6.5.5	干涉图的生成	144
6.6	平地效应	145
6.6.1	平地效应产生的原理	146
6.6.2	常用去平地效应的方法	146
6.7	相位解模糊	147
6.7.1	最小二乘算法	149
6.7.2	Green 恒等式相位解模糊技术	151
6.7.3	全局积分相位解模糊技术	152
6.8	DEM 生成	154
6.9	小结	155
第七章	相干斑抑制	156
7.1	引言	156
7.2	相干斑的统计特性	156
7.2.1	相干斑产生机理	156
7.2.2	SAR 图像统计特性	158
7.2.3	瑞利相干斑模型	159
7.2.4	多视相干斑模型	160
7.2.5	空域相干斑噪声模型	161
7.3	相干斑抑制方法	161
7.3.1	多视处理	162
7.3.2	空域的相干斑抑制方法	164
7.3.3	小波域的相干斑抑制方法	170
7.3.4	基于各向异性扩散的斑点抑制技术	171
7.4	相干斑抑制技术的性能评估	172
7.4.1	相干斑抑制能力	172
7.4.2	线条和特征点的保持	173
7.4.3	边缘锐度的保持性	173
7.4.4	均匀区域的均值保持	174
7.4.5	相干斑抑制	174
7.4.6	点、线和边缘的保持	174

7.4.7 纹理信息的保持.....	174
7.5 小结.....	175
第八章 目标分类和识别.....	176
8.1 SAR 图像数据介绍.....	176
8.1.1 原始数据.....	176
8.1.2 单视复数据.....	176
8.1.3 多视幅度数据.....	177
8.1.4 衍生产品.....	178
8.1.5 极化数据.....	178
8.2 SAR 自动目标检测和识别简介.....	179
8.2.1 SAR ATR 研究现状.....	180
8.2.2 MSTAR 简介.....	182
8.3 目标分类和识别简介.....	182
8.3.1 综述.....	182
8.3.2 预处理.....	183
8.4 目标检测.....	183
8.4.1 恒虚警检测.....	184
8.4.2 多分辨率检测.....	187
8.4.3 利用相位和极化信息的检测.....	188
8.5 目标识别.....	190
8.5.1 目标特征提取及选择简介.....	190
8.5.2 目标特征分类.....	191
8.6 特征提取方法.....	192
8.6.1 目标峰值特征提取和增强.....	192
8.6.2 目标散射中心特征提取.....	195
8.7 分类器.....	197
8.7.1 神经网络.....	198
8.7.2 支持向量机(SVM).....	200
8.8 基于模式识别的分类方法.....	205
8.8.1 常用分类方法.....	205
8.8.2 其他分类新技术.....	209
8.8.3 分类效果评估.....	211
8.9 SAR ATR 的研究展望.....	211
8.10 小结.....	212
参考文献.....	213

表 1.1 常用成像雷达频段

频段代号	频率范围/Hz	波长范围/cm	典型应用
X	8~12 GHz	2.5~3.75	成像雷达
C	4~8 GHz	3.75~7.5	成像雷达
S	2~4 GHz	7.5~15	成像雷达
L	1~2 GHz	15~30	成像雷达
P	0.3~1 GHz	30~100	成像雷达

1.1 引言

众所周知, 雷达(Radio Detection and Ranging, Radar)是无线电检测和测距的英文缩写。这也表明了雷达最初的目的和任务: 检测、发现目标并测量目标的距离。伴随着电子技术的进步, 雷达的功能也在迅速扩展。现在, 雷达的信息获取已经从一维的距离扩展到了三维的距离、方位和高度, 从静止目标扩展到了运动目标及其速度, 从普通的目标检测扩展到了目标的形状、大小和图像信息的获取。

在美国电气电子工程学会(IEEE)的标准中, 雷达的最新定义是^[1]: 通过发射电磁波信号, 接收覆盖范围内的目标回波, 从回波中提取位置和其他信息, 实现目标检测和定位的电磁系统。

雷达是现代科学飞速发展的一大成就, 它不但在军事方面获得了广泛应用, 民用方面也具有广阔的市场。合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)集中体现了雷达技术的进步, 它的出现扩展了原始的雷达概念, 使雷达具有了对目标进行成像和识别的能力。SAR 是一种获得高分辨率图像的雷达模式, 利用雷达载机的运动来模拟大孔径天线, 突出特点是具有很高的方位分辨率。

SAR 利用微波遥感技术, 不受气候和昼夜影响, 能够全天候、全天时工作, 并具有多极化、视角可变、有穿透性等特点。目前, SAR 已广泛应用于军事侦察、地质普查、地形测绘和制图、灾情预报、海洋应用、科学研究等领域, 具有广阔的研究和应用前景。

本章作为本书的绪论, 简单介绍雷达的基本知识, 作为理解 SAR 的基础。首先介绍雷达的工作频率, 以及目标的定位和速度信息的获取, 然后介绍雷达图像以及分辨率, 并简单阐述雷达系统的相干性和天线, 最后介绍雷达方程以及雷达系统组成。

1.2 工作频率

雷达的工作频率指雷达发射机的射频振荡频率。信号频率 $f(\text{Hz})$ 与波长 $\lambda(\text{m})$ 的关系为:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1-1)$$

式中, c 是电磁波传播速度, 近似为光速 ($3 \times 10^8 \text{ m/s}$)。雷达通过辐射一定频率的电磁波, 利用目标散射的回波来实现对目标的探测和定位。它属于遥感技术的范畴, 工作波长通常在 $0.5 \sim 75 \text{ cm}$ 之间, 频率分布为 $400 \text{ MHz} \sim 60 \text{ GHz}$ 。其中成像雷达常用的频段如表 1.1 所示。

这些频段代号(X、C 等)是沿用二战中一些国家为保密而采用的频段名称。用途中所列举的均为各国的成像雷达。

表 1.1 成像雷达的常用频段

频段名称	频率范围	波长	用途
X	8~12.5GHz	2.4~3.75cm	军事侦察, 地形测量等, 如加拿大的 CV-580 SAR
C	4~8GHz	3.75~7.5cm	星载 SAR, 如 ERS-1 和 RADARSAT
S	2~4GHz	7.5~15cm	前苏联的 ALMAZ
L	1~2GHz	15~30cm	SEASAT 和 JERS-1
P	0.3~1GHz	30~100cm	NASA/JRS AIRSAR

雷达的工作频段不同, 用途就不同。一般来说, 频率低的信号具有较大的波长, 能够穿透许多物体, 如厚厚的云层; 频率高的信号波长较短, 能够实现精细观察, 可用于对物体的细致区分, 或对局部地区进行高分辨率成像。

如何选择雷达的工作频段呢? 这里主要考虑雷达的用途。如要绘制大范围的地图, 我们选用 L 波段; 要区分出建筑物, 则要选择 X 波段; 要穿透植被, 就要选用波长较长的 P 波段。

此外, 频段的选择还应考虑到系统设计的因素, 如发射机的功率、天线尺寸以及抗干扰性能等。一般来说, 用来产生和发射信号的硬件尺寸与波长成正比。低频信号需要大的天线, 高频信号要求的天线尺寸则很小。波长的选择还影响到雷达发射大功率的能力。如米波范围内的雷达可以发射兆瓦级的平均功率, 毫米波的雷达则一般只能发射几百瓦的平均功率。因此对微波雷达来说, 发射大功率的高频信号对硬件的要求很高。

值得注意的是, 许多 SAR 会同时使用几个频段, 如上面所列举的 JRS AIRSAR。

1.3 目标定位

雷达系统中, 通常在球坐标系下对目标进行定位, 参数为 R (距离)、 θ (方位角)和 β (俯仰角)。

距离 R 指目标与雷达间的直线距离, 方位角 θ 指目标在本地水平面上的垂直投影与雷达间的连线与某一参考线(如正北方向)的夹角, 俯仰角 β 指目标与雷达的连线与本地水平面的夹角。

本地水平面通常是指通过天线辐射中心, 并与通过该点的地球半径垂直的平面。

目标的位置参数如图 1.1 所示。图中 x 轴和 y 轴组成的平面就是本地水平面。

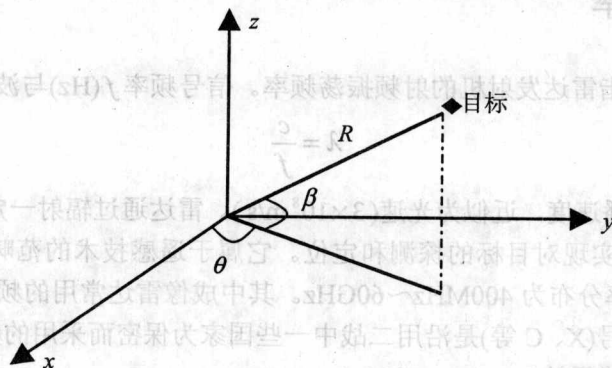


图 1.1 目标的位置参数

1.3.1 距离信息获取

雷达对目标距离的测量通常是通过检测发射信号与接收信号的时延来实现的。时延可以是从小发射脉冲的中心到回波信号的中心(中心测距),也可以是从发射信号的上升沿到回波信号的上升沿(上升沿测距),如图 1.2 所示。

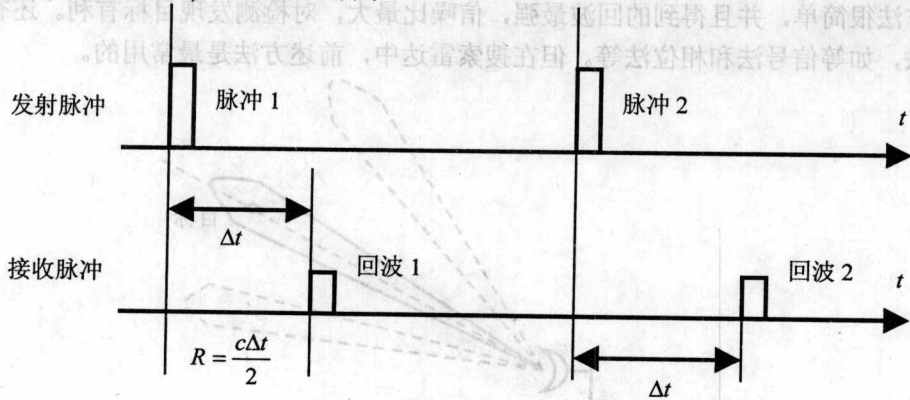


图 1.2 雷达回波时延示意图

从图 1.2 看,由于大气吸收和散射等因素,回波信号的强度比发射信号小。计算目标距离的公式为:

$$R = \frac{c\Delta t}{2} \quad (1-2)$$

式中, Δt 表示电磁波往返传播时间(s), c 表示电磁波传播速度(近似为光速, 3×10^8 m/s)。雷达测距基于以下两点: (1)电磁波的直线传播; (2)电磁波传播速度恒定。

在现代雷达系统中,通常采用数字化处理,因此数据是量化的。在这里我们提出了距离门的概念(也称为距离单元),将目标的距离值离散化。采用数字化处理的雷达仅能给出目标距离的离散值。

距离门的大小反映了雷达测距的精确度。如果距离门的大小是 100m,而目标的实际位置是 321.7m,则最终雷达测距的结果将是一个经过量化的值——300m。

通常将雷达测距的最大范围划分为若干个距离门,根据目标的回波信号落入的距离门判断它的距离。

测距、测角的精确度很容易与分辨率混淆,但它们是完全不同的概念。本章后面将讨论分辨率,它是检测多重目标的能力。而精确度是指数据变化的最小值,如上面测距的例子,测距精确度就是 100m。

实际上,在进行数字化处理的雷达系统中,所有维(距离、方位角、俯仰角和多普勒频移)的数据都是离散值形式,而不是连续值。离散值通常采用二进制来表示。

1.3.2 方位信息获取

方位信息即目标相对于雷达的偏角——方位角和俯仰角(如图 1.1 所示)。它们均指目标位置与相应的参考方向之间的夹角。知道目标的距离和方位,就能对目标进行精确定位。

测角的物理基础是电磁波的直线传播特性。由于大气的密度和湿度不均匀以及复杂的地形地物等因素,电磁波传播途径会发生偏折,造成测角误差。但一般情况下,尤其是近距离

测角时，我们认为电磁波是直线传播的。

测角利用了天线的方向性，通常利用天线波束的扫描来测定目标的方位。波束具有一定宽度，天线辐射的能量集中在这个宽度内。波束在一定的角度范围内扫描，利用回波强弱判断目标位置。在回波最强的时刻，波束轴线所指方向即为目标所在方向(如图 1.3 所示)。这种测角的方法很简单，并且得到的回波最强，信噪比最大，对检测发现目标有利。还有其他的测角方法，如等信号法和相位法等。但在搜索雷达中，前述方法是最常用的。

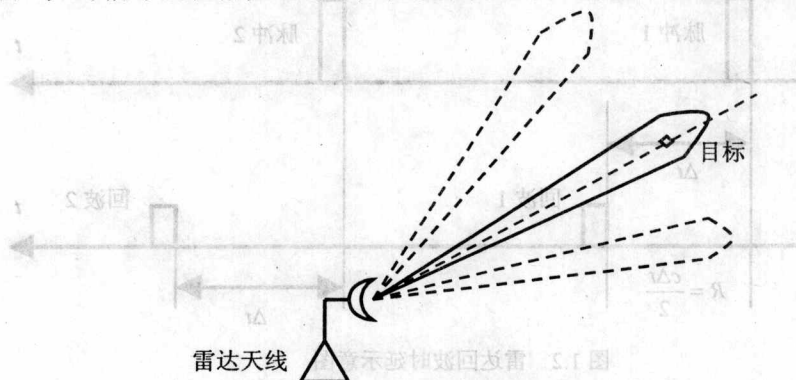


图 1.3 雷达波束扫描示意图

1.4 多普勒频移

目标的速度信息在军事上具有重要地位，它是通过检测多普勒频移得到的。多普勒频移是回波信号相对于发射信号的频移，它由目标和雷达之间的相对运动引起。

物体间的相对运动会引起信号频率的变化，这种现象称为多普勒效应。一个常见的例子就是火车。站在铁路旁，当火车从远方驶来时，汽笛声高亢响亮；掠身而过后，其音调变得低沉。因为火车靠近时，我们听到的汽笛音调高于真实的音调；而当火车离开时，汽笛音调低于真实的音调。即物体间存在相对的径向速度时，目标回波相对于发射信号有频率上的变化，如图 1.4 所示。

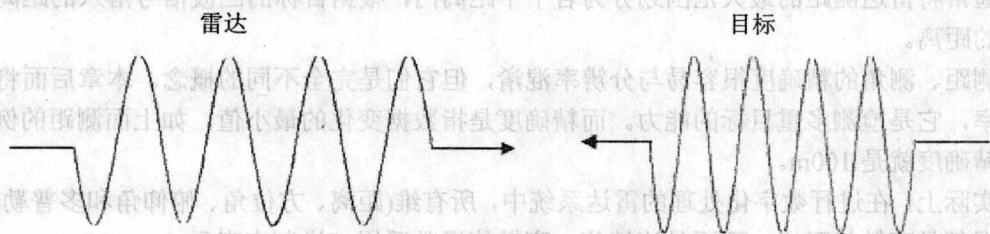


图 1.4 多普勒频移示意图

多普勒频移既可用于测量目标的速度，也可用于识别同时出现但速度不同的几个目标。后一种用法是从杂波中识别出运动目标的主要方法。

下面给出关于多普勒频移的相应关系式。根据多普勒频移的定义，它是发射信号和接收信号的频率差。飞向雷达的目标产生正的多普勒频移，飞离雷达的目标产生负的多普勒频移。

$$f_d \equiv f_R - f_T \text{ (Hz)} \quad (1-3)$$

式中， f_d 表示多普勒频移， f_R 表示目标回波的频率(Hz)， f_T 表示发射信号的频率(Hz)。

多普勒频移的表达式为：

$$f_d = \frac{2v}{\lambda} \quad (1-4)$$

式中， λ 为信号波长(m)， v 为雷达与目标间的相对径向速度(m/s)。这是一个近似的表达式，适用于目标相对于雷达的径向速度远小于电磁波传播速度的情况。实际情况往往如此，因此通常利用式(1-4)来计算目标的径向速度。

多普勒效应

多普勒效应是由奥地利数学家多普勒首先发现和提出的，它反映了信号频率与运动速度之间的关系。值得注意的是，这里的速度指相对的径向速度，即运动速度沿二者直线方向的分量，如图 1.5 所示。

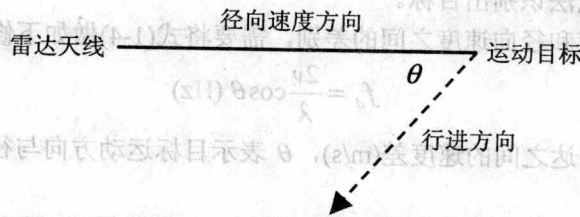


图 1.5 径向速度分量示意图

下面对多普勒频移的表达式(1-3)作一个简单的推导。

雷达发射一段正弦波，起始点为 A，终止点为 B，在空间延伸的长度为 D，频率为 f_0 。目标以径向速度 v_r 向着雷达飞行(远离雷达飞行时速度为负数，原理相同)，如图 1.6 所示。

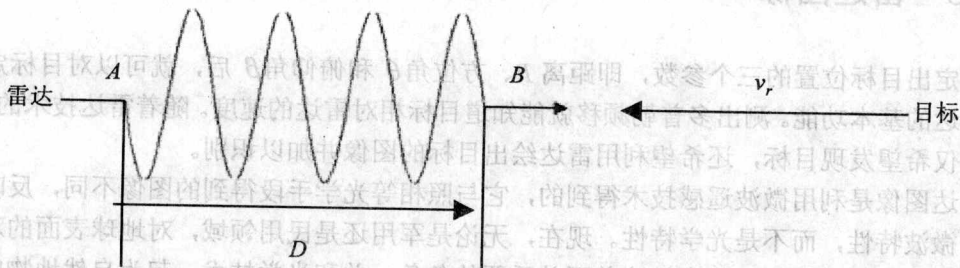


图 1.6 多普勒频移推导示意图

由于目标向雷达运动，B点接触目标后，到A点接触目标，所需的时间 Δt 为：

$$\Delta t = \frac{D}{c + v_r} \text{ (s)} \quad (1-5)$$

当 A 点接触目标时，B 点相对于目标的距离就是反射后正弦波的长度 D' ，其计算式为：

$$D' = (c - v_r) \cdot \Delta t = \frac{c - v_r}{c + v_r} D \quad (1-6)$$

其中 $c-v_r$ 表示 B 点反射后电磁波相对目标的速度。

反射后的正弦波长度小于反射前的长度，但波的个数是不变的。设反射后的频率为 f'_0 ，则有：

$$\frac{f'_0}{f_0} = \frac{D}{D'} = \frac{c+v_r}{c-v_r} = 1 + \frac{2v_r}{c-v_r} \approx 1 + \frac{2v_r}{c} \quad (1-7)$$

上式成立的条件是电磁波传播速度远大于目标运动速度，实际情况通常如此。则多普勒频移 f_d 为：

$$f_d = f'_0 - f_0 = f_0 \cdot \frac{2v_r}{c} = \frac{2v_r}{\lambda} \quad (1-8)$$

即为式(1-4)。

只有速度的径向分量对多普勒频移有影响。对于一个固定雷达，当目标沿雷达天线轴的切线方向运动时，回波信号中不存在多普勒频移。因此，在多普勒频移很小或没有多普勒频移的区域，就不能从杂波中识别出运动目标。同样，当雷达移动时，杂波和目标回波都有多普勒频移。在目标速度大致上垂直于雷达天线主轴的区域，目标的多普勒频移与杂波的多普勒频移几乎相同，也无法识别出目标。

为了说明目标速度和径向速度之间的差别，需要将式(1-4)做如下修正：

$$f_d = \frac{2v}{\lambda} \cos\theta \text{ (Hz)} \quad (1-9)$$

式中， v 表示目标和雷达之间的速度差(m/s)， θ 表示目标运动方向与径向方向的夹角，如图 1.5 所示。

实际上，大气层内目标的多普勒频移通常很小，接收信号的频率与发射信号几乎相同。因此，为了测出多普勒频移，我们不能只观察单个回波脉冲，而必须观察多个连续的回波脉冲，并检测它们之间的相位变化。

1.5 雷达图像

测定出目标位置的三个参数，即距离 R 、方位角 θ 和俯仰角 β 后，就可以对目标定位，这是雷达的基本功能。测出多普勒频移就能知道目标相对雷达的速度。随着雷达技术的发展，我们不仅希望发现目标，还希望利用雷达绘出目标的图像并加以识别。

雷达图像是利用微波遥感技术得到的，它与照相等光学手段得到的图像不同，反映的是目标的微波特性，而不是光学特性。现在，无论是军用还是民用领域，对地球表面的观测活动日益频繁。雷达成像在其中扮演着至关重要的角色，并和光学技术一起为自然地物的识别做出了贡献。

雷达图像依据回波信号的强弱形成，强弱程度决定了图像的灰度。某区域的回波信号强，反映在图像上，其对应位置的灰度就高；回波信号弱，灰度就低。

对成像目标来说，其各部分的散射能量是不同的。普通雷达的分辨单元很大，因此接收机及其信号处理的输出获得的是各部分散射能量的总和，没有区分开来，我们在雷达屏幕上看到的仅仅是一个尖脉冲或一个亮点。如果雷达给出很小的分辨单元(远小于成像目标尺寸)，就能区分各部分的散射能量，得到雷达图像。因此，对成像雷达而言，关键问题是如何提高



分辨率。本书讨论的合成孔径雷达就利用了脉冲压缩技术和雷达与目标间的相对运动,来获得距离向和方位向的高分辨率。

回波信号的强度与哪些因素有关呢?发射信号的功率和目标的特性是两个重要因素。前者是显而易见的,后者我们举例说明。例如,在同样距离处有两个物体,一个为球状,另一个为平板,其平面垂直于来波方向。到达两物体处的信号功率相同,球状物体将信号散射向各个方向,平板则几乎将所有能量都向雷达方向反射回去(如图 1.7 所示)。因此,雷达接收的二者回波信号强度有很大区别。

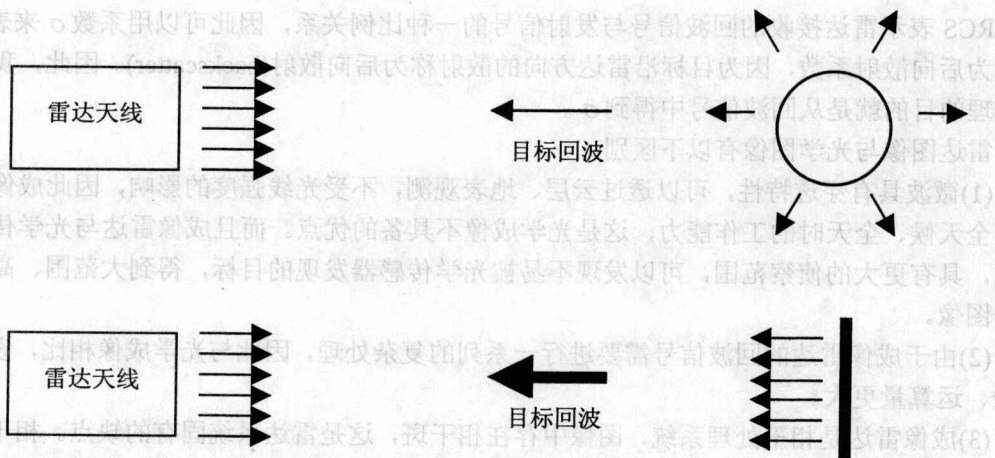


图 1.7 目标反射示意图

我们用雷达横截面积(Radar Cross-Section, RCS, 也称雷达散射面积)来描述目标的这个特性。目标散射功率表示为:

$$P = p \cdot \text{RCS} = \frac{P_T}{4\pi R^2} \cdot \text{RCS} \quad (\text{W}) \quad (1-10)$$

式中 p 表示目标处的发射功率密度, P_T 表示雷达发射功率。忽略目标对信号的吸收,认为散射功率密度与发射功率密度相等。

雷达接收的信号功率为:

$$P_R = \frac{P}{4\pi R^2} \cdot A_e = \text{RCS} \cdot \frac{P}{4\pi R^2} \cdot A_e \quad (\text{W}) \quad (1-11)$$

式中 A_e 表示天线的有效孔径面积。成像目标的尺寸往往远小于距离 R , 故可以认为目标各部分与雷达间的距离相等, 即目标的回波强度仅与 RCS 有关。

因此, 得到目标各部分的 RCS, 就能对目标成像。RCS 不是视觉上物体的面积, 它是物体微波特性的一种描述, 其定义为雷达接收的目标回波功率与发射功率密度之比, 表达式为:

$$\text{RCS} = \frac{P}{p} = \frac{P}{P_T} \cdot 4\pi R^2 \quad (1-12)$$

从式(1-10)可以看出, RCS 相当于目标在垂直与电磁波传播方向上的等效面积, 如图 1.8 所示。