



High Resolution Microwave Imaging

高分辨率 微波成像

杨汝良 等著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

国家科学技术学术著作出版基金资助

高分辨率微波成像

HIGH RESOLUTION
MICROWAVE IMAGING

杨汝良 李海英 李世强
张平 谈璐璐 高祥武 康雪艳 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

高分辨率微波成像/杨汝良等著. —北京:国防工业出版社, 2013. 11

ISBN 978 - 7 - 118 - 08606 - 5

I. ①高... II. ①杨... III. ①高分辨率 - 微波成像 IV. ①0435.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 217410 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)

三河市腾飞印务有限公司印刷

新华书店经售



*

开本 787 × 1092 1/16 印张 26½ 字数 581 千字

2013 年 11 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 108.00 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

此书同时获得

总装备部国防科技图书出版基金资助

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第七届评审委员会组成人员

主任委员 王 峰

副主任委员 吴有生 蔡 镭 杨崇新

秘 书 长 杨崇新

副 秘 书 长 邢海鹰 贺 明

委 员 才鸿年 马伟明 王小谟 王群书
(按姓氏笔画排序)

甘茂治 甘晓华 卢秉恒 巩水利

刘泽金 孙秀冬 陆 军 芮筱亭

李言荣 李德仁 李德毅 杨 伟

肖志力 吴宏鑫 张文栋 张信威

陈良惠 房建成 赵万生 赵凤起

郭云飞 唐志共 陶西平 韩祖南

傅惠民 魏炳波

前 言

高分辨率微波成像雷达技术是当今高分辨率对地观测系统技术的重点研究课题之一。

合成孔径雷达是一种高分辨率微波成像雷达。它可以全天候、全天时对地面静止目标和运动目标进行成像,可以穿透天然植被、人工伪装,发现重要军事目标。以星载合成孔径雷达为代表的微波成像对地观测卫星技术,已成为对地观测的重要手段,受到各国的广泛重视,在灾害监测、资源调查、军事侦察、测绘、打击效果侦察以及海洋研究等领域显示出广泛的应用价值和巨大的潜力。强烈的军用和民用需求推动了合成孔径雷达的迅猛发展,很多国家都在争相发展高分辨率微波成像雷达技术。各种机载的、星载的、航天飞机和空间站微波成像雷达,正分别用于不同的军用和民用探测目的。

随着合成孔径雷达成像技术的广泛应用,高分辨率合成孔径雷达仍然是国际微波遥感领域的研究热点之一。

高分辨率微波成像包含高的距离向分辨率成像和高的方位向分辨率成像。

提高距离向分辨率,需要具有大频带宽度的发射信号,信号带宽越宽,分辨率越高。高距离向分辨率的信号形式主要有脉冲冲击波形、线性调频波形、频率步进波形、脉内调频脉冲串波形和线性调频连续波波形等。

提高方位向分辨率,本质上是利用增加合成孔径长度,即增加方位向多普勒带宽来获得。聚束式合成孔径雷达通过长时间照射地面一小块固定的区域,可以获得比条带式合成孔径雷达更长的合成孔径长度,从而获得更高的方位向分辨率。

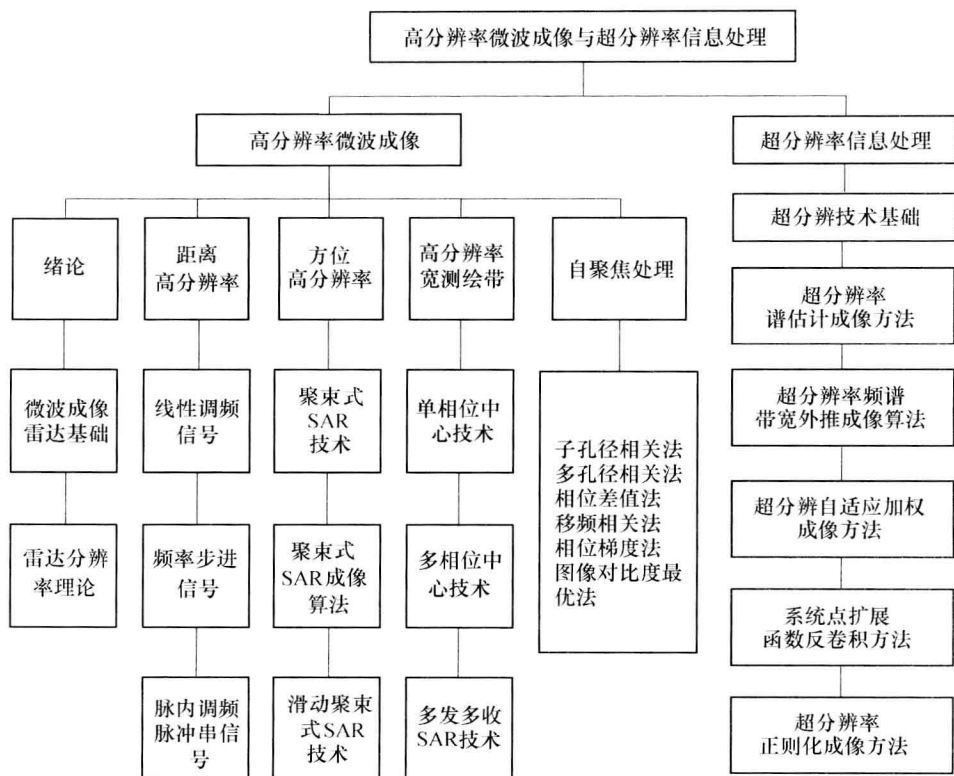
星载合成孔径雷达系统设计中的一个基本限制是测绘带宽和分辨率之间的矛盾,单相位中心多波束技术、多相位中心多波束技术和多发多收孔径技术可以得到宽测绘带和高分辨率的微波成像。

近十几年来,超分辨率信息处理技术在微波成像雷达技术中得到蓬勃发展。合成孔径雷达超分辨率信息处理技术采用超分辨率成像算法,即利用现代谱估计代替傅里叶变换、外推有效频谱利用自适应加权和正则化等超分辨率成像算法处理合成孔径雷达数据,在不增加信号频带宽度和合成孔径长度的前提下,突破傅里叶成像算法的性能限制,提高成像分辨率及雷达图像质量。

本书分为高分辨率微波成像和超分辨率信息处理两部分,全书共 17 章,结构安排见下表。

高分辨率微波成像技术包括微波成像雷达基础、雷达分辨率理论、线性调频信号、频率步进信号和脉内调频脉冲串信号合成孔径雷达成像、聚束式合成孔径雷达、聚束式合成孔径雷达成像算法、滑动聚束式合成孔径雷达、单相位中心多波束合成孔径雷达、多相位中心多波束合成孔径雷达、多发多收合成孔径雷达、合成孔径雷达自聚焦算法等内容。

超分辨率信息处理介绍了超分辨率处理的技术基础和微波成像超分辨率处理技术,



高分辨率微波成像一书结构安排表

讨论了经典傅里叶谱分析和超分辨率处理信号模型。系统地研究了微波成像超分辨率处理技术,包括:利用系统点扩展函数的反卷积方法;超分辨率谱估计方法(含最小方差谱估计方法、幅度相位谱估计方法、子空间正交分解方法、基于旋转不变技术的信号参数估计方法、松弛类谱估计方法、最大似然估计法、自回归谱估计方法);超分辨率频谱带宽外推成像方法(包括合成孔径雷达自回归线性预测外推超分辨率成像算法、最小范数加权外推超分辨率成像方法);自适应加权旁瓣抑制方法(含空间变迹法、自适应旁瓣抑制方法);超分辨率正则化成像方法(含 Tikhonov 正则化、非二次正则化、总变差方法等合成孔径雷达超分辨率正则化方法)。

近年来,我们组织了一批博士和硕士,较系统、深入地研究了高分辨率微波成像和超分辨率信息处理技术。本书是这批博士和硕士学位论文的研究总结。本书试图较系统地论述高分辨率微波成像雷达系统和超分辨率信息处理技术,理论联系实际,尽可能地反映近年来这一领域的新理论、新方法和新成果。

本书由杨汝良策划和设计,下列博士执笔:李海英(第2章、第3章、第4章、第5章、第6章),高祥武(第7章、第9章),谈璐璐(第7章、第8章、第9章),李世强(第10章、第11章、第12章),康雪艳(第13章),张平(第14章、第15章、第16章、第17章),冯帆(第12章),宋岳鹏(第12章),王沛(第4章)和田旭文(第13章、第15章),全书由杨汝良统稿和定稿。

本书较系统深入地研究了高分辨率微波成像和超分辨率信息处理技术,可供电子系

统特别是微波遥感、微波成像雷达的研究人员、工程技术人员使用,亦可作为高等院校通信与信息系统、电子技术、计算机应用等专业的教师和研究生进行相关课题研究的参考书。

北京航空航天大学毛士艺教授、清华大学彭应宁教授和杨健教授等对本书提出了宝贵的意见,在此谨表诚挚的谢意。

高分辨率微波成像和超分辨率信息处理是一项正在迅速发展的技术,由于作者的能力和知识面有限,疏漏、不当和错误之处,恳请读者批评指正。

杨汝良

2012年8月1日

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 合成孔径雷达的发展	1
1.2 距离向高分辨率微波成像	4
1.3 聚束式合成孔径雷达和方位自动聚焦	5
1.4 高分辨率宽测绘带合成孔径雷达	7
1.5 微波成像超分辨率信息处理技术	9
1.6 本书的结构安排	13
参考文献	15
第 2 章 微波成像雷达基础	18
2.1 线性调频信号脉冲压缩	18
2.2 合成孔径雷达成像原理	19
2.3 合成孔径雷达的理论模型	23
2.4 脉冲压缩和合成孔径处理	26
2.5 合成孔径雷达的聚焦深度与距离徙动	27
2.6 合成孔径雷达的主要技术参数	29
2.6.1 空间分辨率	29
2.6.2 峰值旁瓣比与积分旁瓣比	31
2.6.3 成像带宽	33
2.6.4 系统灵敏度(噪声等效后向散射系数)	33
2.6.5 模糊比	34
2.6.6 动态范围	37
2.7 合成孔径雷达的天线面积限制与系统品质因数	39
2.7.1 天线最小面积限制	40
2.7.2 星载合成孔径雷达系统的品质因数	41
参考文献	43
第 3 章 雷达分辨率理论	45
3.1 雷达信号的最优检测	45
3.2 雷达回波信号的数学模型	46
3.2.1 径向速度引起的多普勒效应	46
3.2.2 径向速度对距离时间延迟的影响	47
3.3 模糊函数	48
3.3.1 距离模糊函数与距离分辨率	49

3.3.2 速度模糊函数与多普勒分辨率	51
3.4 合成孔径雷达分辨理论	52
3.5 波形分类与波形设计原则	53
3.5.1 波形分类	53
3.5.2 波形设计原则	53
参考文献	55
第4章 线性调频脉冲信号	56
4.1 线性调频脉冲信号	56
4.1.1 线性调频脉冲信号的频谱	56
4.1.2 线性调频信号的模糊函数	58
4.1.3 线性调频信号的脉压特性及加权处理	62
4.2 线性调频信号的误差分析	64
4.2.1 相位误差分析	64
4.2.2 幅度误差分析	68
4.2.3 正交调制及解调误差分析	69
4.3 线性调频连续波合成孔径雷达	74
4.3.1 调频连续波信号	75
4.3.2 调频连续波合成孔径雷达信号分析	75
4.3.3 线性调频连续波合成孔径雷达的成像流程	78
参考文献	79
第5章 频率步进信号及其合成孔径雷达成像	80
5.1 频率步进信号合成宽带信号的时域频域特性	80
5.2 频率步进信号的模糊函数	82
5.2.1 频率步进信号的模糊函数与分辨性能	82
5.2.2 中心模糊区域的模糊函数	85
5.3 频率步进信号的高距离分辨率原理	87
5.3.1 IFFT 变换获得一维距离像原理	87
5.3.2 频率步进信号的距离分辨率	88
5.4 径向速度对频率步进雷达目标距离像的影响及补偿	91
5.4.1 径向速度对频率步进雷达目标距离像的影响	91
5.4.2 频率步进雷达目标速度估计与速度补偿	97
5.5 频率步进信号合成孔径雷达	99
5.5.1 频率步进信号照射下合成孔径雷达成像原理	99
5.5.2 频率步进合成孔径雷达及波形参数设计	102
5.5.3 模拟仿真	105
参考文献	107
第6章 脉内调频脉冲串信号及其合成孔径雷达成像	109
6.1 脉内调频脉冲串相参合成宽带信号原理	109
6.1.1 宽带信号的时域与频域特性	109

6.1.2	脉内调频脉冲串的时域与频域特性	110
6.1.3	仿真实验	114
6.2	脉内调频脉冲串信号的模糊函数	115
6.2.1	脉内调频脉冲串的模糊函数与分辨性能分析	115
6.2.2	中心模糊区域的模糊函数	117
6.3	径向速度对脉内调频子脉冲串合成距离像的影响与补偿	120
6.3.1	径向速度对脉内调频子脉冲串合成距离像的影响	120
6.3.2	脉内调频子脉冲串雷达的径向速度补偿	123
6.4	脉内调频脉冲串合成孔径雷达系统与成像	125
6.4.1	脉内调频脉冲串合成孔径雷达系统	125
6.4.2	脉内调频脉冲串波形照射下合成孔径雷达成像	128
6.4.3	模拟仿真	129
	参考文献	132
第7章	聚束式合成孔径雷达技术	134
7.1	聚束式合成孔径雷达原理	135
7.2	聚束式合成孔径雷达的参数分析	138
7.2.1	聚束式合成孔径雷达的方位分辨率	138
7.2.2	聚束式合成孔径雷达的合成孔径长度	142
7.3	聚束式合成孔径雷达的特点	145
7.3.1	聚束式合成孔径雷达回波信号特征	145
7.3.2	聚束式合成孔径雷达成像处理的特殊问题	149
	参考文献	154
第8章	聚束式合成孔径雷达成像算法	156
8.1	聚束式合成孔径雷达去斜技术	156
8.1.1	聚束式合成孔径雷达去斜技术	156
8.1.2	残余视频相位的补偿	158
8.2	极坐标格式算法	160
8.2.1	极坐标格式算法原理	160
8.2.2	数据极坐标插值过程	162
8.2.3	距离弯曲误差的校正	162
8.2.4	斜视聚束式合成孔径雷达极坐标数据的处理	164
8.3	距离徙动成像算法	165
8.3.1	距离徙动成像算法原理	166
8.3.2	Stolt 插值	167
8.3.3	距离徙动成像算法的特殊问题	168
8.4	Chirp Scaling 成像算法	171
8.4.1	未经过 Dechirp 接收的信号模型	171
8.4.2	Chirp Scaling 算法概述	172
8.4.3	Chirp Scaling 算法计算过程	173

8.5	扩展 Chirp Scaling 算法	177
8.5.1	子孔径处理方法	177
8.5.2	频谱分析方法实现方位向聚焦	178
8.5.3	扩展 Chirp Scaling 算法原理及流程	179
8.6	频率 Scaling 算法	183
8.6.1	照射几何	183
8.6.2	距离—多普勒域的去调频合成孔径雷达信号	184
8.6.3	利用频率 Scaling 校正距离徙动	185
8.6.4	频率 Scaling 算法	187
8.6.5	方位 Scaling 时间展宽	189
8.6.6	方位向子孔径处理	189
8.7	两步处理算法	190
8.7.1	方位 Deramp + Chirp Scaling 算法:正侧视模型	190
8.7.2	方位 Deramp + Chirp Scaling 算法:斜视模型	195
	参考文献	199
第 9 章	滑动聚束式合成孔径雷达	201
9.1	滑动聚束模式	201
9.2	滑动聚束式合成孔径雷达的方位分辨率和成像宽度	202
9.2.1	点目标被照射的时间	203
9.2.2	有效照射区域	204
9.2.3	方位分辨率	205
9.3	滑动聚束式合成孔径雷达的回波信号模型	205
9.3.1	滑动聚束式合成孔径雷达的回波信号	205
9.3.2	滑动聚束式合成孔径雷达的回波多普勒频率历程	206
9.4	滑动聚束式合成孔径雷达脉冲重复频率选择	207
9.5	滑动聚束式合成孔径雷达的波束指向控制	207
9.5.1	星载聚束式合成孔径雷达天线波束指向控制	208
9.5.2	滑动聚束式合成孔径雷达天线波束指向控制	210
9.6	滑动聚束式合成孔径雷达的成像算法	211
9.6.1	扩展 Chirp - Scaling (ECS) 算法	212
9.6.2	波数域算法	214
9.6.3	基带方位 Scaling 算法	215
	参考文献	217
第 10 章	单相位中心多波束合成孔径雷达	219
10.1	单相位中心多波束技术	219
10.1.1	单相位中心多波束工作原理	219
10.1.2	单相位中心多波束方位向信号特征	220
10.2	单相位中心多波束合成孔径雷达方位信号处理	221
10.2.1	复信号插值理论	221

10.2.2	方位信号处理的频域分析	223
10.2.3	一种方位信号处理的实现方法	225
10.3	单相位中心多波束合成孔径雷达模糊分析	226
10.3.1	单相位中心多波束合成孔径雷达的不同工作方式	226
10.3.2	“宽发窄收”方式的方位模糊特性	227
10.3.3	“窄发窄收”方式的方位模糊特性	228
10.3.4	方位模糊的仿真计算	230
10.3.5	距离模糊分析	232
10.4	单相位中心多波束合成孔径雷达的仿真验证	233
10.5	单相位中心多波束合成孔径雷达系统模型	235
	参考文献	236
第 11 章	多相位中心多波束合成孔径雷达	238
11.1	多相位中心多波束技术原理	238
11.1.1	多相位中心多波束工作原理	239
11.1.2	天线相位中心间距的选取和天线总长度	241
11.2	多相位中心多波束合成孔径雷达回波信号数学模型	242
11.3	多相位中心多波束合成孔径雷达误差分析	247
11.3.1	信号传播路径差引入的误差	247
11.3.2	各接收通道幅相不平衡和方位向采样不均匀引入的相位误差	249
11.4	多相位中心多波束合成孔径雷达方位向信号处理	252
11.4.1	方位向非均匀采样误差的补偿处理	253
11.4.2	信号传播路径引入误差的补偿处理	256
11.5	多相位中心多波束合成孔径雷达模糊分析	261
11.5.1	方位模糊分析	261
11.5.2	距离模糊分析	263
11.6	多相位中心多波束合成孔径雷达系统模型	264
	参考文献	265
第 12 章	多发多收合成孔径雷达	267
12.1	多发多收合成孔径雷达的发展背景及研究现状	267
12.2	多发多收合成孔径雷达的原理	268
12.3	多发多收合成孔径雷达的回波分离方法	270
12.4	基于频域分集的多发多收合成孔径雷达	271
12.4.1	频域分集多发多收合成孔径雷达基本原理	271
12.4.2	频域分集多发多收合成孔径雷达的回波信号处理方法	273
12.5	多发多收合成孔径雷达的数字波束形成	278
	参考文献	279
第 13 章	合成孔径雷达自聚焦算法	281
13.1	子孔径相关自聚焦算法	282
13.2	多孔径相关自聚焦算法	285

13.3	相位差值自聚焦算法	287
13.4	移频相关自聚焦算法	288
13.5	相位梯度自聚焦算法	291
13.6	图像对比度最优法	294
	参考文献	296
第 14 章	超分辨率微波成像技术基础	297
14.1	经典傅里叶谱分析	297
14.1.1	经典谱估计	297
14.1.2	周期图	298
14.1.3	布莱克曼-杜基谱估计	298
14.2	合成孔径雷达超分辨率信息处理技术概念	299
14.3	合成孔径雷达超分辨率处理信号模型	301
14.3.1	二维频域模型	301
14.3.2	Dechirp 处理模型	303
14.3.3	$\omega-k$ 域模型	304
	参考文献	305
第 15 章	超分辨率谱估计成像方法	307
15.1	最小方差谱估计方法及其改进	308
15.1.1	最小方差谱估计方法	308
15.1.2	降秩改进的最小方差谱估计方法	308
15.1.3	二维扩展	309
15.1.4	分块计算	310
15.1.5	实验与分析	312
15.2	幅度相位谱估计方法	314
15.2.1	前向幅度相位谱估计方法	314
15.2.2	前后向幅度相位谱估计方法	315
15.2.3	二维扩展	317
15.2.4	实验与分析	319
15.2.5	非参数谱估计方法小结	322
15.3	子空间正交分解方法	322
15.3.1	多重信号分类方法	323
15.3.2	Pisarenko 方法	326
15.3.3	最小模方法	327
15.3.4	Prony 方法	327
15.4	基于旋转不变技术的信号参数估计方法	328
15.4.1	酉 ESPRIT 信号参数估计方法	328
15.4.2	合成孔径雷达超分辨率二维酉 ESPRIT 成像方法	329
15.4.3	实验与分析	330
15.5	松弛类谱估计方法	332

15.5.1 RELAX 方法	332
15.5.2 CLEAN 方法	334
15.5.3 实验与分析	334
15.6 最大似然估计方法	337
15.6.1 频率角度域最大似然估计方法	337
15.6.2 图像域最大似然估计方法	338
15.7 自回归谱估计方法	339
15.8 小结	340
参考文献	341
第 16 章 超分辨率频谱带宽外推成像方法与自适应加权成像方法	345
16.1 超分辨率频谱带宽外推成像方法	345
16.1.1 自回归线性预测外推超分辨率成像方法	345
16.1.2 最小加权范数外推超分辨率成像方法	354
16.1.3 小结	360
16.2 超分辨率自适应加权成像方法	361
16.2.1 空间变迹法	361
16.2.2 自适应旁瓣抑制方法	368
16.2.3 空间变迹法与自适应旁瓣抑制方法比较	371
16.2.4 合成孔径雷达自适应加权超分辨率成像方法	373
参考文献	379
第 17 章 超分辨率正则化成像方法与反卷积方法	381
17.1 利用系统点扩展函数的反卷积方法	381
17.2 超分辨率正则化成像方法	382
17.2.1 正则化方法概要	383
17.2.2 合成孔径雷达超分辨率正则化方法	385
17.2.3 SAR 超分辨率正则化成像方法处理步骤	389
17.3 图像超分辨率信息处理	390
17.3.1 超分辨率图像复原的数学解释	390
17.3.2 超分辨率图像复原的观测模型	391
参考文献	392
索引	394

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 The History and Future of SAR	1
1.2 High Range Resolution Microwave Imaging	4
1.3 Spotlight SAR and Autofocus algorithm for SAR	5
1.4 High Resolution and Wide Swath SAR	7
1.5 SAR Super-Resolution Processing	9
1.6 Configuration in the Book	13
References	15
Chapter 2 The Basic Principle of Microwave Imaging	18
2.1 Linear Frequency Modulation(LFM) Pulse Compression	18
2.2 Synthetic Aperture Radar(SAR) Imaging	19
2.3 Theory Model of SAR	23
2.4 Pulse Compression and Synthetic Aperture Procession	26
2.5 Focus Depth and Range Migration	27
2.6 The Main Performance of SAR	29
2.6.1 Space Resolution	29
2.6.2 PSLR and ISLR	31
2.6.3 Swath Width	33
2.6.4 SAR System Sensitivity	33
2.6.5 Ambiguity	34
2.6.6 Dynamic Range	37
2.7 Limitation of Antenna Area and Quality Factor	39
2.7.1 Limitation of Antenna Minimum Area	40
2.7.2 Spaced-borne SAR Quality Factor	41
References	43
Chapter 3 The Principle of Radar Resolution	45
3.1 Optimal Detection of Radar Signal	45
3.2 Mathematics Model of Radar Echo	46
3.2.1 Radial Velocity and Doppler Frequency	46
3.2.2 Radial Velocity Effect on Range Delay	47
3.3 Ambiguity Function	48
3.3.1 Range Ambiguity Function and Range Resolution	49