



国家新闻出版署

National Press and Publication Administration

站内搜索输入

类别

首页

信息发布

办事服务

首页 > 从业机构和产品查询 > 查询结果

期刊/期刊社查询

机构名称	计算机工程与设计
单位地址	
刊号	11-1775/TP
联系电话	-
类别	期刊
主管单位	中国航天科工集团有限公司
主办单位	中国航天科工集团第二研究院七〇六所
语种	汉语



期刊导航 ⌵

刊名(曾用刊名) ⌵

请输入检索词

出版来源检索

文献检索 ➡

📍 期刊导航

网络出版声明: 本刊为拥有纸质期刊出版许可的正式刊物;《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司(以下简称电子杂志社)为拥有互联网出版许可和互联网信息服务许可的出版单位.....

👁️ 关注 📡 RSS订阅 ✉️ 投稿 ➦ 分享到 ⌵



计算机工程与设计

🏆 核心期刊 🏆 JST

Computer Engineering and Design

基本信息

主办单位: 中国航天科工集团第二研究院706所

出版周期: 月刊

ISSN: 1000-7024

CN: 11-1775/TP

出版地: 北京市

语种: 中文;

开本: 大16开

邮发代号: 82-425

创刊时间: 1980

[收起](#)

出版信息

专辑名称: 信息科技

专题名称: 电子信息科学综合

出版文献量: 20114篇

总下载次数: 3850858次

总被引次数: 178340次

评价信息

(2020)复合影响因子: 1.296

(2020)综合影响因子: 0.838

该刊被以下数据库收录:

JST 日本科学技术振兴机构数据库(日)(2018)

北京大学《中文核心期刊要目总览》来源期刊: 1992年(第一版),1996年(第二版),2004年版,2008年版,2011年版,2014年版,2017年版,2020年版

期刊荣誉:

Caj-cd规范获奖期刊;



中国计算机学会会刊
Publication of China Computer Federation

ISSN 1000-7024
CODEN JIGYEP

计算机工程与设计

Computer Engineering and Design

2019年10月 第40卷 第10期

Vol. 40 No. 10 Oct. 2019

10
2019

中国航天科工集团第二研究院 706 所主办

计算机工程与设计

(JISUANJI GONGCHENG YU SHEJI)

2019 年 10 月 第 40 卷 第 10 期

目 次

网络与通信技术

- 基于改进萤火虫算法的三维 RFID 网络优化 张 蓉, 郭 宇, 黄少华, 葛妍娇, 王益聪(2731)
- 基于迭代加权信道的信道估计方案 王成敏, 吴君钦, 方 莹, 汤绍春, 刘 刚, 王 凯(2736)
- 离散多音调制系统的 PAPR 降低算法 谢锡海, 张依旋(2741)
- 分区和能耗均衡的 LEACH 路由改进算法 方旺盛, 陈朕浩, 胡中栋(2746)
- 基于环状网络的 Oblivious 路由算法 李旭瑞, 段新明(2752)

信息安全技术

- WMNs 机会路由下弱可信节点共存机制 张玲玲, 吴 军, 印新棋, 白光伟(2757)
- 多属性中心密文定长属性加密访问控制方案 杨 念, 滕 玮, 韩 斌, 黄树成(2765)
- 基于双置乱和 C-R 混沌系统的图像加密算法 马 聪, 王爱银, 李国东(2773)
- P2P 网络上被动型蠕虫传播建模和模拟分析 张舒娟, 靳 祯(2778)
- 实时微博谣言的未来传播范围评估方法 马晓宁, 梁晓蕊(2785)
- 基于结构化文档的钓鱼网站检测算法 刘博文, 王雨琪, 林果园(2791)
- 基于人工免疫的集成入侵检测模型 辛 壮, 万 良(2799)

信息安全技术

- 基于 FPGA 的车载双目系统 张方义, 赵 刚, 刘海英, 卢兴华, 于志豪(2805)
- 飞行器可用实时以太网技术 赵征帆, 丁传红(2813)

软件与算法

- 改进的 SSVM 集成算法在信用风险评估中的应用 陈舒期, 梁雪春(2822)
- 基于随机森林的学生画像特征选择方法 杨长春, 徐 筱, 宦 娟, 田迎春, 经德林(2827)
- 自适应采样多通路 Metropolis 算法 贺怀清, 湛少胜, 刘浩翰(2835)

基于三维尺度不变特征的肺结节良恶性诊断	吴化禹, 强 彦, 王三虎, 刘希靖, 原 杰(2843)
基于最小转弯半径的无人机转弯航迹规划算法	李文广, 胡永江, 孙世宇, 李建增, 褚丽娜(2849)
基于组合类别空间的矩阵分解推荐算法	曹淑燕, 肖春景, 谢 聪, 张宇翔(2855)
基于非线性收敛因子和局部扰动的鲸鱼算法	于俊洋, 高宁杰, 李 涵(2861)
多特征融合的句子语义相似度计算方法	翟社平, 李兆兆, 段宏宇, 李 婧, 董迪迪(2867)
基于深度学习的维吾尔语命名实体识别模型	朱顺乐(2874)
基于高斯扰动和混沌初始化的狼群算法	王日宏, 李 祥, 李 娜(2879)
基于熵权法的 Stacking 算法	包志强, 胡啸天, 赵媛媛, 赵 研(2885)
基于软件行为分析的错误定位方法	吴江南, 吴军华(2891)
模糊自适应多细胞 GEP 函数优化算法	邓楚燕, 彭昱忠, 李红亚, 龚道庆, 张 浩, 刘志平(2895)
基于滑动窗口-小波提升对地电场预测算法	顾 涛(2903)
基于关键处理过程的机载三通道 SAR-GMTI 算法验证	曾乐天, 边 磊, 杨春晖, 赵跃龙(2908)
基于 BPMN 的复杂网络指挥控制流程优化	魏 然, 江 山, 杨 芳(2914)

多媒体技术

基于有偏随机游走的曲线目标断裂连接方法	卢 明, 陈 黎, 田 菁(2921)
基于 HSI 空间融合的矿井图像增强算法	朱礼义, 李巧月, 李国超, 郭小兵, 韩习习, 祝汉城(2926)
基于残差网络和度量学习的素描人脸识别	张京京, 曹 林(2931)
基于征象信息和深度哈希的肺结节图像检索	李涓楠, 赵涓涓, 车 征, 刘继华, 唐笑先(2937)
基于局部统计几何特征的人脸性别分类方法	郑明明, 林志毅(2943)
基于 PSO 直觉模糊集相似度的刑侦图像分割	兰 蓉, 程阳子(2949)
基于矩阵低秩稀疏分解的图像去噪算法	王 雪, 靳伍银(2955)
基于 MC-E 算法的 CT 图像三维重建	李怡敏, 王宝珠, 刘翠响, 高 妍(2959)
基于 HOG-CSLBP 及 YOLOv2 的行人检测	徐守坤, 邱 亮, 李 宁, 石 林(2964)
基于跨连特征融合网络的面部表情识别	黄倩露, 王 强(2969)
基于子段分割的人脸识别方法	王小伟(2974)
SegNet 在工件表面缺陷检测中的应用	郭亚萍, 顾智聪, 彭宏京(2979)

智能技术

基于词向量和增量聚类的短文本聚类算法	杨 波, 杨文忠, 殷亚博, 何雪琴, 袁婷婷, 刘泽洋(2985)
基于 CNN 和多分类器的恶意 URLs 检测	张 慧, 钱丽萍, 汪立东, 袁 辰, 张 婷(2991)
二尖瓣心音信号降噪与识别的理论仿真	周克良, 王佳佳(2996)

基于 IPSO-GPR 的短期负荷区间预测 任利强, 张立民, 王海鹏, 郭 强(3002)

基于特征融合分段卷积神经网络的情感分析 周泳东, 章 韵, 曹艳蓉, 黄海平(3009)

基于孪生网络的深度学习目标跟踪算法 王俊岭, 王硕豪(3014)

基于差分进化算法多智能体任务分配 熊远武, 赵岭忠, 翟仲毅(3020)

基于多模型融合的人体行为识别模型 余万里, 韦玉梅, 李鲁群(3030)

摄影领域评论情感词典构建方法 刘亚桥, 陆向艳, 邓凯凯, 阮开栋, 刘 峻(3037)

基于结构张量特征邻域的机体损伤区域划分 师利中, 蔡舒好(3043)

开发与应用

基于 MCDC 的测试用例生成方法 唐嘉营, 牟永敏(3049)

基于游览行为的游客偏好学习方法 孙 磊, 宾辰忠, 古天龙, 孙彦鹏, 宣 闻(3056)

编辑部

主 编 汤铭端

主 任 曾卫平

编 辑 韩 庭 吴 玥 高晶晶 何文思 胡筱镜 孟春红 吴茜雅 武立新

本刊为:

- | | |
|------------------------------|---------------------------|
| ★中国计算机学会会刊 | ★《中国学术期刊综合评价数据库》收录期刊 |
| ★中国宇航学会会刊 | ★《中国学术期刊网络出版总库(CNKI)》收录期刊 |
| ★全国中文核心期刊(中文核心期刊要目总览 2017 版) | ★《万方数据—数字化期刊群》收录期刊 |
| ★中国科技核心期刊(中国科技论文统计源期刊) | ★维普网《中文科技期刊数据库》收录期刊 |
| ★英国《科学文摘》(SA, INSPEC)源期刊 | ★《中国学术期刊文摘(中文版)》收录期刊 |
| ★俄罗斯《文摘杂志》(AJ of VINITI)源期刊 | ★《电子科技文摘数据库》收录期刊 |
| ★美国《乌利希期刊指南》(UPD)源期刊 | ★《中国终身教育学术研究数据库》收录期刊 |
| ★波兰《哥白尼索引》(IC)源期刊 | |

期刊基本参数: CN 11-1775/TP * 1980 * m * A4 * 330 * zh * P * ¥38.00 * 54 * 2019-10

Computer Engineering and Design

Vol. 40 No. 10 Oct. 2019

CONTENTS

Network and Communications Technology

- Improved firefly algorithm based three-dimensional RFID network optimization
..... ZHANG Rong, GUO Yu, HUANG Shao-hua, et al(2731)
- Channel estimation algorithm based on iterative reweight WANG Cheng-min, WU Jun-qin, FANG Ying, et al(2736)
- PAPR reduction algorithm for distributed multi-tone modulation system XIE Xi-hai, ZHANG Yi-xuan(2741)
- Improved LEACH routing algorithm based on partitioning and energy consumption balance
..... FANG Wang-sheng, CHEN Zhen-hao, HU Zhong-dong(2746)
- Oblivious routing algorithm based on rings network LI Xu-rui, DUAN Xin-ming(2752)

Information Security Technology

- Coexistence mechanism of weak-trusted nodes for opportunistic routing under WMNs
..... ZHANG Ling-ling, WU Jun, YIN Xin-qi, et al(2757)
- Attribute-based encryption access control scheme of multiple attribute centers with constant size ciphertexts
..... YANG Nian, TENG Wei, HAN Bin, et al(2765)
- Image encryption algorithm based on double scrambling and C-R chaotic system
..... MA Cong, WANG Ai-yin, LI Guo-dong(2773)
- Modeling and simulation analysis of spreading passive worms on P2P networks ZHANG Shu-juan, JIN Zhen(2778)
- Method for evaluating future spread of real-time Weibo rumors MA Xiao-ning, LIANG Xiao-han(2785)
- Phishing detection algorithm based on structured document LIU Bo-wen, WANG Yu-qi, LIN Guo-yuan(2791)
- Integrated intrusion detection model based on artificial immunity XIN Zhuang, WAN Liang(2799)

Embedded System Engineering

- Vehicle binocular system based on FPGA ZHANG Fang-yi, ZHAO Gang, LIU Hai-ying, et al(2805)
- Real-time Ethernet technology for flight vehicle ZHAO Zheng-fan, DING Chuan-hong(2813)

Software and Arithmetic

- Application of improved SSVM integration algorithm in credit risk assessment ... CHEN Shu-qi, LIANG Xue-chun(2822)

Feature selection method for constructing student profile based on random forest	YANG Chang-chun, XU Xiao, HUAN Juan, et al(2827)
Adaptive sampling multiplexed Metropolis algorithm	HE Huai-qing, ZHAN Shao-sheng, LIU Hao-han(2835)
Diagnosis of benign and malignant pulmonary nodules based on three-dimensional scale invariant features	WU Hua-yu, QIANG Yan, WANG San-hu, et al(2843)
UAV turning path planning algorithm based on minimum turning radius	LI Wen-guang, HU Yong-jiang, SUN Shi-yu, et al(2849)
Matrix factorization recommendation algorithm based on combinational category space	CAO Shu-yan, XIAO Chun-jing, XIE Cong, et al(2855)
Whale optimization algorithm based on nonlinear cognitive factor and local disturbance	YU Jun-yang, GAO Ning-jie, LI Han(2861)
Sentence semantic similarity method based on multi feature fusion	ZHAI She-ping, LI Zhao-zhao, DUAN Hong-yu, et al(2867)
Deep learning based Uyghur named entities recognition	ZHU Shun-le(2874)
Wolf pack algorithm based on Gaussian disturbance and chaotic initialization	WANG Ri-hong, LI Xiang, LI Na(2879)
Stacking algorithm based on entropy weight method	BAO Zhi-qiang, HU Xiao-tian, ZHAO Yuan-yuan, et al(2885)
Fault localization method based on software behavior	WU Jiang-nan, WU Jun-hua(2891)
Self-adaptive multicellular GEP algorithm based on fuzzy control for function optimization	DENG Chu-yan, PENG Yu-zhong, LI Hong-ya, et al(2895)
Prediction algorithm for electric field to ground based on sliding window-lifting wavelet transform	GU Tao(2903)
Validation of airborne three-channel synthetic aperture radar-ground moving target identification algorithms based on critical processing procedures	ZENG Le-tian, BIAN Lei, YANG Chun-hui, et al(2908)
Optimization of complex network command and control process based on BPMN	WEI Ran, JIANG Shan, YANG Fang(2914)

Multimedia Technology

Broken region connection method for curved objects based on biased random walk	LU Ming, CHEN Li, TIAN Jing(2921)
Mine image enhancement algorithm based on HSI space and fusion	ZHU Li-yi, LI Qiao-yue, LI Guo-chao, et al(2926)
Sketch face recognition based on residual network and metric learning	ZHANG Jing-jing, CAO Lin(2931)
Lung nodule image retrieval based on sign information and deep hashing	LI Juan-nan, ZHAO Juan-juan, CHE Zheng, et al(2937)

Facial gender classification based on local statistical geometric feature	ZHENG Ming-ming, LIN Zhi-yi(2943)
Criminal investigation image segmentation based on similarity measure between intuitionistic fuzzy sets with PSO	LAN Rong, CHENG Yang-zi(2949)
Image denoising algorithm based on spares and low-rank matrix decomposition	WANG Xue, JIN Wu-yin(2955)
3D reconstruction of CT image based on MC-E algorithm	LI Yi-min, WANG Bao-zhu, LIU Cui-xiang, et al(2959)
Pedestrian detection based on HOG-CSLBP and YOLOv2	XU Shou-kun, QIU Liang, LI Ning, et al(2964)
Facial expression recognition based on cross-connect feature fusion network	HUANG Qian-lu, WANG Qiang(2969)
Face recognition method based on subsegment segmentation	WANG Xiao-wei(2974)
Application of SegNet in surface defect detection of workpieces ...	GUO Ya-ping, GU Zhi-cong, PENG Hong-jing(2979)

Intelligent Technology

Short text clustering based on word vector and incremental clustering	YANG Bo, YANG Wen-zhong, YIN Ya-bo, et al(2985)
Malicious URLs detection based on CNN and multiple classifiers	ZHANG Hui, QIAN Li-ping, WANG Li-dong, et al(2991)
Theoretical simulation on noise reduction and recognition of mitral heart sound signal	ZHOU Ke-liang, WANG Jia-jia(2996)
Short-term power load interval forecasting based on improved particle swarm optimization and Gaussian process regression	REN Li-qiang, ZHANG Li-min, WANG Hai-peng, et al(3002)
Sentiment analysis based on piecewise convolutional neural network combined with features	ZHOU Yong-dong, ZHANG Yun, CAO Yan-rong, et al(3009)
Deep learning siamese networks for object tracking	WANG Jun-ling, WANG Shuo-hao(3014)
Multi-agent task assignment based on differential evolution algorithm	XIONG Yuan-wu, ZHAO Ling-zhong, ZHAI Zhong-yi(3020)
Human behavior recognition model based on multi model fusion	YU Wan-li, WEI Yu-mei, LI Lu-qun(3030)
Construction method of sentiment lexicon for photography reviews	LIU Ya-qiao, LU Xiang-yan, DENG Kai-kai, et al(3037)
Airframe damage region division based on structural tensor feature neighborhood	SHI Li-zhong, CAI Shu-yu(3043)

Developments and Appications

Test case generation method based on MCDC	TANG Jia-ying, MU Yong-min(3049)
Tourists' preference learning method based on travel behavior	SUN Lei, BIN Chen-zhong, GU Tian-long, et al(3056)

《计算机工程与设计》杂志投稿须知简则

《计算机工程与设计》是国家级正式出版物,由中国航天科工集团有限公司主管、七〇六所主办的中国计算机技术领域的学术性期刊,是中国计算机学会会刊、中国宇航学会会刊,入选北大中文核心期刊、中国科技核心期刊,被国内外多家重要检索机构和数据库收录。主要栏目:网络与通信技术、信息安全技术、嵌入式系统工程、软件与算法、多媒体技术、仿真技术、智能技术、开发与应用、体系结构与外围设备。

投稿要求:

(1) 题目(不超过20个字,要求中、英文);(2) 作者(姓名、单位、E-mail,要求中、英文);(3) 摘要(200字左右,要求中、英文),关键词(5-8个,要求中、英文);(4) 中图法分类号(根据关键词,从《中国图书馆分类法》中查找);(5) 正文(论文结构要完整、论点明确、论据可靠、论证合理、层次分明、可读性强;论文篇幅要求(含图、表)7000字符以上;插图要清晰,非扫描图和彩色图,要有图名、图序,并按文中出现的顺序排序编号;表格采用三线表,要有表名、表序,并按在文中出现的顺序排序编号);(6) 参考文献(按在文中引用的顺序排序编号,未公开发表的资料请勿引用,请严格按出版要求著录);(7) 全部作者简介(姓名(出生年-),性别,出生地,学历、学位/职称,研究方向等);(8) 基金资助机构名称+项目编号。

注意事项:

(1) 来稿未在任何正式出版物上刊载过的原创性论文,禁止一稿多投;投稿时在第一页注明:稿件内容属作者科研成果,引用他人成果已注明出处,署名和顺序无争议。(2) 稿件不泄露国家秘密及单位商业和科研秘密,作者须提供所属单位的保密审查证明。(3) 在本刊刊登的稿件,将同时以印刷版、光盘版和网络版等方式发布;编辑部酌付稿酬,作者著作权使用费同刊物稿酬一次性付给。如果您对此有异,请另投他刊。(4) 本刊未委托任何单位、机构及个人征稿,作者谨防上当受骗。

投稿方法:

(1) 本刊网站 www.china-ced.com 在线投稿,或 ced@china-ced.com 投稿。(2) 提供作者姓名、通信地址和邮编、E-mail、电话,以便联系。(3) 投稿后,2-7个工作日内可在登记邮箱中查收初审结果。。

计算机工程与设计

(月刊,1980年创刊)

第40卷第10期(总第394期)2019年10月16日

Computer Engineering and Design

(Monthly,Started in 1980)

Vol. 40 No. 10 (Sum No. 394) 2019/10/16

主管单位	中国航天科工集团有限公司	Authorized by:	China Aerospace Science and Industry Corporation Limited
主办单位	中国航天科工集团二院 706 所	Sponsored by:	Institute 706 Second Academy of CASIC
主 编	汤铭端	Chief Editor:	TANG Ming-duan
编辑出版	《计算机工程与设计》编辑部	Edited&Published by:	Editorial Dept of Computer Engineering & Design
通信地址	北京 142 信箱 37 分箱,100039	Address:	P. O. Box 142-37, Beijing, 100039, China
电 话	010-68389884	Telephone:	8610-68389884
网 址	www.china-ced.com	Web Site:	http://www.china-ced.com
电子信箱	ced@china-ced.com	E-mail:	ced@china-ced.com
印刷装订	北京科信印刷有限公司	Printed by:	Beijing Kexin Printing Co., Ltd.
总发行处	北京市报刊发行局	Distributed by:	Beijing Bureau for Distribution of Newspapers and Journals
订 购 处	全国各邮电局	Domestic:	All Local Post Offices in China

国际标准刊号:ISSN 1000-7024

公开发

邮发代号:82-425

国内统一刊号:CN 11-1775/TP

国内定价:38元/册

基于关键处理过程的机载三通道 SAR-GMTI 算法验证

曾乐天^{1,2}, 边磊¹, 杨春晖¹, 赵跃龙²

(1. 工业和信息化部电子第五研究所 软件质量工程研究中心, 广东 广州 510610;

2. 华南理工大学 计算机科学与工程学院, 广东 广州 510640)

摘要:为解决现有方法无法充分验证合成孔径雷达-地面动目标检测 (SAR-GMTI) 算法的问题, 提高信号处理软件测试的有效性, 提出基于关键处理过程的 SAR-GMTI 算法验证方法。介绍机载三通道 SAR-GMTI 回波信号模型及算法处理流程, 分析算法验证应注意的问题; 在此基础上, 通过点目标仿真, 验证算法在输入可控条件下的性能; 利用实测数据从真实场景这一维度对算法进行验证, 有效补充点目标仿真的不足。通过仿真实验和实测数据实验, 验证了所提方法的正确性与有效性。

关键词: 合成孔径雷达; 地面动目标检测; 算法验证; 点目标仿真; 实测数据处理

中图法分类号: TP311.5 **文献标识号:** A **文章编号:** 1000-7024 (2019) 10-2908-06

doi: 10.16208/j.issn1000-7024.2019.10.029

Validation of airborne three-channel synthetic aperture radar-ground moving target identification algorithms based on critical processing procedures

ZENG Le-tian^{1,2}, BIAN Lei¹, YANG Chun-hui¹, ZHAO Yue-long²

(1. Software Quality Engineering Center, The Fifth Electronic Research Institute of Ministry of Industry and Information Technology, Guangzhou 510610, China; 2. School of Computer Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: To solve the problem that existing methods can only perform a degree of validation for synthetic aperture radar-ground moving target identification (SAR-GMTI) algorithms, a validation method based on critical processing procedures was presented for improving the effectiveness of the signal processing software testing. The echo data model of airborne three-channel SAR-GMTI and its processing procedures were described. The questions that should be paid attention to were analyzed, based on which the performances of the SAR-GMTI algorithms were verified under controllable-input circumstance via point target simulation. Real data processing was utilized to supplement the deficiencies of point target simulation from a real scenario perspective, implementing a comprehensive verification for SAR-GMTI algorithms. Several simulation and real data processing results were presented to demonstrate the validity and effectiveness of the proposed approach.

Key words: synthetic aperture radar (SAR); ground moving target identification (GMTI); algorithm validation; point target simulation; real data processing

0 引言

如何高效地检测出运动目标、确定目标运动速度及其

位置并对这些动目标进行成像是合成孔径雷达-地面运动目标检测 (synthetic aperture radar-ground moving target identification, SAR-GMTI)^[1-6] 和成像的主要任务。SAR-GMTI

收稿日期: 2018-12-03; 修订日期: 2019-01-24

基金项目: 中国博士后科学基金项目 (2017M622621)

作者简介: 曾乐天 (1988-), 男, 河南信阳人, 博士, 工程师, 研究方向为雷达成像、雷达软件测试、质量与可靠性; 边磊 (1983-), 男, 北京人, 硕士, 工程师, 研究方向为嵌入式软件、软件工程; 杨春晖 (1965-), 女, 湖南邵阳人, 博士, 研究员级高级工程师, CCF 高级会员, 研究方向为软件测试、质量与可靠性; 赵跃龙 (1958-), 男, 湖南湘潭人, 博士, 教授, 研究方向为智能信息处理系统、计算机应用。E-mail: zengletian491@163.com

算法在 SAR 系统信号处理软件中所占比重较高, 其性能的优劣将直接影响 SAR 系统功能、性能等的正常发挥。因此, 对 SAR-GMTI 算法进行有效验证是 SAR 系统信号处理软件测试^[7-9]的核心环节, 也是保障 SAR 系统软件质量的重要手段。

目前, 对 SAR-GMTI 算法的验证, 主要根据黑盒测试^[10-12]的思想, 借助实际装备, 回放信号处理的部分过程, 并通过在特定界面上观察算法处理的最终结果, 间接验证算法实现的正确性及其处理性能。然而, 该方法只能对 SAR-GMTI 算法进行一定程度的验证。

针对雷达信号处理软件中 SAR-GMTI 算法的验证不充分这一问题, 本文首先分析了机载三通道 SAR-GMTI 算法的原理, 并通过点目标仿真实验, 分别验证在理想情况和加噪声情况下, 算法实现的正确性及处理性能。然后, 通过实测数据处理实验, 结合动目标测速、定位和成像的效果, 验证算法在真实场景下的实际处理性能。该方法从点目标仿真和真实场景处理两个维度出发, 利用可量化的评价指标, 实现对 SAR-GMTI 算法的全面、有效验证。最后, 通过仿真实验和实测数据, 验证了该方法的正确性和有效性。

1 机载三通道 SAR-GMTI 回波信号模型及算法流程分析

机载三通道 SAR-GMTI 系统与运动点目标的几何关系模型如图 1 所示, 以合成孔径 MN 的中点 A 为原点建立平面直角坐标系 NAR。载机以速度 v 沿 X 轴正方向做匀速直线运动, 定义载机经过 A 的时刻为方位慢时间 t_m 的零时刻, 即 $t_m = 0$ 。三通道天线采用一发三收的工作方式, 从左到右 3 根天线的坐标分别为 $(x_m + d_1, 0)$ 、 $(x_m + d_2, 0)$ 和 $(x_m + d_3, 0)$ 。为便于信号模型的讨论, 采用等效相位中心原理进行分析, 令天线沿 X 轴以间距 d 均匀排列, 则 $d_1 = -d$, $d_2 = 0$, $d_3 = d$ 。场景中心点 O 的坐标为 $(0, R_b)$, R_b 表示载机到场景中心线的距离, 则对于场景中的任一目标 $P(P_a(t_m), P_r(t_m))$, 通道 i 对应的载机到 P 的瞬时斜距可表示为

$$R_i(t_m) = \sqrt{(x_m + d_i - P_a(t_m))^2 + (R_b + P_r(t_m))^2} \quad (1)$$

$$P_a(t_m) = X_0 + v_{a0}(t_m - t_c) + \frac{1}{2}a_{a0}(t_m - t_c)^2 \quad (2)$$

$$P_r(t_m) = r_0 + v_{r0}(t_m - t_c) + \frac{1}{2}a_{r0}(t_m - t_c)^2 \quad (3)$$

其中, $P_a(t_m)$ 和 $P_r(t_m)$ 分别表示动目标的横向和径向瞬时位置坐标, t_c 为载机与动目标位于同一方位位置的方位时刻, X_0 和 r_0 为动目标在 $t_m = t_c$ 时的方位和距离位置, v_{a0} 和 v_{r0} 分别为动目标的横向速度和径向速度, a_{a0} 和 a_{r0} 分别为动目标的横向加速度和径向加速度。

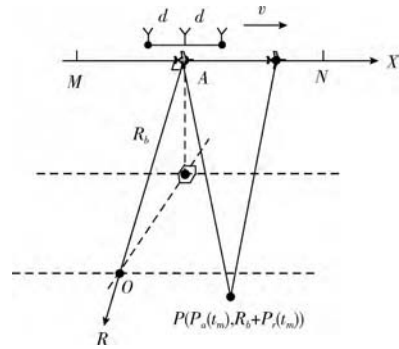


图 1 机载三通道 SAR-GMTI 几何模型

假设雷达发射的线性调频信号 (linear frequency modulation, LFM) 信号为 $s(\tau) = a_r(\tau) \exp[j\pi\gamma\tau^2]$, γ 和 τ 分别是发射信号的调频率和距离向快时间, $a_r(\cdot)$ 是发射信号的距离窗函数。则通道 i 接收的运动目标 P 的基带回波信号为

$$s_i(\tau, t_m) = \sigma_i a_r(\tau - 2R_i(t_m)/c) a_a(t_m) \exp[j\pi\gamma(\tau - 2R_i(t_m)/c)^2] \exp[-j\frac{4\pi}{\lambda}R_i(t_m)] \quad (4)$$

其中, σ_i 和 $a_a(\cdot)$ 分别为动目标的后向散射系数和雷达回波信号的方位窗函数, c 为真空下的光速, λ 为信号波长。

由于运动目标是非合作的, 其运动信息未知, 将其作为静止目标进行 SAR 成像处理, 将导致动目标成像结果出现散焦效应, 从而降低运动目标的检测性能, 并进而影响其成像效果和定位精度。实际中, 动目标检测、成像和定位方法主要包含 4 个部分: ①杂波抑制, 利用天线相位中心偏置 (displaced phase center antenna, DPCA) 技术^[4]来实现有效的杂波抑制; ②动目标检测和提取; ③动目标成像; ④动目标精确定位。

(1) 杂波抑制

SAR 实现对地面静止目标的高分辨成像, 而 GMTI 可以看作是对运动目标的 SAR 成像。对于 GMTI 而言, 静止目标就是杂波, 欲对动目标进行提取、测速和定位, 必须首先滤除杂波的影响。在有效抑制静止目标的杂波、保留动目标信息方面, 多通道 SAR-GMTI 系统具有比单通道 SAR-GMTI 系统更好的性能。因此, 如何从强背景杂波中分离出动目标信号, 是多通道 SAR-GMTI 处理的重要环节。常用的杂波抑制方法主要有 DPCA、空时自适应处理、沿迹干涉等。在进行 SAR-GMTI 信号处理软件测试时, 必须对杂波抑制方法的性能进行验证。

通常, 在低信噪比情况下, 还应对距离压缩后的动目标信号做方位压缩处理, 以进一步提高动目标信号的信噪比和检测性能。

(2) 动目标检测和提取

杂波抑制后的动目标检测和提取, 请参见文献 [2]。

(3) 动目标成像

当运动目标的速度较小且 SAR 图像分辨率较低时,可忽略越距离单元走动^[3]对图像聚焦性能的影响。然而,在运动目标速度较大时或者 SAR 图像分辨率较高的情况下,快速运动目标径向速度分量会引起越距离单元徙动、方位多普勒模糊以及干涉相位模糊,动目标能量会分散到多个距离单元,同时沿航向速度分量引起多普勒调频率的变化,转换到图像域时,会导致回波信号不能得到相干积累,动目标在方位向上严重散焦,信噪比极低,而且在径向及横向均偏离其真实位置,影响目标检测与定位,需对动目标进行聚焦操作。

一般来说,首先对运动目标进行径向运动补偿,即通过信号包络的校正及其方位频谱偏移的矫正,实现对动目标的初步定位;然后,对运动目标做横向运动补偿,实现动目标在方位向的聚焦。

综上,对检测到的目标进行成像是运动目标识别的基础,动目标的聚焦效果越好,其信号的信噪比越高,对动目标的定位也就越有利。因此,在 SAR-GMTI 信号处理软件测试时,动目标的聚焦效果是评价 SAR-GMTI 算法性能的一个重要内容。

(4) 动目标精确定位

在实际中,动目标径向速度和方位高次相位的估计和补偿,往往存在一定程度的误差,不可避免地影响动目标定位的精度。可利用动目标成像处理后的干涉相位信息,进一步补偿定位误差,使得动目标最终聚焦位置为其在 SAR 图像中的真实位置。此处,在 SAR-GMTI 信号处理软件测试时,可结合动目标聚焦效果,并根据动目标最终的实际聚焦位置,判断其定位效果。

2 基于关键处理过程的 SAR-GMTI 算法验证

在对机载三通道 SAR-GMTI 回波信号模型、动目标成像和定位方法流程进行分析的基础上,本部分从理想情况下的点目标仿真、加噪声情况下的点目标仿真以及实测数据处理 3 个方面,实现对信号处理软件中 SAR-GMTI 算法的全面验证。

点目标仿真是在 SAR 平台运动状态已知的情况下,给出对应点在场景模型中的坐标而不考虑其电磁特性以及几何形状,通过仿真获得动目标 SAR 回波数据并对其进行处理的过程。点目标仿真能够精确控制信号的输入,定制产生不同距离、速度等参数的目标,并清晰地反映 SAR-GMTI 算法处理过程中存在的问题,定量评价目标的速度测量、聚焦效果和定位精度,对于 SAR-GMTI 算法的验证具有非常重要的意义。

2.1 理想情况下的点目标仿真

理想情况下的点目标仿真是指当 SAR 平台做匀速直线运动时采集地平场景的动目标回波数据,并通过 SAR-GMTI 算法的处理,验证该算法对动目标速度、成像及定

位等的处理效果。此处,我们采用改进的同心圆算法^[13]灵活、高效地生成所需的 SAR-GMTI 回波数据。

理想情况下的点目标仿真验证主要包括以下 3 个方面:

(1) 速度估计精度

在 SAR-GMTI 模式下,机载雷达一般设计为中低重频,当目标速度较大时,动目标的多普勒频谱会发生折叠,造成脉冲重复频率(pulse repetition frequency, PRF)模糊现象^[3],严重影响动目标的测速和定位。根据是否存在 PRF 模糊现象,将动目标分为快速目标和慢速动目标。因此,在动目标检测与提取之后,需要验证是否存在快速目标。通过对比估计的动目标速度和仿真时预设的速度值,并结合其重聚焦效果,判断速度估计的精度。

(2) 动目标重聚焦效果

动目标重聚焦效果的评价指标包括主要包括 3 个方面:峰值旁瓣比(pulse side-lobe ratio, PSLR)、积分旁瓣比(integrated side-lobe ratio, ISLR)和脉冲响应宽度(impulse response width, IRW),即 3 dB 带宽。PSLR 是指点目标 IRF 第一副瓣的能量与主瓣的能量之比,用分贝(decibel, dB)表示,即

$$PSLR = 10 \lg \frac{\int_{first-side-lobe} |h_{IRF}(Y_1 - y_1, X_1 - x_1)|^2 dx}{\int_{main-lobe} |h_{IRF}(Y_1 - y_1, X_1 - x_1)|^2 dx} \quad (5)$$

ISLR 是指点目标 IRF 所有副瓣的能量与主瓣的能量之比,也用分贝(dB)表示,即

$$ISLR = 10 \lg \frac{\int_{side-lobe} |h_{IRF}(Y_1 - y_1, X_1 - x_1)|^2 dx}{\int_{main-lobe} |h_{IRF}(Y_1 - y_1, X_1 - x_1)|^2 dx} \quad (6)$$

其中, $h_{IRF}(Y_1 - y_1, X_1 - x_1)$ 表示点目标的脉冲响应函数。对于窄带 SAR 系统来说,对点目标成像后,其距离向脉冲响应函数(impulse response function, IRF)和方位向 IRF 的 PSLR 和 ISLR 的标准值均分别在 -13.25 dB 和 -9.98 dB 左右。

(3) 动目标定位精度

根据动目标在图像中的最终聚焦位置与仿真实验的预设值进行比较,可获得动目标的定位误差。

2.2 加噪声情况下的点目标仿真

加噪声情况下的点目标仿真可用于验证 SAR-GMTI 算法对存在噪声的回波数据的处理性能,即该算法对于噪声影响的稳健性程度。实际上, SAR 采集的回波数据包含杂波、噪声、干扰等成分,信号处理过程中很重要的一部分就是滤除杂波、噪声及干扰的影响,并提取感兴趣的信号成分。因此,加噪声情况下的点目标仿真是对真实场景下 SAR-GMTI 算法性能进行的一定程度的模拟和验证。

此处,同样采用改进的同心圆算法快速生成所需的运动点目标 SAR 回波数据,并对其添加一定信噪比的噪声。采用与“2.1 理想情况下的点目标仿真”相同的方法,评价

算法对动目标速度、成像及定位等的处理效果, 并在一定程度上验证 SAR-GMTI 算法的稳健性和适应性。

2.3 实测数据处理验证

通常, 在点目标仿真结果符合理论推导且未见异常的情况下, 才进行实测数据处理, 以便对 SAR-GMTI 算法进行进一步验证。实测数据是指 SAR 系统在实际飞行中采集的 SAR 回波数据。在实测数据采集过程中, SAR 系统的真实运动状态是未知的, 只能通过全球定位系统/惯性导航系统进行一定程度的测量。此外, 相比于仿真数据, 外部环境如噪声、杂波、干扰等, 对回波信号的影响是未知的, 致使真实的回波信号成分未知, 在信号处理过程中系统的输入是不可控的。采用 SAR-GMTI 算法处理实测数据, 本质上是对算法在真实场景中进行的验证。

然而, 平台的不平稳运动且运动误差未知、回波信号的信噪比受 SAR 系统性能影响以及杂波抑制性能差等因素, 致使某些算法在点目标仿真的情况下呈现出良好的效果, 但一旦用于实测数据处理, 算法性能会受到严重影响, 稳健性较差。这是 SAR-GMTI 算法处理实测数据时最容易出现的问题。因此, 实测数据处理是对采用输入可控的点目标仿真以验证算法性能这一“静态测试”维度的有效补充, 是检验 SAR-GMTI 算法性能的重要手段, 也是判断 SAR-GMTI 算法稳健性的直接依据。

实测数据处理验证主要包括以下 4 个方面:

(1) 通道对消后的杂波抑制性能

在杂波抑制前, 选取图像中的某一杂波区域, 并计算平均幅度, 记为 A_B ; 在杂波抑制后, 选取图像中的同一杂

波区域, 计算其平均幅度, 记为 A_A 。使用杂波抑制前的平均幅度 A_B 除以杂波抑制后的平均幅度 A_A , 即可获得通道对消后的杂波抑制性能。根据经验, 杂波抑制之后的平均幅度与杂波抑制之前的平均幅度之比应在 10 dB 以上。杂波抑制后, 需要对动目标回波信号进行成像和定位处理。

(2) 速度估计精度

在动目标检测与提取之后, 通过估计动目标的径向速度和横向速度, 对动目标进行成像。可根据动目标重聚焦效果判断速度估计的性能, 此外, 还可以根据重聚焦后图像的熵值、对比度等指标, 对速度进行进一步的调优处理, 以获得更好的重聚焦效果和更精确的定位结果。

(3) 运动目标的重聚焦效果

对于图像中运动目标的聚焦效果的评价, 通常是从图像中提取该目标所在距离单元的部分区域, 进行插值处理, 得到方位向 IRF, 并计算该目标的 PSLR、ISLR 以及 IRW。由于对实测数据进行距离脉压、方位脉压等操作时, 通常采用加锐化窗^[1]的方式抑制实测数据中噪声、杂波等因素的影响, 这会导致动目标分辨率存在一定程度的下降。一般情况下, PSLR 和 ISLR 的数值分别在 -20 dB 和 -17 dB 以下。

(4) 运动目标的定位结果

通常根据所得运动目标的最终位置是否与实际情况相符来判断该运动目标的定位结果是否正确。例如, 对高速公路上运动的汽车进行定位, 其最终位置应在公路上, 而非公路以外的其它场景处。

综上, 机载三通道 SAR-GMTI 算法验证的处理流程如图 2 所示。

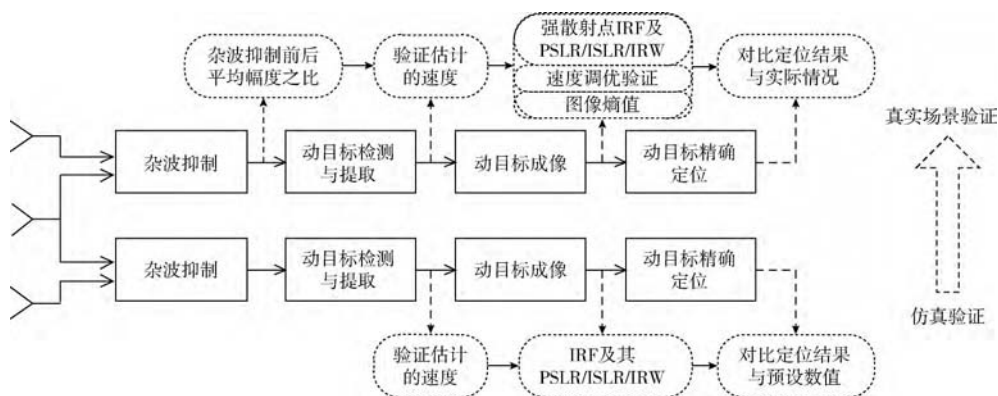


图 2 机载三通 SAR-GMTI 算法验证的处理流程

3 实验结果

本部分通过仿真实验和实测数据处理实验, 验证本文所提方法能够较好地用于 SAR-GMTI 算法的验证。

3.1 理想情况下的点目标仿真实验

在本实验中, SAR 平台的仿真参数如表 1 所示。方位天线均匀分为 3 个子阵, 中间子阵发射信号, 所有子阵接

收信号。仿真场景中有两个动目标 (P1、P2、P3) 和一个位于场景中心处的静止目标, 其中, P1、P2、P3 的横向速度和径向速度分别为 (5 m/s, 10 m/s)、(8 m/s, -12 m/s) 和 (6 m/s, 5 m/s)。图像的距离维分辨率和方位维分辨率理论值分别为 3 m 和 2.8 m。采用改进的同心圆法^[13]生成 3 个目标回波数据。经过距离脉压操作, 得到如图 3 (a) 所示的距离脉压结果。采用 DPCA 技术, 对相邻通道进行两

两对消, 所得结果如图 3 (b) 所示。可见, 静止目标得到较好抑制, 动目标信号得以保留。

表 1 SAR 平台的仿真参数

参数	载频 /GHz	脉冲宽 度/ μs	信号带 宽/MHz	采样率 /MHz	速度 /($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	斜距 /km	PRF /Hz
数值	10	6	50	80	130	60	400

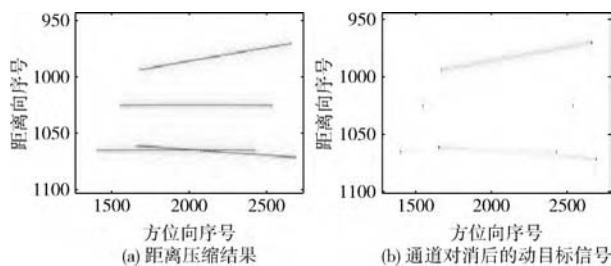


图 3 杂波抑制前后结果

采用 SAR-GMTI 算法对 P_3 进行重聚焦处理, 所得动目标成像后放大的结果和等高线 (contour) 图分别如图 4 (a) 和与图 4 (b) 所示。分别对 P_1 、 P_2 、 P_3 重聚焦后的成像结果进行二维插值操作, 得到其距离维 IRF 和方位维 IRF 的 PSLR、ISLR 和 IRW, 见表 2。3 个动目标的 PSLR、ISLR 均位于其标准值附近, 且其 IRW 均接近相应的理论值, 说明 SAR-GMTI 算法对 3 个动目标运动参数的估计具有良好效果, 且该算法在理想情况下具有良好性能。

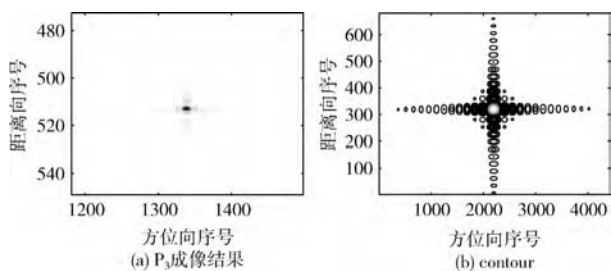


图 4 动目标 P_3 重聚焦结果

表 2 动目标成像结果分析

目标	距离向			方位向		
	PSLR /dB	ISLR /dB	IRW /m	PSLR /dB	ISLR /dB	IRW /m
动目标 P_1	-13.21	-10.11	2.58	-12.93	-9.90	2.48
动目标 P_2	-13.25	-10.06	2.58	-12.86	-9.64	2.44
动目标 P_3	-13.27	-10.07	2.58	-13.09	-9.83	2.48

3.2 加噪声情况下的点目标仿真实验

采用与 3.1 相同的 SAR 平台仿真参数及动目标运动参数, 对产生的三通道运动目标回波数据分别加信噪比 (SNR) 为 -10 dB 的加性高斯白噪声, 采用与 3.1 相同的

处理算法进行距离脉压及通道的两两对消操作, 分别对动目标 P_3 进行重聚焦处理, 所得动目标 P_3 重聚焦后放大的结果如图 5 (a) 和图 5 (b) 所示。分别对 P_1 、 P_2 、 P_3 重聚焦后的成像结果进行二维插值操作, 得到其距离维 IRF 和方位维 IRF 的 PSLR、ISLR 和 IRW, 如表 3 所示。显然, 在加性高斯白噪声条件下, 3 个动目标的 PSLR、ISLR、IRW 与理想情况下各自的数值存在较小的差异, 聚焦效果略有下降, 说明该 SAR-GMTI 算法对加性高斯白噪声具有较好的稳健性和适应性。

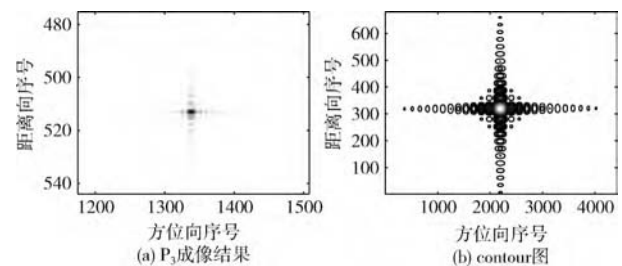


图 5 动目标 P_3 重聚焦结果

表 3 SNR=-10 dB 时的动目标成像结果分析

目标	距离向			方位向		
	PSLR /dB	ISLR /dB	IRW /m	PSLR /dB	ISLR /dB	IRW /m
动目标 P_1	-13.24	-10.13	2.58	-12.91	-9.90	2.48
动目标 P_2	-13.26	-10.06	2.58	-12.64	-9.65	2.44
动目标 P_3	-13.27	-10.07	2.58	-13.06	-9.83	2.48

3.3 实测数据处理实验

本实验数据为某所在试飞期间录取的机载三通道 GMTI 回波数据, 飞机飞行速度约 110 m/s。雷达工作在 X 波段、条带模式, 方位维通道数为 3, 天线工作方式中间子阵发射信号, 全部通道同时接收回波信号, 回波信号覆盖了包含较多运动目标的高速公路区域。采用 DPCA 技术对采集的 SAR 回波信号进行杂波抑制, 并对杂波抑制后的结果进行粗聚焦以提高运动目标的信噪比, 最终实现对动目标的检测。

图 6 (a) 为原始 SAR-GMTI 回波数据距离脉压后的结果, 图 6 (b) 为进行杂波抑制后的结果。从直观上看, 静止的场景目标即杂波得到了较好的抑制, 取图 6 (b) 中矩形虚线框内的目标区域, 经计算, 其在杂波抑制前的平均幅度与杂波抑制后的平均幅度之比为 13.64 dB, 满足大于经验值 10 dB 的要求。

图 7 (a) 表示静止场景及重聚焦后的动目标成像结果, 取椭圆框中重聚焦后的动目标信号所在的部分方位单元和距离单元, 进行插值处理, 得到其距离维 IRF 剖面图和方位维 IRF 剖面图, 分别如图 7 (b) 和图 7 (c) 所示。经计

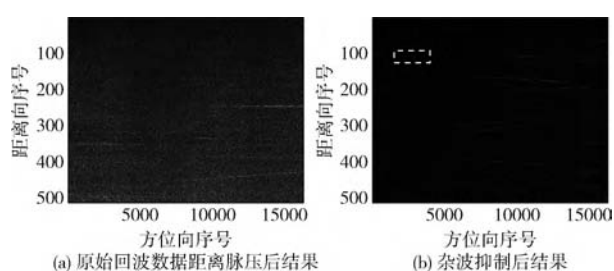


图6 杂波抑制前后结果

算, 该动目标的距离维 PSLR 和 ISLR 分别为 -20.24 dB 和 -17.50 dB, 方位维 PSLR 和 ISLR 分别为 -16.57 dB 和 -12.40 dB, 这是因为在实际处理过程中, 需添加窗函数对回波信号的副瓣进行抑制, 造成距离维 IRF 和方位维 IRF 主瓣展宽, 压低了 PSLR 和 ISLR 的数值。但方位维 PSLR 和 ISLR 分别与其各自的标准值 (-20 dB 以下和 -17 dB 以下) 相差较大, 说明该 SAR-GMTI 处理算法存在一定的问题, 对动目标的方位聚焦效果不佳。需要结合实际情况进行分析, 通过算法仿真等手段发现问题, 并对算法提出改进或对其适用范围进行约束。

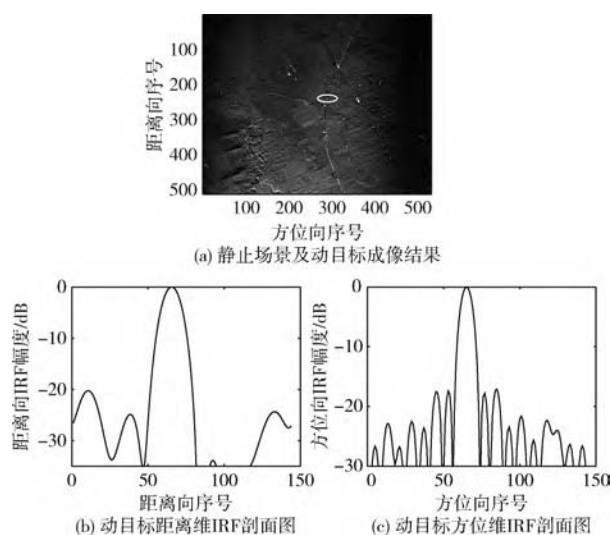


图7 成像结果

4 结束语

本文提出了一种基于关键处理过程的、用于机载三通道 SAR-GMTI 算法验证的方法, 在分析回波信号模型和 SAR-GMTI 算法处理流程的基础上, 分别从点目标仿真 (即输入可控, 对真实场景进行一定程度的模拟) 和实测数据处理 (即真实场景) 两个维度, 采用可量化的评价指标, 对 SAR-GMTI 算法进行全面、有效验证, 显著提高了信号处理软件中 SAR-GMTI 算法验证的充分性, 获得了良好效果, 并为以算法验证为主要组成部分的雷达信号处理软件

测试提供有益的参考。

参考文献:

- [1] Chen KS. Principles of synthetic aperture radar imaging: A system simulation approach [M]. 1st ed. Boca Raton: CRC Press, 2015: 19-50.
- [2] Zhang Sheng, Zhou Fang, Sun Guangcai, et al. A new SAR-GMTI high-accuracy focusing and relocation method using instantaneous interferometry [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2016, 54 (9): 5564-5577.
- [3] LI Xueshi. Study on high-resolution wide-swath SAR moving target processing method [D]. Xi'an: Xidian University, 2015: 19-54 (in Chinese). [李学仕. 高分辨率宽测绘带 SAR 动目标处理方法研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2015: 19-54.]
- [4] Yang Xiao, Wang Junfeng. GMTI based on a combination of DPCA and ATI [C] // IET International Radar Conference, 2015: 1-5.
- [5] Zhang Yuan, Sun Jinping, Lei Peng, et al. High-resolution SAR-based ground moving target imaging with defocused ROI data [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2016, 54 (2): 1062-1073.
- [6] Gierull C H, Sikaneta I, Cerutti MD. Improved SAR-GMTI via optimized crame-rao bound [C] // 10th European Conference on Synthetic Aperture Radar. Berlin: VDE, 2014: 670-673.
- [7] YANG Xiaohui. How to enhance the value of software testing [M]. 1st ed. Beijing: China Machine Press, 2017: 164-214 (in Chinese). [杨晓慧. 测试价值提升之路 [M]. 1 版. 北京: 机械工业出版社, 2017: 164-214.]
- [8] Cotroneo D, Pietrantuono R, Russo S. RELAI testing: A technique to assess and improve software reliability [J]. IEEE Transactions on Software Engineering, 2016, 42 (5): 452-475.
- [9] Garousi V, Felderer M. Worlds apart: Industrial and academic focus areas in software testing [J]. IEEE Software, 2017, 34 (5): 38-45.
- [10] Schaefer CJ, Do H. Model-based exploratory testing: A controlled experiment [C] // IEEE 7th International Conference on Software Testing, Verification and Validation Workshops. Cleveland: IEEE, 2014: 284-293.
- [11] Shahbazi A, Miller J. Black-box string test case generation through a multi-objective optimization [J]. IEEE Transactions on Software Engineering, 2016, 42 (4): 361-378.
- [12] Garousi V, Felderer M, Karapicak CM, et al. What we know about testing embedded software [J]. IEEE Software, 2018, 35 (4): 62-69.
- [13] Zeng Letian, Yang Chunhui, Wang Qiang, et al. A novel testing method for narrowband synthetic aperture radar (SAR) imaging algorithms [C] // International Conference on Dependable Systems and Their Applications. IEEE, 2017: 66-72.