

一个高精度无人机载多功能 SAR 系统

王岩飞 刘畅 詹学丽* 李和平

(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

摘要: 该文介绍了中国科学院电子学研究所研制的一个高精度无人机载多功能 SAR 系统, 该系统可灵活工作在 Ku 和 X 波段, 具有高分辨率、干涉、全极化成像能力。该文对该系统的指标、功能、组成进行了描述, 提出了高精度运动补偿、宽带信号产生和中频接收、多通道幅相一致性保持等方案, 通过车载和无人机飞行实验, 验证了无人机装载多功能 SAR 系统的可行性。

关键词: 无人机载 SAR; 多功能; 高分辨率; 干涉; 全极化

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2013)07-1569-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.01601

An Ultrafine Multifunctional Unmanned Aerial Vehicle SAR System

Wang Yan-fei Liu Chang Zhan Xue-li Li He-ping

(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: This paper describes an ultrafine MultiFunctional Unmanned Aerial Vehicle (UAV) SAR (MFUSAR) developed at the Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences. MFUSAR can operate in Ku and X band and be capable of high resolution, interferometry and full polarimetry. The function and architecture of MFUSAR are described in detail. An effective motion compensation, wideband signal generation and IF receiver, multi-channel balance are proposed for MFUSAR. High quality images formed in the UAV flight tests demonstrate clearly the feasibility of UAV borne multifunctional SAR system.

Key words: Unmanned Aerial Vehicle (UAV) SAR; Multifunctional; High resolution; Interferometry; Full polarimetry

1 引言

合成孔径雷达(SAR)是一种高分辨力相干成像雷达, 自 20 世纪 50 年代出现到本世纪初, 在军事侦察、防洪救灾、水文监测、工程地质、农业生态、测绘等方面得到大量的实际应用。随着 SAR 应用的日趋广泛, SAR 的性能、功能也在不断发展和提高, 高分辨率、多波段、多极化、多种工作模式的多功能 SAR 系统成为发展趋势^[1]。无人机载多功能 SAR 系统将无人机与多功能 SAR 系统的优势相结合, 可机动灵活、低人员成本地实现多样化微波遥感信息获取, 可广泛应用于地理信息科学、资源普查、环境监测、防灾减灾、建设勘测、遥感测绘等领域。

在国家高技术研究发展计划(863 计划)的支持下, 中国科学院电子学研究所研制了高精度无人机载 SAR(MFUSAR)系统, 该系统是一套典型的无人

机载多功能 SAR 系统^[2], 工作在 Ku, X 频段, 可灵活配置为两套雷达, 有多种工作模式, 具有高分辨率、干涉与全极化成像功能。电子所首先完成了系统论证、系统研制与系统集成测试、跑车实验。在跑车实验基础上, MFUSAR 系统在内蒙古地区与贵州地区进行了无人机飞行实验, 完成了 SAR 高分辨率成像、干涉处理与全极化处理, 获取了大面积的地面 3 维数据与全极化 SAR 图像。此次实验成功标志着我国首次实现了基于无人机平台的干涉成像与全极化 SAR 成像。

本文第 2 节介绍了 MFUSAR 系统使用方式、工作流程、主要性能参数、组成与工作模式; 第 3 节对高精度运动补偿、宽带信号产生和中频接收、多通道接收等关键技术实现进行了阐述; 第 4 节给出了无人机飞行实验结果; 最后对本文工作进行了总结。

2 系统实现

MFUSAR 系统的特点可以简单概括为“一套系统、两套雷达、三个功能”, 具体为: 一套 MFUSAR

2012-12-12 收到, 2013-04-15 改回

国家 863 计划项目(2008AA121804)和国家自然科学基金(61072113)资助课题

*通信作者: 詹学丽 juliezh@yaho.com.cn

系统可根据任务类型不同，配置成工作在 Ku 波段的 InSAR 雷达和 X 波段的全极化 SAR 雷达，具有高分辨率、干涉成像、全极化成像的 3 种功能。MFUSAR 系统主要安装平台为中小型无人机或有人机，为便于使用，MFUSAR 系统还具有以下功能：(1)系统自检测功能；(2)SAR 数据实时记录、处理和监视功能；(3)SAR 图像监测数据实时下传功能；(4)可在地面对 SAR 系统进行遥控；(5)现场 SAR 数据实时分析与处理功能。

在飞行过程中，地面指挥控制车可通过数传链路对雷达进行遥控，雷达将监测信息与实时处理的数据通过机上的测控系统实时传输到地面指挥控制车上。飞行结束后，飞行过程中获取的原始数据可在地面进行快速回放，通过高精度数据后处理设备完成高分辨成像、干涉处理与全极化成像。在紧急任务执行期间，现场 SAR 数据实时分析与处理设备能够对数据进行实时高速处理，在实验现场即可得到高分辨率、干涉与全极化 SAR 图像。系统使用方式如图 1 所示，系统主要参数如表 1 所示。

MFUSAR 系统由发射机、天线、信号接收及采集、信号处理、数据记录 5 个部分组成。对各组成部分进行灵活配置可实现系统的条带高分辨率、干

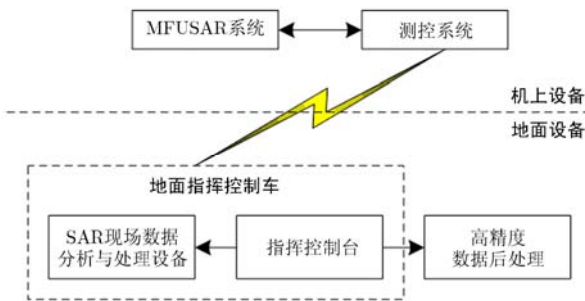


图 1 MFUSAR 系统使用方式示意图

表 1 MFUSAR 系统参数

飞行平台	中小型无人机
工作波段	X 与 Ku
工作模式	高分辨率条带/干涉/全极化
发射带宽	800 MHz
分辨率	0.3 m
等效噪声系数	-35 dB
最远作用距离	30 km
发射功率	2000 W(峰值)
天线形式	波导缝隙平板阵(Ku 波段) 偏馈双极化抛物面(X 波段)
极化	全极化
高程精度	2 m

涉与全极化 3 种工作模式。3 种工作模式的实现，主要区别在收发通道配置上，分别对应单发单收、单发双收、双发双收 3 种配置。干涉模式下系统采用两副 VV 极化天线，其中一副天线发射，两副天线同时接收；全极化模式下采用一个双馈源抛物面天线、利用极化开关控制分时发射 H 和 V 信号，利用该天线结合两个接收通道接收不同极化的回波信号。

在高分辨率工作模式下，MFUSAR 系统可获取优于 0.3 m 的高分辨率雷达图像。系统单通道发射带宽为 800 MHz 的线性调频(LFM)信号，单通道接收机接收、中频采集后送入数据处理与记录。

在干涉工作模式下，MFUSAR 系统可获取精度为 2 m 的 3 维高程信息。发射机为单发方式、一副波导缝隙阵天线^[3]发射信号，两副波导缝隙阵天线同时接收，双通道接收机接收与双通道中频采集后送入数据处理与记录。实现框图如图 2 所示。

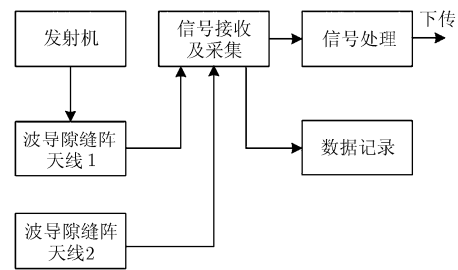


图 2 干涉模式系统实现框图

在全极化工作模式下，MFUSAR 系统可以在一次飞行中获取 4 个极化的数据。系统采用一个发射机、一副偏馈双极化抛物面天线，通过极化开关分时控制不同极化信号发射与接收，双通道接收机接收与中频采集后送入数据处理与记录。实现框图如图 3，信号收发时序图如图 4，极化信号的收发通道如图 5。

在干涉或全极化工作模式下，配置发射信号带宽为 800 MHz 时，对双通道接收雷达回波分别进行处理也可得到优于 0.3 m 的高分辨率雷达图像。

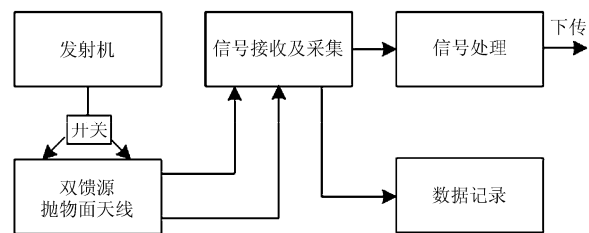


图 3 全极化模式系统实现框图

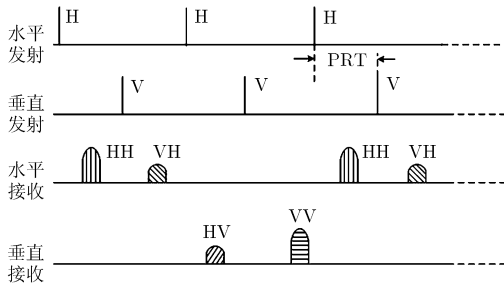


图4 全极化模式信号收发时序图

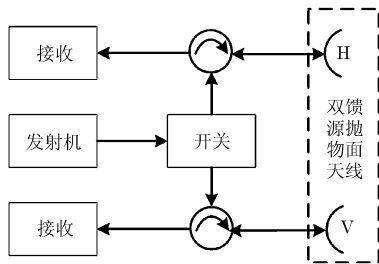


图5 极化信号的收发通道

3 关键技术

3.1 高精度运动补偿

系统实现高分辨、干涉测量、全极化功能，必须具有足够高的相干性，因此对运动补偿技术提出了高要求。MFUSAR 系统采取复合补偿方法。首先通过数据刷新率高的高精度姿态测量设备给出的运动测量参数，由天线稳定平台进行波束稳定控制，隔离载机姿态变换对天线波束照射的影响，在此基础上基于雷达回波数据进行误差估计^[4]、残差提取并进行运动补偿^[5-7]，最终得到高精度成像处理结果。运动补偿处理流程如图6所示。

在天线稳定平台方面，干涉模式和全极化模式分别进行设计。干涉工作模式下，两副波导隙缝阵天线通过两轴天线平台进行安装。两副天线通过天线平台的横臂刚性连接，直接安装在飞机机腹下的天线罩内，平台可在一定范围内进行横滚和方位向

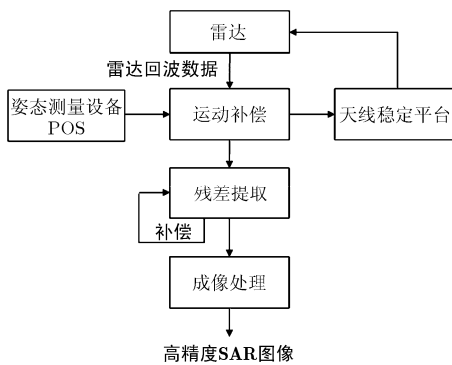


图6 运动补偿流程图

两个方向的调节。在干涉工作模式下，天线的安装还需要考虑基线的选取，基线直接影响到 InSAR 的高程精度、模糊高度等指标。对机载 SAR 系统而言，载机可提供的基线长度要远小于最优基线，因此系统要尽量选择大的基线。结合无人机的安装条件，MFUSAR 系统两个接收天线之间的横向距离(垂直于飞机纵轴方向)为 1.2 m。

全极化工作模式下，一副偏馈双极化抛物面天线通过 3 轴天线平台进行安装，直接安装在飞机腹部，平台可以在一定的范围内进行横滚、方位向与俯仰向 3 个方向的调节。

3.2 宽带信号产生和中频接收

为实现高分辨力成像，要求系统具有大带宽的信号产生和接收能力。

(1)宽带信号产生 MFUSAR 系统采用“数字中频+扩频/变频”方法产生宽带信号^[8]。基带信号源采用 DDS(Direct Digital Synthesizer)技术直接产生中频窄带 LFM 信号，之后通过倍频技术扩展信号带宽至 800 MHz，并上变频至所需频段。扩频模块可根据全极化或干涉功能进行配置，完成 Ku 波段或 X 波段扩频功能。宽带信号产生示意图如图7所示。采用本方法可避免正交调制带来的非理想载频泄漏和镜像分量，能够有效抑制信号带外谐波。

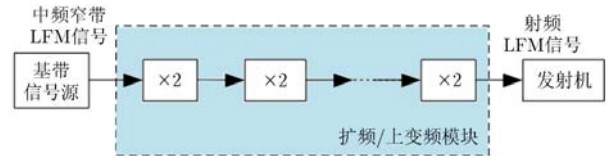


图7 宽带信号产生示意图

(2)数字中频接收 MFUSAR 系统采用超外差变频体制双通道数字中频接收、采集、数字正交解调技术。天线接收雷达回波信号，经过接收机前端的低噪声放大，形成射频信号^[9]，进行下变频至中频频带，送入中频接收模块，经中频滤波器滤除谐波分量，然后对中频信号进行放大、MGC 控制等一系列处理，形成合适幅度的中频信号直接进行 A/D 采样，随之进行数字正交鉴相和数字滤波，最后对获得的数字 I, Q 基带信号进行成像处理。数字中频接收示意图如图8所示。本方法在中频直接采样信号，可减少模拟电路的温度漂移、增益变化、直流电平漂移和非线失真等影响，具有幅相一致性、良好正交性、高动态范围等优点。

数字中频接收技术具有可编程的特点，有利于系统模块化设计，有较高的灵活性与通用性，是系统灵活配置实现高分辨率、干涉与全极化工作模式的一个重要因素。

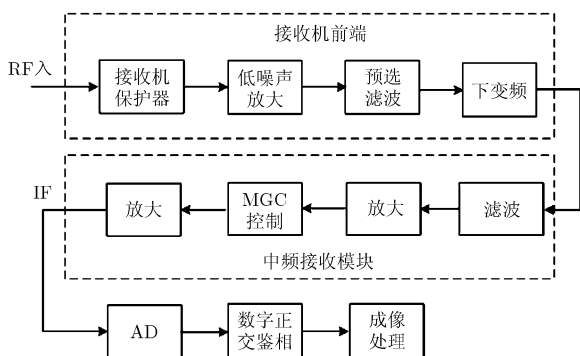


图 8 数字中频接收示意图

3.3 多通道接收

为实现高精度 3 维干涉成像，要求系统具有高一致性的多通道接收；为实现全极化成像，要求系统具有高极化隔离度。

(1)多通道平衡 MFUSAR 系统从系统设计、器件选型等方面采取措施保证多通道平衡性。首先双通道接收的设计方案完全相同，具体实施上也充分考虑一致性，确保信号在两通道间的传输路径相等，电长度一致。其次，在器件的选型上保证各路所用的器件电性能一致，并在设计中给后期电路的调试预留调整空间，第三，考虑到模拟器件的特性以及整个接收通路的宽带性，在每一路中增加平衡调节器件，用以调节两路接收机之间的一致性。结合以上方法，经过测试 MFUSAR 系统的双通道幅度一致性为 1.0 dB，相位一致性 10° 。

(2)极化隔离 MFUSAR 系统采用极化时分工作方式，水平和垂直发射脉冲的交替是由极化开关完成，因此发射通道的极化隔离度主要由极化开关的隔离度决定，本系统采用了高极化隔离度的极化开关。另外在收发通道的电磁兼容设计中采用良好的屏蔽和接地措施，避免信号在通道间相互窜扰和耦合。最后严格控制微波器件的性能指标，对影响隔离的关键指标如驻波比等进行了严格要求。结合以上方法，经过测试 MFUSAR 系统的极化隔离度可以达到 25 dB。

4 飞行实验结果

MFUSAR 系统是国内第 1 套装载无人机平台的多功能 SAR 系统，为保证无人机飞行效率与实验成功率，进行了大量的实验验证工作，具体包括系统测试、跑车实验，图 9 为跑车实验获取的雷达图像。通过这些实验，结合地面数据分析处理，充分验证了 MFUSAR 系统设计的合理性和科学性，测试了系统的功能与技术指标，达到了系统设计目标，为无人机飞行实验做了充足准备。

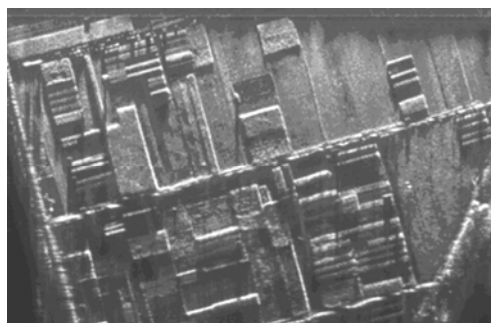


图 9 跑车实验获取的图像

2011 年，MFUSAR 系统装载于无人机上在贵州地区完成了 X 波段高分辨率成像与全极化飞行实验，在内蒙古地区完成了 Ku 波段高分辨率与干涉成像飞行实验，实验结果表明雷达图像分辨率为 0.3 m、高程精度优于 2 m、并获取了全极化的雷达图像，达到了系统设计指标。

4.1 高分辨率成像

本系统采用高精度的保相性 Chirp Scaling 成像算法^[10]、改进的 SVA 算法降旁瓣^[11]、自适应多普勒中心估计^[12]，结合高精度运动补偿技术对 SAR 原始数据进行高分辨率成像。图 10 为 MFUSAR 系统无人机飞行实验获取的高分辨率图像。在飞行实验中在实验场布设了角反射器，图 11 为两个参考点目标的方位向与距离向的冲击响应。通过对角反射器成像结果的测量与分析，得到雷达图像分辨率优于 0.3 m。

4.2 干涉成像

2011 年 8 月到 9 月，MFUSAR 系统在无人机飞行中实验获取了干涉数据，进行处理后得到了相位展开图与条带 DEM(Digital Elevation Model)图，如图 12 所示。从系统设计与实现角度分析，雷达图像的等效噪声系数为 -35 dB，通过多视滤波处理，相对相位误差为 0.8° ；基线长度测量误差为 0.2



图 10 无人机飞行实验获取的高分辨率图像

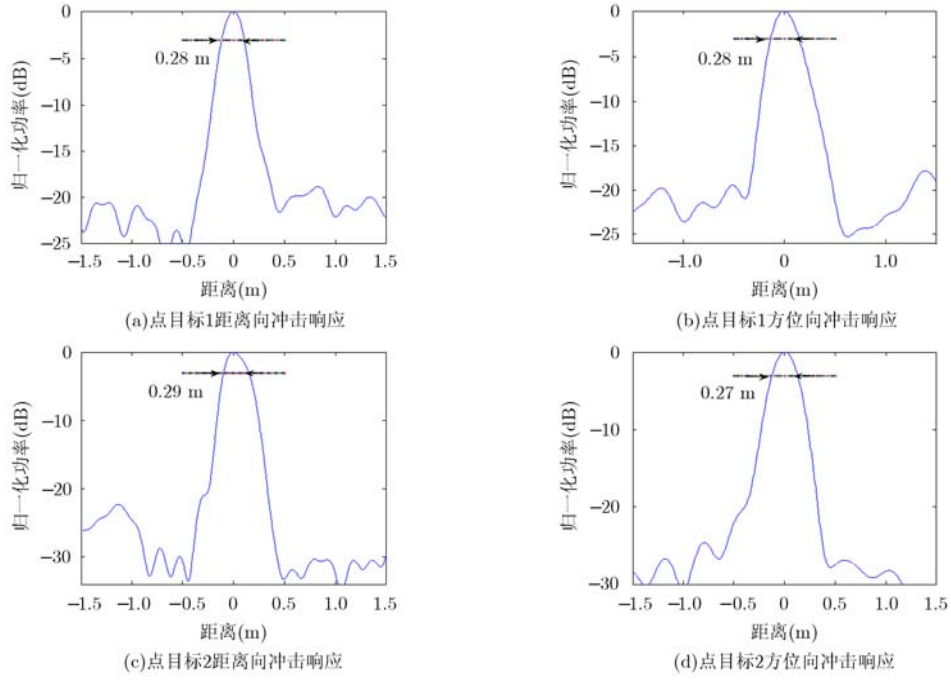


图 11 参考点目标的冲击响应

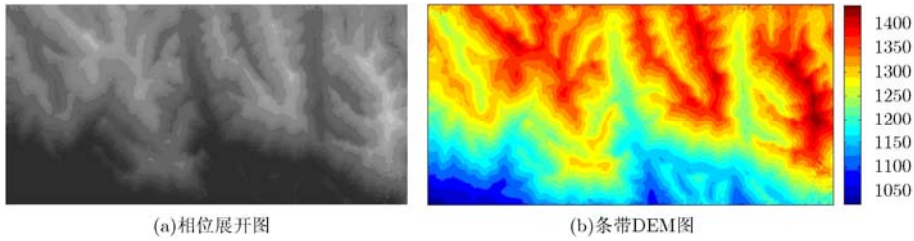


图 12 无人机飞行实验获取的干涉图像

mm；基线倾角测量误差为 0.01° ；作用距离误差为 0.3 m；飞行高度误差为 0.3 m；结合以上误差影响因素，本系统的绝对高程误差在 2 m 以内。飞行实验后，将 1:10000 的 DEM 数据产品与 MFUSAR 系统实际飞行获取的干涉影像进行了对比分析，通过选取定标点与校正，得到绝对高程误差平均值在 2 m 以内。

4.3 全极化成像

在 2011 年 6 月到 7 月，MFUSAR 系统在无人机飞行实验获取了全极化数据，进行处理后得到了高质量的全极化 SAR 图像，具体如图 13、图 14 所示，图中红色代表 HH 极化图像、蓝色代表 VV 极化图像、绿色代表 HV/VH 极化图像。通过对全极

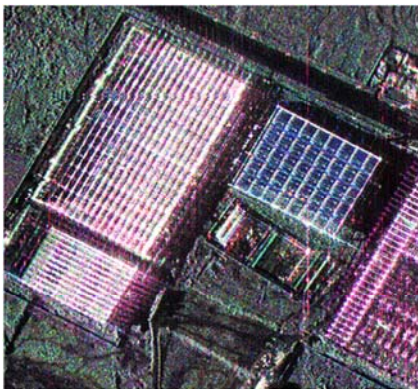


图 13 无人机飞行实验获取的全极化图像 a

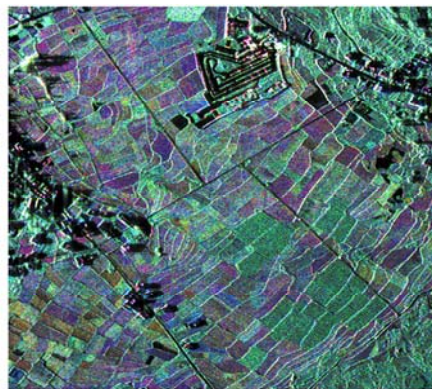


图 14 无人机飞行实验获取的全极化图像 b

化图像进行分析,不同极化 SAR 图像反映了地物目标不同的特征与性质^[13]。例如在图 13 中,平顶厂房以蓝色为主,说明是光滑表面反射,符合地物实际特性;金属结构屋顶红色较强,说明二面角成分较大,符合地物实际特性。在图 14 中,能根据颜色区分中平坦荒地或农作物等。

5 结束语

MFUSAR 系统是国内第 1 套成功应用在无人机组上的集高分辨率、干涉与全极化于一体的多功能 SAR 系统。MFUSAR 系统的成功研制与实验表明,基于无人机平台的高分辨率、干涉、全极化多功能 SAR 系统技术是可行的。通过该系统的研制,有力地推动了国内无人机微波遥感技术的进步,进一步拓宽了无人机技术的应用领域,为实现无人机遥感技术的产业化奠定了技术基础。

参 考 文 献

- [1] Brenner A R and Ender J H G. Demonstration of advanced reconnaissance techniques with the airborne SAR/GMTI sensor PAMIR[J]. *IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, 2006, 153(2): 152-162.
 - [2] 王岩飞, 徐向辉, 刘畅, 等. 用于地面目标微波特性测量的飞艇 SAR 系统[J]. *电子与信息学报*, 2010, 32(1): 28-31.
Wang Yan-fei, Xu Xiang-hui, Liu Chang, et al.. Airship SAR system for precision microwave measurement of ground targets[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(1): 28-31.
 - [3] 王绪存, 周以国. 矩形波导纵向缝隙的矩量法分析[J]. *电子与信息学报*, 2011, 33(11): 2748-2752.
Wang Xu-cun and Zhou Yi-guo. Moment method analysis of longitudinal slot in a rectangular waveguide[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(11): 2748-2752.
 - [4] Li Ya-ke, Liu Chang, Wang Yan-fei, et al.. A robust motion error estimation method based on raw SAR data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(7): 2780-2790.
 - [5] Wahl D E, Eichel P H, Ghiglia D C, et al.. Phase gradient autofocus a robust tool for high resolution SAR phase correction[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronics Systems*, 1994, 30(3): 827-835.
 - [6] Bara M, Mone J, and Broquetas A. Navigation systems requirements for airborne interferometric SAR platforms[C]. *Proceedings of IGARSS'99, Hamburg, Germany, 1999: 2158-2160.*
 - [7] Ni Chong, Wang Yan-fei, Xu Xiang-hui, et al.. SAR motion compensation based on the correction of residual attitude errors[J]. *SCIENCE CHINA Physics, Mechanics & Astronomy*, 2011, 54(10): 1899-1905.
 - [8] 贾颖新, 王岩飞. 一种超宽带多模式雷达信号产生方法及装置[P]. 中国专利, 201010162139, 2010.
Jia Ying-xin and Wang Yan-fei. One kind of UWB multi-mode radar signal generation method and equipment [P]. China Patent, 201010162139, 2010.
 - [9] 王峥, 周以国, 郭俊栋. 宽带低噪声放大器 ADS 仿真与设计[J]. *现代电子技术*, 2010, 325(14): 10-13.
Wang Zheng, Zhou Yi-guo, and Guo Jun-dong. Simulation and design of broadband low noise amplifier based on ADS[J]. *Modern Electronics Technique*, 2010, 325(14): 10-13.
 - [10] Raney R K, Runge H, Bamler R, et al.. Precision SAR processing using chirp scaling[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1994, 32(4): 786-799.
 - [11] 倪崇, 王岩飞, 徐向辉, 等. 基于改进 SVA 的 SAR/INSAR 图像处理[J]. *地球物理学报*, 2010, 53(12): 3012-3019.
Ni Chong, Wang Yan-fei, Xu Xiang-hui, et al.. SAR/INSAR image processing based on modified spatially variant apodization[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2010, 53(12): 3012-3019.
 - [12] Yang Jian, Liu Chang, and Wang Yan-fei. Adaptive doppler centroid estimation algorithm of airborne SAR[J]. *IEICE Electronics Express*, 2012, 9(13): 1135-1140.
 - [13] Cloude S R and Pottier E. A review of target decomposition theorems in radar polarimetry[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1996, 34(2): 498-518.
- 王岩飞: 男, 1963 年生, 研究员, 主要研究方向为微波成像雷达系统及其理论、数字信号处理等。
- 刘 畅: 男, 1978 年生, 副研究员, 主要研究方向为 SAR 系统及其相关技术等。
- 詹学丽: 女, 1976 年生, 副研究员, 主要研究方向为 SAR 成像理论及其信号处理等。
- 李和平: 男, 1976 年生, 副研究员, 主要研究方向为 SAR 系统及其相关技术等。