

电子科技大学研究生系列教材建设项目

合成孔径雷达成像原理

皮亦鸣 杨建宇 付毓生 杨晓波 主编

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



.....	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
.....	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
.....	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
.....	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



.....	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
.....	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
	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
.....	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
.....	213



第一章 绪 论

1.1 引言

(Radio Detection and Ranging Radar)

(IEEE)

[1]

(Synthetic Aperture Radar SAR)

SAR

SAR

SAR

SAR

1.2 工作频率

$f(\text{Hz})$

$\lambda(\text{m})$

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

(1-1)

c

$(3 \times 10^8 \text{ m/s})$

0.5 75cm

400MHz 60GHz

1.1

(X C)



表 1.1 成像雷达的常用频段

X	8 12.5GHz	2.4 3.75cm	CV-580 SAR
C	4 8GHz	3.75 7.5cm	SAR ERS-1 RADARSAT
S	2 4GHz	7.5 15cm	ALMAZ
L	1 2GHz	15 30cm	SEASAT JERS-1
P	0.3 1GHz	30 100cm	NASA/JRS AIRSAR

L X P

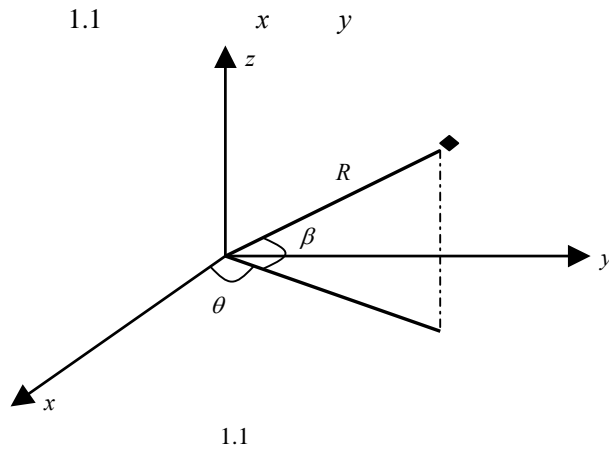
SAR JRS AIRSAR

1.3 目标定位

$R(\quad) \theta(\quad) \beta(\quad)$

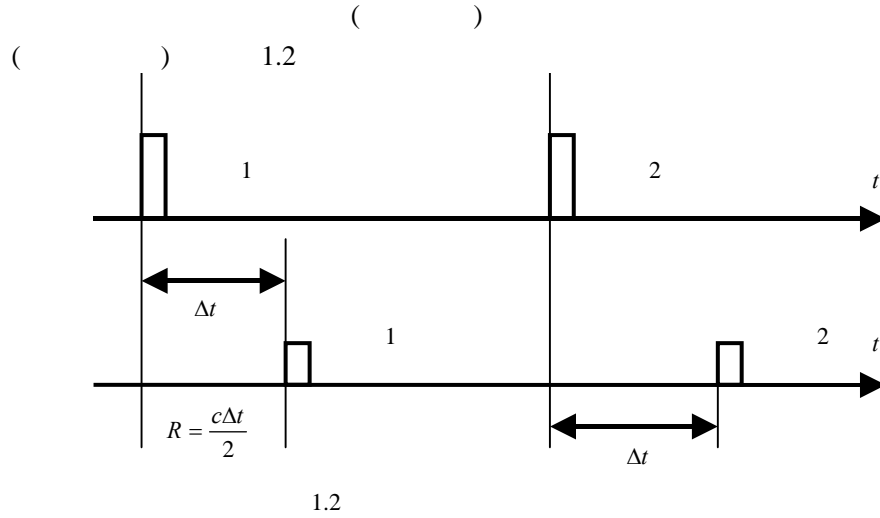
) R θ β

()





1.3.1 距离信息获取



1.2

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

Δt (s) c (3×10^8 m/s)

()

321.7m 100m
——300m

100m

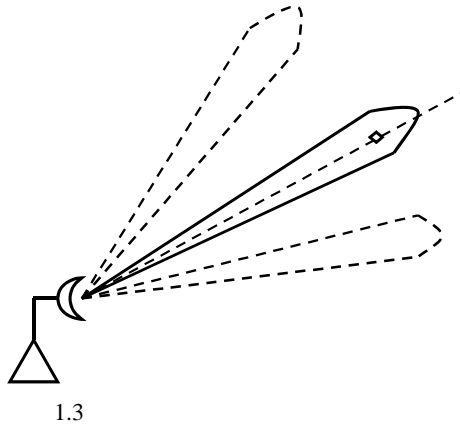
()

1.3.2 方位信息获取

—— (1.1)

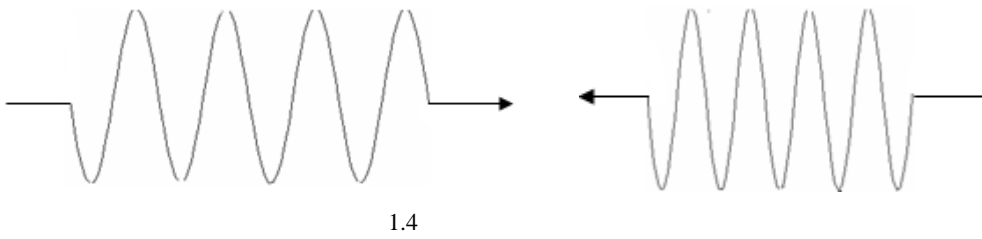


(1.3)



1.4 多普勒频移

1.4





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

f_d f_R (Hz) f_T (Hz)

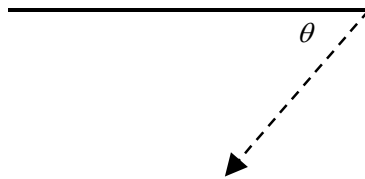
$$f_d = \frac{2v}{\lambda} \quad (1-4)$$

λ (m) v (m/s)

(1-4)

多普勒效应

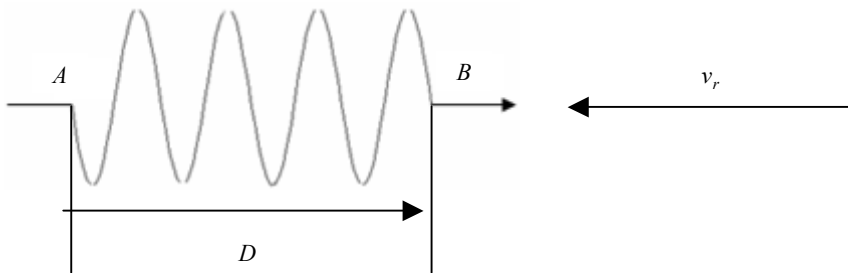
多普勒效应是由奥地利数学家多普勒首先发现和提出的，它反映了信号频率与运动速度之间的关系。值得注意的是，这里的速度指相对的径向速度，即运动速度沿二者直线方向的分量，如图 1.5 所示。



1.5

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。



1.6

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，实际情况种通常如此。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)。

(1-4)

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

v

(m/s) θ

1.5

1.5 雷达图像

R θ β

()

