

一种高分辨率 W 波段 SAR 系统

董勇伟* 李焱磊 丁满来 梁兴东

(中国科学院电子学研究所微波成像技术重点实验室 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套高分辨率 W 波段 SAR 系统, 对系统的指标、组成、实现方案以及数据处理方法进行了描述, 提出了非线性系统误差校正、高精度运动补偿、高隔离度收发系统设计等关键问题的解决方案。通过机载飞行实验, 验证了 W 波段 SAR 系统的有效性。

关键词: 合成孔径雷达; W 波段 SAR; 调频连续波; 高精度运动补偿

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2018)05-1266-05

DOI: 10.11999/JEIT170461

High Resolution W-band SAR

DONG Yongwei LI Yanlei DING Manlai LIANG Xingdong

(Key Laboratory of Science and Technology on Microwave Imaging, Institute of Electronics,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: A miniaturized high resolution W-band SAR system developed by the Institute of Electronics of the Chinese Academy of Sciences is introduced. The parameters, architecture of the system and signal processing method are described in detail. The solutions of key problems which include non-linearities error calibration, high-accuracy motion compensation and high-isolation transceiver system design are proposed. The W-band radar system is tested by airborne experiment and the results show the effectiveness of the presented system.

Key words: SAR; W-band SAR; Frequency Modulated Continuous Wave (FMCW); High-accuracy motion compensation

1 引言

合成孔径雷达(SAR)是一种全天时、全天候的有源微波成像探测设备。因其成像性能好, 不受外界环境限制, 故被广泛应用于军事侦察、遥感探测等领域。在 W 频段, 地物的表面散射粗糙度增加, 其雷达图像具有对比度高、散射特征明显、斑点噪声低的特点^[1]。W 波段成像雷达可以获取地物的细节纹理特征, 可广泛应用于目标识别、微小变化检测等领域, 成为近年来研究的一个热点^[2-8]。

雷达系统频率越高、带宽越大, 系统设计和实现的难度越高, 其高分辨率成像处理也面临着诸多新的挑战。国外早已开始 W 波段雷达系统技术的研究工作, 已研制并建成了多部 W 波段 SAR 系统^[9,10], 国内的 W 波段 SAR 系统还未见报道。本文介绍了中国科学院电子学研究所研制的国内首套 W 波段

SAR 系统的指标、设计方案、关键技术及解决途径, 并通过机载飞行试验, 获取了分辨率优于 0.15 m 的高质量 W 波段图像, 对雷达系统性能和关键技术进行了验证。本文第 2 节介绍了系统的设计方案和主要工作参数; 第 3 节介绍了数据处理方法; 第 4 节分析了系统的关键技术及解决途径; 第 5 节给出了机载 SAR 飞行试验结果; 最后对本文工作进行了总结。

2 系统介绍

本文研制的 W 波段 SAR 系统采用调频连续波体制, 以获取尽可能高的平均发射功率, 从而实现更远的作用距离, 避免了 W 波段脉冲体制雷达发射峰值功率大导致的成本和实现困难的难题^[9]。系统的接收采用去调频(Dechirp)的接收模式, 大大降低了回波信号的采样频率和数据率。综合考虑大气窗口和现有功率器件的水平, 设计的系统总体参数如表 1 所示。

2.1 射频前端

W 波段雷达射频前端主要完成调频连续波体制下的 W 波段信号产生、发射与接收。具体功能包括:

收稿日期: 2017-05-15; 改回日期: 2018-03-02; 网络出版: 2018-03-16

*通信作者: 董勇伟 ywdong@mail.ie.ac.cn

基金项目: 中国科学院机载干涉 SAR 高精度测绘创新交叉团队项目
Foundation Item: Chinese Academy of Sciences Interdisciplinary
Innovation Team of High Precision Mapping by Airborne
Interferometric SAR

表 1 W 波段 SAR 系统参数

中心频率	93.6 GHz
系统带宽	2000 MHz
分辨率	0.1 m
发射功率	200 mW
波形	连续波线性调频信号
脉冲长度	1 ms

(1)将基带发射信号通过上变频/倍频到 W 波段；(2)将 W 波段发射激励信号经功率放大器放大之后由天线辐射出去；(3)在发射信号的同时接收目标反射的回波，经由天线接收、低噪声放大之后与发射参考信号进行混频得到视频信号，最终输出视频信号给数字单元；(4)频率源模块为各功能模块提供高质量相参时钟基准源。

W 波段雷达射频单元组成框图如图 1 所示。

中频激励信号经过滤波和放大，上变频到 X 波段，最后再通过 8 倍频到 W 波段。发射信号经过耦合器后与接收信号进行混频得到视频信号。该方案中 W 波段器件包括倍频器、功放、耦合器、低噪放和混频器。其它电路均可采用传统成熟设计技术和工艺实现。采用 8 倍频方案，中频激励信号带宽 250 MHz，现有的高速 DA 即可实现无杂散动态范围高的调频连续波信号，降低了实现高质量大带宽调频连续波信号的难度。具体实现如下：(1)高速 DA 产生中频信号 1.575~1.825 GHz，上变频之后频率为 11.575~11.825 GHz，变频产生杂散主要为 10 GHz, 8.175~8.425 GHz，通过滤波器抑制，可以达到 80 dBc 以上；(2)8 次倍频输出 92.6~94.6 GHz，输出 7 次、9 次谐波频率为 81.025~82.775 GHz, 104.175~106.425 GHz，通过滤波器抑制，谐波抑制水平能够达到 60 dBc。

W 波段成像雷达前端采用成熟的 MMIC 器件实现了对信号的倍频、放大、低噪声接收，通过合

理设计波导同轴过渡减小系统损耗，为提高系统的杂波抑制能力设计了较高 IP3 的混频器件，整个模块采用一体化设计与装配，有效地提高了系统的性能，并实现了射频前端的小型化。同时，由于系统采用调频连续波体制，在发射信号的同时接收信号，系统的隔离度成为获取高质量图像的关键。通过增加隔离墙和空间优化隔离等措施对收发天线的隔离度进行了专门的设计，使系统隔离度达到 80 dB 以上，解决了发射信号泄漏导致系统动态范围低的问题。

2.2 信号产生与记录

连续波信号产生模块通过 FPGA+DA 的方案实现^[1]，该方案具有如下优点：(1)采用统一基准时钟源，信号相参性好；(2)量化位数高，信号无杂散动态范围高，本系统产生信号无杂散动态范围达到 61 dBc；(3)可以进行预失真补偿，提高连续波信号线性度。

经过去调频接收后，回波信号带宽在 5 MHz 以内，可以采用 12 bit 甚至 14 bit 量化位数的 AD 进行数据采集，可提高系统的动态范围。

数据记录采用 SATA 固态存储方案，具有结构紧凑、存储密度高的特点。

利用 FPGA 接口灵活的特点实现导航数据的接收与处理、射频单元的控制以及系统工作状态的监控。

3 数据处理

在去调频接收模式下，经过简单处理后调频连续波 SAR 回波信号 $s(t_r, t_a)$ 具有与脉冲体制 SAR 回波信号形式相近的表达形式。

$$s(t_r, t_a) = \exp \left\{ -j2\pi \left[K_r \frac{2R(t_a)}{c} \right] t_r - j \frac{4\pi R(t_a)}{\lambda} \right\} \quad (1)$$

其中， $R(t_a) = \sqrt{R_0^2 + (vt_a)^2}$ 为瞬时斜距， v 为平台速度， t_r 为距离维快时间， t_a 为方位慢时间， K_r 为信号调频率， c 为光速， λ 为波长。

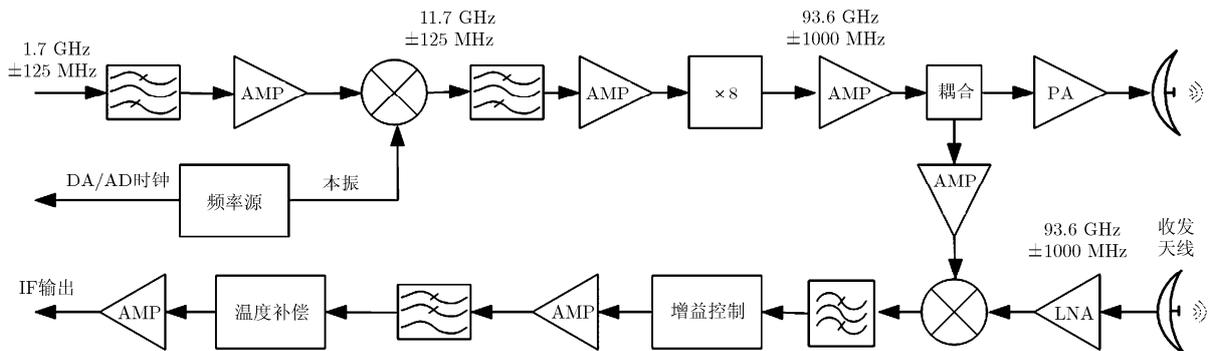


图 1 W 波段成像雷达射频单元

对于 W 波段 0.15 m 分辨率成像系统，雷达回波的 2 维耦合已经非常严重，采用低精度的 RD、FS 算法已经不能实现 2 维彻底解耦，因此需采用 ωK 成像算法。然而传统 ωK 成像算法只能处理正侧视或小斜视的情况，对于搭载于轻小型平台的 SAR 系统而言，雷达斜视角往往无法保持在较小的范围内，因此须对传统 ωK 算法进行改进，使其能够处理大斜视的情况。传统的 Stolt 映射为

$$\sqrt{(\omega/c)^2 - k_x^2} = k_r + k_{rc} \quad (2)$$

改进后的 Stolt 映射为

$$\sqrt{(\omega/c)^2 - k_x^2} \cos \theta_{sq} = k_r + k_{rc} \quad (3)$$

其中， ω 为系统角频率， k_x 为方位波数， k_r 为距离波数， k_{rc} 为距离载频波数， θ_{sq} 为斜视角。对 Stolt 映射关系进行修正后，改进的 ωK 算法处理流程与传统 ωK 处理流程^[12]一致，如图 2 所示。其中，距离多普勒耦合项补偿函数为^[5]

$$H_c(f_a, t_r) = \exp(-j2\pi f_a t_r) \exp\left(\frac{j2\pi\lambda K_r}{c} f_a t_r^2\right) \quad (4)$$

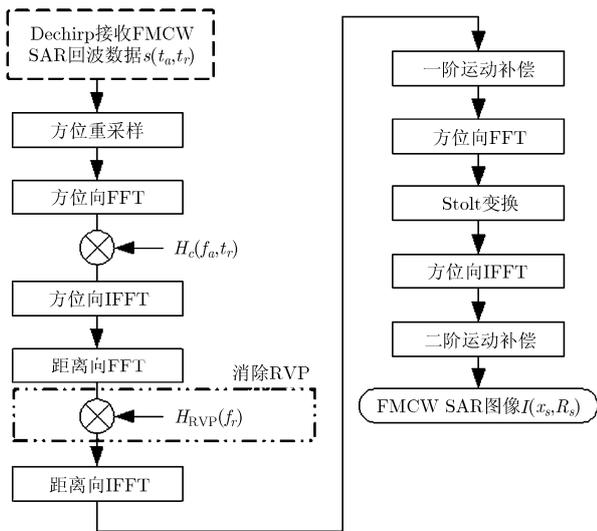


图2 系统数据处理流程图

残留视频误差补偿函数为

$$H_{RVP}(f_r) = \exp(-j\pi f_r^2 / K_r) \quad (5)$$

式中， f_a 为方位多普勒频率， f_r 为距离频率。

4 关键技术

4.1 非线性系统误差校正

本文研制的 W 波段雷达系统采用调频连续波体制，而调频连续波体制 SAR 信号非线性误差的存在会导致目标主瓣能量的扩散，旁瓣电平的升高，还可能導致成对回波的出现，严重影响雷达的成像效果。且由于频段越高、带宽越大，系统的非线性误差越严重。针对系统非线性误差的处理，一方面在信号产生方案中采用预失真补偿的方法以提高激励信号的线性度，另一方面通过定标方法估计系统非线性误差，再采用非线性的处理方法实现对系统非线性误差的校正^[13]。本文研制的 W 波段 SAR 系统非线性误差校正前和校正后获取的角反射器距离向切片如图 3 所示，可见，系统非线性误差校正后，距离向旁瓣降低，可以满足成像要求。

4.2 高精度运动补偿

由于 SAR 载机的飞行过程不可避免地受到大气湍流等各种外界因素的影响，飞行轨迹与预定理想情况常常存在不同程度的偏差^[12]。因此，如何精确测量出机载 SAR 天线相位中心的运动误差，并在成像中进行运动补偿，是实现机载 SAR 高分辨率成像的关键^[14]。由于 W 波段 SAR 波长短，约为 X 波段的 1/10，成像对运动误差更加敏感，对基于 GNSS/IMU 的位置测量精度提出了更高的要求。由于通过经典 EKF 滤波算法获取的 POS 位置中会引入 GNSS 误差，从而降低了惯性测量器件 IMU 的短时高频运动误差的测量精度，引起图像方位向的恶化。本文在运动补偿数据的处理过程中，在 EKF 滤波算法框架下，采用基于估计误差序列的线性反馈方法，

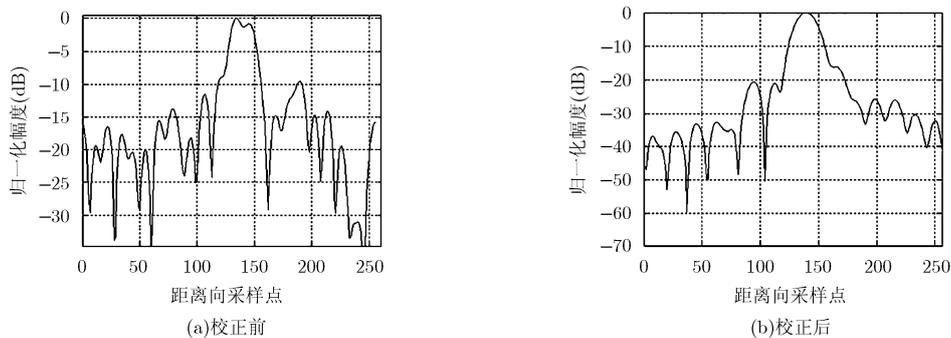


图3 系统非线性误差校正距离向压缩结果对比

减小或抑制 GNSS 短时误差的引入。如图 4 所示，采用基于估计误差序列的线性反馈方法，抑制了 GNSS 引起的位置的秒量级的跳动。

采用该方法对 W 波段 SAR 数据进行处理，取角反射器方位向切片进行分析。如图 5 所示，可见采用基于估计误差序列的线性反馈方法进行运动补偿后，方位向聚焦效果得到明显改善。

由于 W 波段雷达系统发射功率的限制，该系统成像时飞行高度不高。根据运动误差的计算公式可以得出：斜距越小、系统波长越小，则参考平面误差对运动补偿精度的影响越大。要获取聚焦良好的图像需要进一步采用基于地形的运动补偿方法进行成像处理。

4.3 低杂散信号产生

W 波段 SAR 系统采用 8 倍频方案，8 次倍频方案系统杂散理论恶化 24 dB。调频连续波雷达系统采用去调频接收方案，其杂散会扩散到去调频后视频信号整个频谱，严重影响系统的动态范围和图像质量，必须对系统杂散抑制进行针对性的设计。W 波段雷达发射链路的杂散谐杂波主要由 DA 杂散、变频交调及倍频谐杂波 3 部分共同组成。其中，DA 产生的谐杂波主要由基频信号及谐波与 DA 时钟和 1/2 的 DA 时钟交调产生。上变频器件产生的谐杂波主要有 2 阶交调。倍频器产生的谐杂波主要有 2 次谐波。各部分谐杂波产生及测试结果如表 2 所示。

经测试，最终倍频后 W 波段信号的谐杂波抑制能够达到 60 dBc，满足系统使用要求。

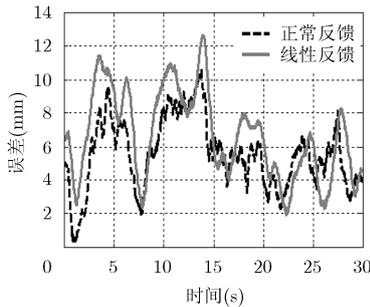


图 4 传统 EKF 滤波和基于估计误差序列的线性反馈 EKF 滤波结果对比

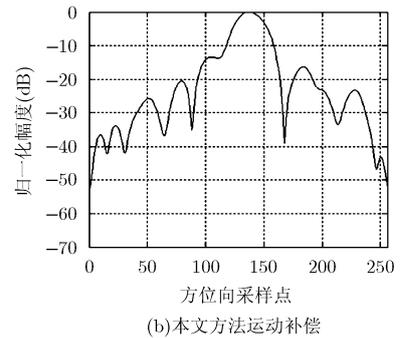
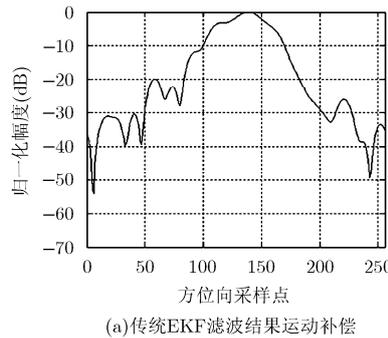


图 5 运动补偿后方位向结果对比

4.4 高隔离度收发系统

由于系统采用调频连续波体制，在系统工作时，发射信号泄漏到接收通道，严重时会导致接收通道饱和。系统收发隔离度直接影响系统的动态范围。传统的收发隔离技术包括时分隔离、空间隔离、极化隔等。本文采用的提高系统隔离度的方法有：(1) 通过增加天线扼流槽、空间距离、隔离墙的方法提高天线隔离度；(2) 通过自适应抵消的方法抑制进入接收通道的泄漏信号^[15]。通过以上方法可以抑制泄漏信号导致接收通道前端饱和的问题。要进一步提高收发系统的隔离度，还可以采用特殊材料研制隔离度高的天线^[16]。

5 试验结果

该系统是国内研制的第 1 套 W 波段 SAR 系统，于 2015 年 3 月在陕西蒲城地区开展了飞行试验，验证了雷达系统性能。飞行平台为赛斯纳 208，飞行高度为 300 m。经定标点测试，雷达系统空间分辨率达到 0.15 m，成像幅宽超过 300 m。获取的分辨率优于 0.15 m 的 W 波段 SAR 图像如图 6 和图 7 所示，图像聚焦效果良好，地物细节清晰可见。

6 结束语

本文介绍了国内第 1 套 W 波段 SAR 系统设计方案，分析阐述了 W 波段 SAR 系统研制中存在的關鍵技术和解决途径，并通过机载飞行试验，验证了 W 波段调频连续波 SAR 系统的性能。该系统的研制有力地推动了国内高频段微波遥感技术的进步。

表 2 W 波段射频前端谐杂波抑制测试结果

谐杂波	采用措施	测试结果
DA 信号产生	基频信号及谐波与 DA 时钟和 1/2 的 DA 时钟交调	带内选择 DA 输出杂散最优的信号，带外采用滤波器抑制
上变频	多阶交调及本振泄露	交调及本振泄露均在带外，采用滤波器进行抑制
8 倍频	7 次和 9 次谐波	带通滤波器抑制
		带内优于 -60 dBc，带外优于 -55 dBc
		带内外无明显谐杂波
		优于 -60 dBc



图6 获取的W波段SAR影像1



图7 获取的W波段SAR影像2(运5飞机影像)

W波段雷达具有体积小、分辨力高,图像解译能力强的特点,且具有全天候、全天时工作能力,将在军用、民用方面具有广阔的应用前景。

参考文献

- [1] ESSEN H, JOHANNES W, STANKO S, *et al.* High resolution W-band UAV SAR[C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Munich, Germany, 2012: 5033-5036. doi: 10.1109/IGARSS.2012.6352480.
- [2] 魏一搏, 王辉, 李宁, 等. 适用于W波段的ISAR成像的二维补偿方法[J]. 西安电子科技大学学报, 2016, 43(3): 155-160. doi: 10.3969/j.issn.1001-2400.2016.03.027.
WEI Yibo, WANG Hui, LI Ning, *et al.* Two dimension migration compensation method for W-band ISAR imaging [J]. *Journal of Xidian University*, 2016, 43(3): 155-160. doi: 10.3969/j.issn.1001-2400.2016.03.027.
- [3] LI Zhanfeng, HU Bing, ZHAO Guoqiang, *et al.* A W-band digital variable polarimetric radar for target characteristic measurement[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2017, 36(1): 35-40. doi: 10.11972/j.issn.1001-9014.2017.01.008.
- [4] JAESCHKE T, BREDENDIEK C, KUEPPERS S, *et al.* Cross-polarized multi-channel W-band radar for turbulent flow velocity measurements[C]. IEEE MTT-S International Microwave Symposium, San Francisco, USA, 2016: 1-4. doi: 10.1109/MWSYM.2016.7540256.
- [5] CHRISTIAN Z, AXEL H, MICHAEL S, *et al.* A compact W-band LFM CW radar module with high accuracy and integrated signal processing[C]. European Microwave Conference, Paris, France, 2015: 554-557. doi: 10.1109/EuMC.2015.7345823.
- [6] ABRIL J, NOVA E, BROQUETAS A, *et al.* Deforming and relief interferometric SAR imaging at W-band[C]. International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, Houston, USA, 2011: 1-2. doi: 10.1109/irmmw-THz.2011.6104977.
- [7] 张志才. W波段FMCW异物探测雷达前端研究[D]. [硕士学位论文], 电子科技大学, 2016.
- [8] DUOIS-FERNANDEZ P, PLESSIS O, COZ DL, *et al.* The ONERA RAMSES SAR system[C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Toronto, Canada, 2002, 3: 1723-1725.
- [9] ESSEN H, STANKO S, SOMMER R, *et al.* Millimetre wave SAR for UAV operation[C]. Asia-Pacific Microwave Conference, Melbourne, Australia, 2011: 963-966.
- [10] NICHOLAS J, SAMUEL S, and RONALD M. Demonstration of W-band SAR Imagery with a ground based system having 7.5 GHz of bandwidth obtained with a stepped chirp waveform[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2013, 49(4): 2522-2532. doi: 10.1109/TAES.2013.6621833.
- [11] 唐大伟, 吴琼之, 孙宁霄, 等. 基于高速D/A AD9739 2.5 GSPS的宽带信号源[J]. 电子设计工程, 2013, 21(20): 45-47. doi: 10.3969/j.issn.1674-6236.2013.20.014.
TANG Dawei, WU Qiongzi, SUN Ningxiao, *et al.* The high-speed D/A AD9739-based wideband signal source[J]. *Electronic Design Engineering*, 2013, 21(20): 45-47. doi: 10.3969/j.issn.1674-6236.2013.20.014.
- [12] 韩冰. 高分辨率机载SAR成像处理技术研究[D]. [博士学位论文], 中国科学院电子学研究所, 2008.
- [13] 董勇伟, 梁兴东, 丁赤飏. 调频连续波SAR非线性处理方法研究[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(5): 1034-1039. doi: 10.3724/SP.J.1146.2009.00582.
DONG Yongwei, LIANG Xingdong, and DING Chibiao. Non-linear signal processing for FMCW SAR [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(5): 1034-1039. doi: 10.3724/SP.J.1146.2009.00582.
- [14] 李芳芳, 仇晓兰, 孟大地, 等. 机载双天线InSAR运动补偿误差的影响分析[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(3): 559-567. doi: 10.3724/SP.J.1146.2012.00850.
LI Fangfang, QIU Xiaolan, MENG Dadi, *et al.* Effects of motion compensation errors on performance of airborne dual-antenna InSAR[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(3): 559-567. doi: 10.3724/SP.J.1146.2012.00850.
- [15] 宋月丽, 黎仁刚. 雷达对抗系统收发隔离技术研究[J]. 舰船电子对抗, 2012, 35(1): 20-24. doi: 10.3969/j.issn.1673-9167.2012.01.005.
SONG Yueli and LI Rengang. Research into transmitter-receiver isolation technique of radar countermeasure system[J]. *Shipboard Electronic Countermeasure*, 2012, 35(1): 20-24. doi: 10.3969/j.issn.1673-9167.2012.01.005.
- [16] 吕波, 郑秋容, 袁乃昌. 一种改善雷达收发隔离的新方法[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(8): 1595-1597. doi: 10.3321/j.issn:1001-506X.2008.08.049.
LÜ Bo, ZHENG Qiurong, and YUAN Naichang. Novel method to improve radar transmit-receive isolation[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2008, 30(8): 1595-1597. doi: 10.3321/j.issn:1001-506X.2008.08.049.

董勇伟: 男, 1982年生, 副研究员, 硕士生导师, 研究方向为高分辨率小型化合成孔径雷达系统技术。
李焱磊: 男, 1983年生, 副研究员, 硕士生导师, 研究方向为机载差分干涉合成孔径雷达信号处理。
丁满来: 男, 1983年生, 博士生, 研究方向为小型化合成孔径雷达系统技术。
梁兴东: 男, 1973年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为高分辨率合成孔径雷达系统、干涉合成孔径雷达系统、成像处理与应用。