



“十二五”国家重点图书出版规划项目

高分辨率对地观测系统中的高精度实时运动成像基础研究学术丛书

机载毫米波 三基线InSAR技术

李道京 潘舟浩 乔 明 韦立登 著



科学出版社

“十二五”国家重点图书出版规划项目
高分辨率对地观测系统中的高精度实时运动成像
基础研究学术丛书

机载毫米波三基线 InSAR 技术

李道京 潘舟浩 乔 明 韦立登 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

InSAR 是在 SAR 基础上发展起来的一项遥感技术,目前已在地形测绘、形变监测等相关领域取得了重要的应用成果。机载毫米波 InSAR 特别适合提取观测对象的表面信息,并形成观测区域的高精度数字表面模型。本书共分 11 章,首先介绍 InSAR 的基本原理和数据处理方法,讨论机载毫米波 InSAR 的基线优化问题;结合机载毫米波三基线 InSAR 原理样机设计和飞行试验情况,重点介绍机载毫米波三基线 InSAR 的系统误差校正、相位解缠和高程反演方法;同时介绍基于时变基线的机载 InSAR 数据处理方法、图像数据压缩方法、基于压缩感知的 InSAR 稀疏采样和信号处理方法;最后结合未来应用方向,对机载 Ka/L 双波段 InSAR 植被高度测量系统进行分析。

本书可供从事雷达系统、雷达信号处理、微波成像等领域科技人员参考使用,也可作为高等院校相关专业的教学和研究资料。

图书在版编目(CIP)数据

机载毫米波三基线 InSAR 技术 / 李道京等著. — 北京:科学出版社,2015.5
(高分辨率对地观测系统中的高精度实时运动成像基础研究学术丛书)
“十三五”国家重点图书出版规划项目
ISBN 978-7-03-044135-4

I. ①机… II. ①李… III. ①机载雷达-毫米波雷达-合成孔径雷达
IV. ①TN959.73②TN958

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 107657 号

责任编辑:牛宇锋 纪四稳 / 责任校对:郭瑞芝
责任印制:张 倩 / 封面设计:蓝正设计

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 5 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2015 年 5 月第一次印刷 印张:13

字数:246 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《高分辨率对地观测系统中的高精度实时
运动成像基础研究学术丛书》编委会

主 编：房建成

编 委：(按姓名拼音排序)

戴 明	房建成	龚健雅	郭 雷	洪 文
李道京	李德仁	李 京	林宗坚	刘沛清
刘先林	贾 平	贾云得	金国藩	匡定波
倪国强	舒 嵘	陶 然	童利民	童庆熹
王家骐	王建宁	汶德胜	吴一戎	相里斌
向茂生	薛永祺	徐立军	徐彭梅	徐之海
姚骏恩	俞梦孙	张寅超	张兆田	钟 掘
钟麦英	周立伟			

国家高技术研究发展计划(863 计划)“机载毫米波三基线交轨 InSAR 关键技术”(项目编号:2009AA12Z103)项目的资助,在此表示感谢。

毫米波 InSAR 技术还在不断完善和发展之中,本书介绍著者的一些研究成果。限于著者水平,书中难免存在疏漏或不足之处,恳请读者批评指正。

著者

2015 年 5 月

目 录

前言

第 1 章 概论	1
1.1 研究意义	1
1.2 国外研究现状	1
1.2.1 机载毫米波 SAR	1
1.2.2 机载毫米波 InSAR	2
1.2.3 星载毫米波 InSAR	2
1.3 国内研究现状	3
1.4 机载毫米波三基线 InSAR 原理样机飞行试验情况	4
1.5 毫米波 InSAR 的应用方向	7
1.6 本书的内容安排	8
参考文献	9
第 2 章 InSAR 的基本原理和数据处理方法	11
2.1 引言	11
2.2 InSAR 基本概念	11
2.3 InSAR 基本原理	12
2.4 InSAR 数据处理流程	14
2.5 InSAR 成像处理算法	15
2.5.1 基于 ECS 的自动配准成像处理算法原理	16
2.5.2 改进的基于 ECS 的自配准成像处理算法流程	17
2.6 机载 InSAR 运动补偿方法	20
2.6.1 双参考轨迹法	20
2.6.2 改进型双参考轨迹法	25
2.6.3 两种运动补偿方法的比较	26
2.7 基于 POS 的机载 InSAR 数据处理	26
2.8 小结	29
参考文献	29
第 3 章 机载毫米波 InSAR 多基线优化设计	32
3.1 引言	32
3.2 InSAR 几何模型	32

3.3	InSAR 高程模糊	34
3.4	毫米波 InSAR 相位解缠	34
3.4.1	单基线相位解缠	34
3.4.2	多基线相位解缠	36
3.5	基于中国余数定理的机载毫米波 InSAR 三基线优化设计	36
3.5.1	中国余数定理	36
3.5.2	基于中国余数定理的三基线相位解缠方法	37
3.5.3	相位噪声的影响分析	39
3.5.4	基线构型误差的影响分析	42
3.5.5	机载毫米波 InSAR 的三基线构型优化设计	44
3.6	基于倒数互质关系的多基线构型研究	46
3.6.1	理论分析	46
3.6.2	三维棋盘空间的解释	47
3.6.3	基于倒数互质的三基线 InSAR 设计范例	48
3.7	小结	49
	参考文献	49
第 4 章	机载毫米波三基线 InSAR 原理样机系统设计	51
4.1	引言	51
4.2	系统方案设计	51
4.2.1	基线构型	51
4.2.2	工作模式	51
4.2.3	系统组成	52
4.3	系统参数设计和分析	53
4.3.1	系统带宽	54
4.3.2	作用距离	54
4.3.3	测绘幅宽	54
4.3.4	采样点数和数据率	55
4.3.5	接收机动态范围和增益	55
4.3.6	相位噪声的影响分析	56
4.3.7	高程测量精度分析	57
4.3.8	不模糊高程分析	60
4.4	硬件设计与实现	60
4.4.1	天线	60
4.4.2	矩阵开关	60
4.4.3	收发子系统	62

4.4.4 数据采集和记录器	66
4.4.5 稳定平台	66
4.4.6 位置和姿态测量系统	67
4.5 数据处理	68
4.5.1 运动补偿和成像处理	68
4.5.2 干涉相位解缠和滤波	68
4.6 小结	70
参考文献	70
第5章 毫米波三基线 InSAR 系统误差地面校正和信号分析	72
5.1 引言	72
5.2 系统描述	72
5.3 系统误差校正方案	74
5.3.1 距离向幅相误差提取	74
5.3.2 距离向幅相误差校正	75
5.3.3 通道间幅相误差校正	76
5.4 系统误差校正后的信号分析	76
5.4.1 脉冲压缩处理	76
5.4.2 通道间干扰分析	77
5.4.3 系统相位稳定性	78
5.4.4 慢时间频谱分析	79
5.4.5 幅相一致性分析	79
5.5 地面测试试验	80
5.6 实际飞行数据处理结果	82
5.7 小结	83
参考文献	83
第6章 毫米波三基线 InSAR 系统参数飞行估计和校正	84
6.1 引言	84
6.2 三基线 InSAR 高程测量模型	85
6.3 基于敏感度方程的系统误差分析	88
6.4 系统误差粗估计	92
6.4.1 基于机械参考的横滚角、俯仰角和偏航角安装偏置误差检查	93
6.4.2 基于多普勒中心频率的误差估计	95
6.4.3 系统斜距误差估计	98
6.4.4 基线倾角误差和干涉初相粗估计	99
6.5 系统误差精估计	99

6.5.1	基于敏感度方程的干涉定标算法	100
6.5.2	基于最优化模型的三基线联合定标算法	101
6.6	毫米波三基线 InSAR 系统参数飞行估计和校正处理流程	104
6.7	实际数据处理	104
6.7.1	基于多普勒中心频率的误差估计	104
6.7.2	地面特征点的选取和斜距误差估计	106
6.7.3	基线倾角和干涉初相粗估计	107
6.7.4	基于最优化模型的三基线联合校正处理	112
6.8	小结	117
	参考文献	117
第 7 章	毫米波三基线 InSAR 的相位解缠及其高程反演	120
7.1	引言	120
7.2	三基线相位解缠绕基本原理	120
7.3	基于聚类分析的三基线相位解缠绕方法	121
7.3.1	三基线的聚类分析	121
7.3.2	三基线相位解缠方法	122
7.4	仿真数据处理	124
7.5	实际数据处理	128
7.6	小结	131
	参考文献	131
第 8 章	基于 BP 算法和时变基线的机载 InSAR 数据处理	133
8.1	引言	133
8.2	传统机载 InSAR 数据处理中的问题	133
8.2.1	波束中心近似导致的相位误差	135
8.2.2	地形高程未知导致的相位误差	136
8.2.3	相位误差数值分析	137
8.3	基于 BP 算法和时变基线的 InSAR 数据处理方法	139
8.3.1	BP 成像算法	139
8.3.2	基于 BP 算法的干涉处理模型	140
8.3.3	时变基线干涉处理方法	142
8.3.4	干涉处理流程	143
8.3.5	适用条件	144
8.4	仿真试验	144
8.5	实际数据处理	148
8.6	小结	151

参考文献	152
第 9 章 机载 InSAR 图像数据压缩	154
9.1 引言	154
9.2 机上信号处理方法	155
9.2.1 机上数据压缩方法	155
9.2.2 机上信号处理流程	155
9.3 数据压缩性能的评价方法	156
9.4 仿真数据处理结果及压缩性能分析	157
9.5 实际数据处理结果及其压缩性能分析	160
9.6 小结	162
参考文献	162
第 10 章 基于压缩感知的 InSAR 成像处理	163
10.1 引言	163
10.2 InSAR 信号稀疏性	164
10.2.1 InSAR 几何与信号稀疏性	164
10.2.2 基于 CS 理论的稀疏重建	166
10.3 信号处理方法	166
10.4 试验和处理结果	169
10.4.1 试验描述和评价准则	169
10.4.2 一维数据仿真试验	171
10.4.3 圆锥数据仿真试验	171
10.4.4 实际数据处理结果	176
10.5 小结	178
参考文献	178
第 11 章 机载 Ka/L 双波段 InSAR 植被高度测量系统分析	181
11.1 引言	181
11.1.1 极化干涉估计植被高度存在的主要问题	181
11.1.2 基于 Ka/L 双频 InSAR 的植被高度测量方法	183
11.2 机载 Ka/L 双频 InSAR 植被高度测量系统方案设计	184
11.2.1 信号处理流程	184
11.2.2 系统组成和布局	185
11.2.3 发射机和天线的形式	186
11.3 系统参数分析	186
11.3.1 工作带宽和频率选择	187
11.3.2 天线参数	187

11.3.3	作用距离和幅宽分析	188
11.3.4	基线设计和高程模糊分析	188
11.4	系统性能分析	189
11.4.1	高程测量精度分析	189
11.4.2	L 波段全极化干涉获取 DTM 的高程精度分析	190
11.4.3	植被高度估计精度分析	192
11.5	小结	194
	参考文献	194

第 1 章 概 论

1.1 研究意义

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)是 20 世纪 50 年代初提出的一种微波成像技术,它能够借助平台的运动实现长孔径综合以达到对观测区域的高分辨率成像。作为一种主动遥感设备, SAR 能够实现全天时、全天候、远距离对地观测^[1,2]。干涉合成孔径雷达(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)^[3]是在 SAR 的基础上发展起来的一项遥感技术。InSAR 利用两部具有一定视角差的天线进行成像,并对获取的两幅复图像数据进行干涉处理得到干涉相位,经反演得到观测区域的数字高程模型。InSAR 以其独特的三维信息获取能力,受到了世界各国的高度重视,目前已发展出双天线、重轨、多基线等多种干涉工作模式,并覆盖 P、L、C、X、Ku 等多个波段,已在地形测绘、形变监测等相关领域取得了重要的应用成果。

与激光、红外和可见光谱段相比,毫米波段(Ka 波段)的电磁波对烟尘、云雾有较强的穿透能力,毫米波 SAR 具有较强的全天候、全天时对地观测性能;由于波长较短,与厘米波段相比,毫米波 SAR 更易于实现超高分辨率成像,在同样长度的交轨干涉基线下,毫米波 InSAR 也更容易实现高精度的高程测量;毫米波对地面目标(如植被)的穿透能力远小于厘米波,因此特别适合提取观测对象的表面信息,并形成观测区域的高精度数字表面模型(Digital Surface Model, DSM)^[4-8]。

基于上述特点,毫米波 InSAR 技术及其应用已成为近年来的研究热点,开展毫米波 InSAR 系统及其关键技术研究对提高我国 InSAR 技术水平具有重要意义。

1.2 国外研究现状

1.2.1 机载毫米波 SAR

高分辨率毫米波 SAR 一般用于机载环境,国外在此领域开展研究工作较多的单位有美国 Sandia 实验室和德国 FGAN 研究所,已形成无人机载系列产品并投入实际应用。图 1.1 给出了 Sandia 实验室 Ka 波段 SAR 和 Ku 波段 SAR^[9]对同

一场景目标的成像结果,两个波段 SAR 的分辨率均为 0.1m,但 Ka 波段图像的细腻程度明显优于 Ku 波段。

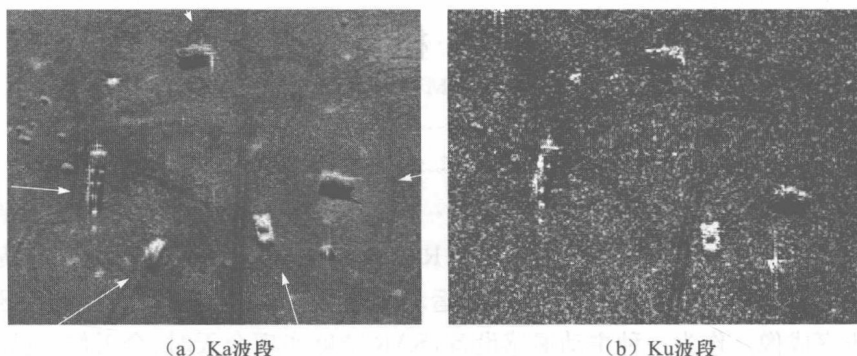


图 1.1 Sandia 实验室 Ka 波段和 Ku 波段 SAR 图像

值得注意的是,目前已有较多的机载毫米波 SAR 采用了 FMCW 体制^[10,11],以使 SAR 系统简化,并适用于小型无人机载体。

1.2.2 机载毫米波 InSAR

随着毫米波 SAR 技术水平的不断提高,毫米波 InSAR 的研制工作也取得了很大进展。2008 年 6 月的 EUSAR 年会上,德国 FGAN 研究所报道了他们研制的 Ka 波段近程多基线 InSAR 系统 MEMPHIS 及其试验结果^[12],图 1.2 为其试验系统照片,图 1.3 为该系统获得的二维图像和对应的 DSM。将该系统获取的 DSM 结果和激光雷达获取的结果进行了比较,高程精度达到 2.26m。

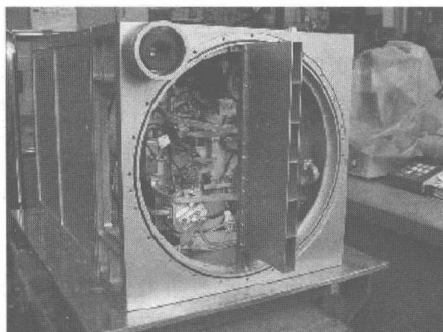


图 1.2 Ka 波段多基线 InSAR 试验系统 MEMPHIS

毫米波 InSAR 易于获取观测区域的高精度 DSM 的特点,使其在冰川厚度探测方面得到应用。美国 JPL 实验室在

2008 年研制了机载 Ka 波段 InSAR 系统 GLISTIN,并在 2009 年 1 月结合 L 波段的 UAVSAR 针对冰盖表面和冰层厚度探测进行了飞行试验,经过数据处理后,冰盖地区 DSM 高程测量精度在近端为 0.3m,远端为 3m^[7,8]。

1.2.3 星载毫米波 InSAR

由于毫米波 SAR 天线体积小、质量轻,在同等高程精度要求下所需基线较短,

因此容易实现单轨双天线干涉,可避免重轨时间去相干的问题,近两年来星载毫米波 InSAR 引起了西方国家的高度重视。

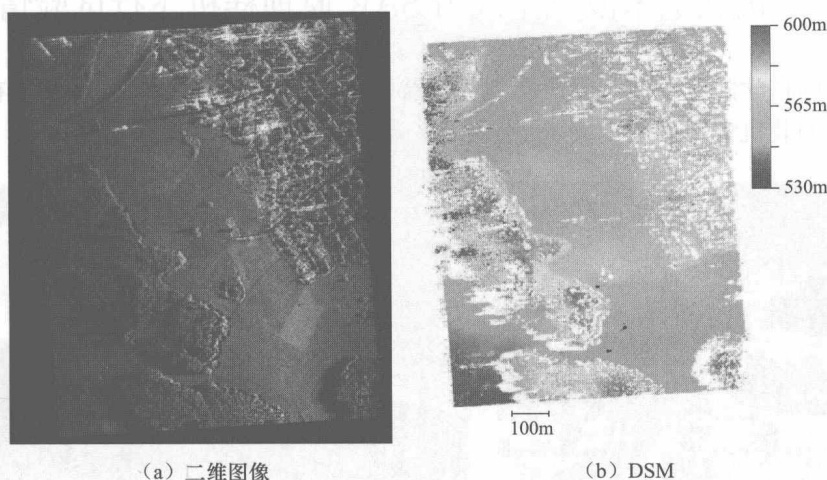


图 1.3 MEMPHIS 获取的二维图像和对应的 DSM

美国国家航空航天局(NASA)为了实现在精确尺度上研究全球海洋和陆地水体的变化和循环,制定了 SWOT(Surface Water Ocean Topography)计划,其核心是利用大幅宽的星载 Ka 波段 InSAR 系统 KaRIN 获取和监视陆地和海洋水体表面的高度^[13]。该毫米波 InSAR 对水体表面的平面二维分辨率只需要达到 10m 量级,而高程精度则要达到厘米级。与此同时,欧洲太空局、德国宇航院也将星载毫米波 InSAR 列入发展计划,并提出了多个星载 Ka 波段 InSAR 系统的概念设计^[14,15]。可以预见,在不远的将来,星载毫米波 InSAR 也会进入实际应用阶段。

1.3 国内研究现状

在国家多个科技计划的支持下,近年来我国的合成孔径雷达技术得到了长足的发展,已经研制装备了多种星载、机载和无人机载 SAR 系统,其数据产品也获得了广泛的应用。在机载 InSAR 方面,中国科学院电子学研究所研制的 X 波段双天线 InSAR 高程精度达到了 0.5m,成功应用于西部 1:10 000 比例尺测图。

基于在机载 InSAR 领域坚实的技术基础,在国家“863”计划的支持下,中国科学院电子学研究所在 2011 年研制出我国第一个机载毫米波三基线 InSAR 原理样机,并于 2011 年 5 月在运 12 飞机上完成了飞行试验^[16],文献[17]和[18]给出了相关的研究情况。

2013 年,中国航天科工集团第二研究院二十三所(23 所)也研制出了机载毫米

波 InSAR 原理样机,文献[19]给出了其飞行试验的数据处理结果。

1.4 机载毫米波三基线 InSAR 原理样机飞行试验情况

中国科学院电子学研究所研制的机载毫米波三基线 InSAR 原理样机在运 12 飞机上的装机情况如图 1.4 所示。

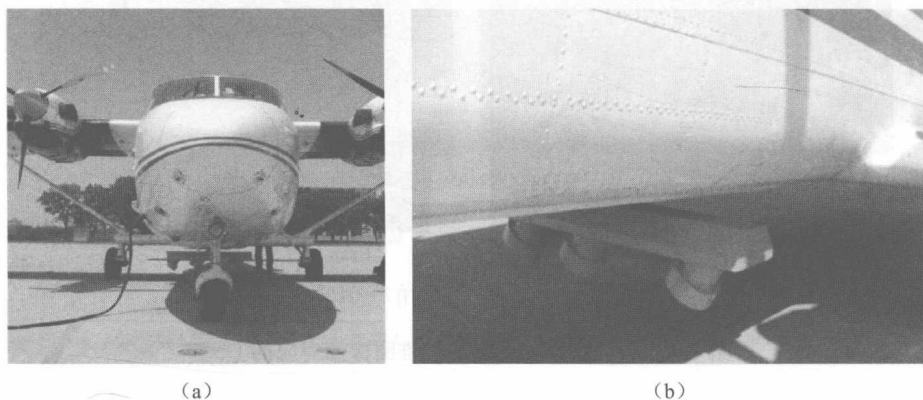


图 1.4 运 12 飞机和毫米波 InSAR 的天线安装情况

2011 年 5 月 16 日和 17 日,该原理样机的飞行试验在陕西大荔县空域进行,测区中心位置为东经 109.8° ,北纬 34.7° ,共飞行两个架次。飞行速度为 $170 \sim 200 \text{ km/h}$,飞行海拔高度约 3000 m ,数据获取测区的经纬度情况如图 1.5 所示。

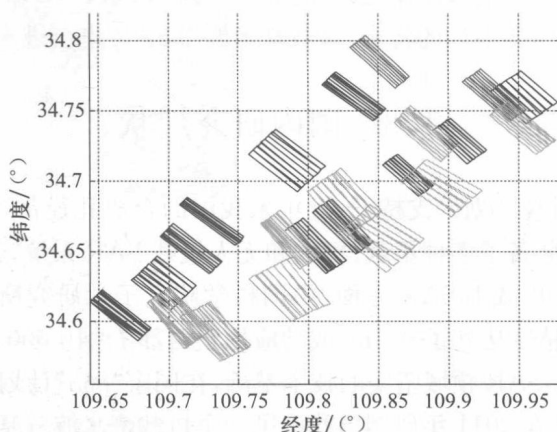


图 1.5 飞行试验测区的经纬度情况

(1)对平地场景二维成像情况。

图 1.6 是毫米波三基线 InSAR 原理样机对一平地场景的二维成像情况,图 1.7 是对该场景进行辐射校正后获得的二维图像。



图 1.6 平地场景的二维成像情况

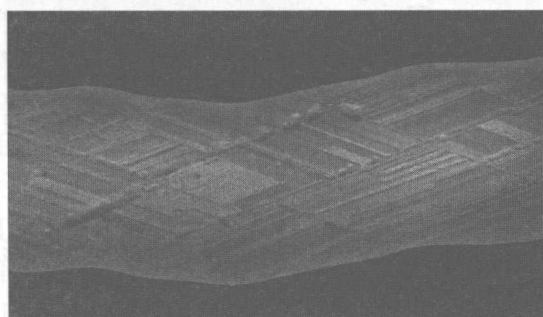


图 1.7 辐射校正后的二维图像

(2)对高程起伏地形的干涉处理和 DSM 反演结果。

图 1.8 是毫米波三基线 InSAR 原理样机对一高程起伏地形的二维成像情况,图 1.9 是不同基线干涉处理得到的干涉条纹。



图 1.8 高程起伏地形的二维成像情况

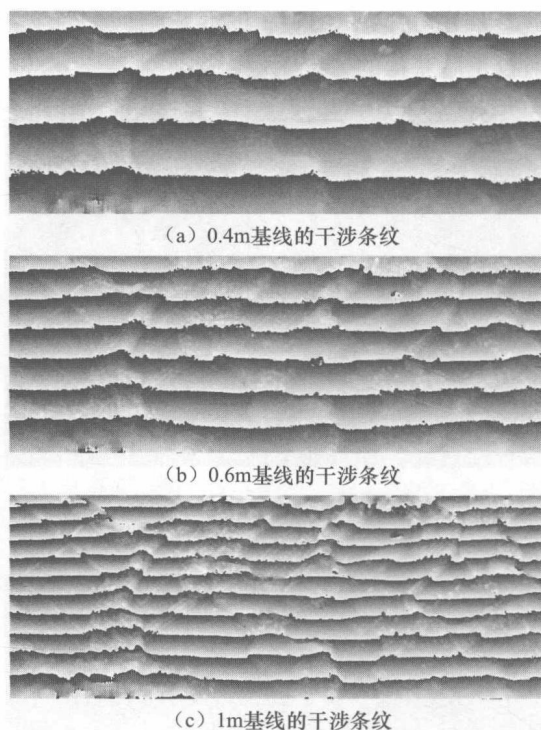


图 1.9 高程起伏地形的干涉条纹

图 1.10 是毫米波三基线 InSAR 原理样机对高程起伏地形用 0.4m 单基线获得的 DSM 反演结果和实际场景标注情况。

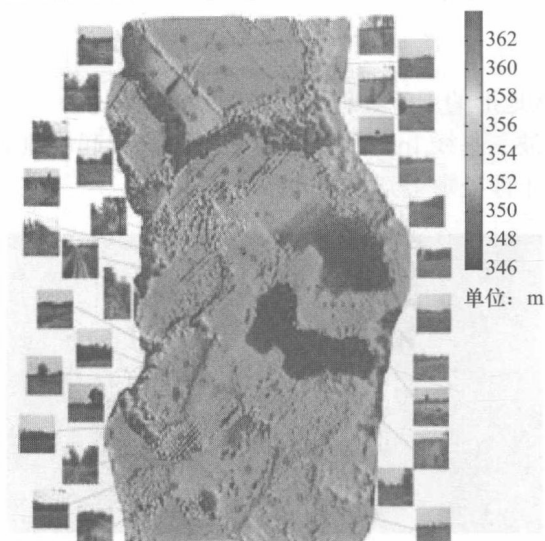


图 1.10 对高程起伏地形反演的 DSM 和实际场景标注情况