

文章编号: 2095-4980(2022)02-0147-07

基于组件的雷达信号及数据处理仿真方法

刘晓斌, 吴其华, 赵 锋*, 艾小锋

(国防科技大学 电子科学学院电子信息系统复杂电磁环境效应国家重点实验室, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 不同体制雷达系统的信号及数据处理在共性功能模拟和特性功能刻画之间存在矛盾问题。基于组件化设计思想, 将雷达信号处理及数据处理仿真划分为天线模拟、目标回波功率计算、脉冲压缩、参数测量、航迹起始、跟踪滤波、调度策略等 28 个组件。通过参数选择实现不同体制雷达特性功能模拟组件的设置, 并对共性功能组件复用, 实现了相控阵、机扫、无源探测等多种雷达体制的功能级仿真。对各组件进行功能测试, 验证了组件化设计方法的可行性。

关键词: 组件; 功能级仿真; 雷达系统; 雷达信号处理; 数据处理

中图分类号: TN955

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2021325

Component-based radar signal and data processing simulation method

LIU Xiaobin, WU Qihua, ZHAO Feng*, AI Xiaofeng

(State Key Laboratory of Complex Electromagnetic Environmental Effects on Electronics and Information System, National University of Defense Technology, Changsha Hunan 410073, China)

Abstract: There are contradictions between similarity and particularity when simulating the signal and data processing of different radar systems. Based on the component design, radar signal and data processing are divided into 28 components including antenna simulation, target echo power calculation, pulse compression, parameter measurement, trajectory start, tracking filter, scheduling strategy and so on. By choosing the parameter of radar type, the particularity radar function can be simulated. Meanwhile, the components of similarity radar function are reusable so that the phased array radar, mechanical scanning radar and passive radar are simulated in functional level. The components are tested to verify the effectiveness of the component design method.

Keywords: component; functional level simulation; radar system; radar signal processing; data processing

在雷达系统的设计、研发及测试中, 外场试验会使得研发时间、复杂度及成本居高不下。利用仿真技术, 对雷达系统的工作原理及性能进行仿真及测试, 可有效避免该问题。对雷达系统进行仿真, 主要有信号级仿真^[1]和功能级仿真^[2]两种方式。信号级仿真构建了雷达发射信号、目标回波及信号处理等的采样模型, 使得仿真粒度更为精细, 但带来的硬件需求和仿真资源也更为巨大^[3], 因而常采用分布式仿真系统解决该问题^[4]。功能级仿真一般不进行信号数据的采样和处理, 而是以回波采样数据的处理结果作为建模对象, 构建仿真流程, 在确保模拟逼真的前提下具备更好的实时性。

当前, 针对雷达系统进行功能级仿真的研究主要集中于相控阵雷达系统^[2]。随着雷达体制和雷达功能的日益多样, 不同雷达体制探测能力的分析和多种雷达探测信息的融合处理, 都要求仿真系统具备多种雷达体制模拟能力。而在雷达信号和数据处理中, 相控阵、机械扫描、无源探测等不同雷达体制具有通用的共性功能, 也存在差异性功能。因此, 对多种雷达体制构建仿真系统, 面临着特性刻画与共性凝练之间的矛盾问题。组件化设

收稿日期: 2021-09-02; 修回日期: 2021-10-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62001481; 61890542), 湖南省自然科学基金资助项目(2021JJ40686)。

*通信作者: 赵 锋 email:zhfbec@tom.com

计可以对具有相同特征的组件进行统一描述，最大程度地实现组件复用^[5]。因此，组件化^[6-7]是解决多种雷达体制仿真中矛盾问题的有效手段，一方面可以将雷达信号及数据处理的共性功能进行组件划分，另一方面，可以结合不同雷达系统的特点设计相应功能的组件。

本文以组件为基础，提出雷达信号及数据处理功能级仿真方法，设计实现了包括天线模拟、目标回波功率计算、脉冲压缩、参数测量、航迹起始、跟踪滤波、调度策略在内的 28 个组件，能够完成相控阵^[8]、机械扫描^[9]、无源探测^[10-11]等多种体制雷达系统的模拟。通过仿真测试，验证了各组件的功能。本文所设计的组件易于更新，可移植性好，可扩展性强，为进一步实现新型雷达功能模拟，提供了有效手段。

1 雷达信号处理功能级仿真组件化设计

1.1 信号处理的功能级仿真方法

雷达信号处理功能级仿真是根据某个功能的基本原理，将该功能的处理结果作为建模对象，实现相应信号处理效果的仿真。以雷达脉冲压缩功能级仿真为例，根据下式计算脉压增益：

$$G_{pc} = 10 \log_{10}(BT) \tag{1}$$

式中： B 为信号带宽； T 为信号脉宽。

然后，得到脉冲压缩之后的回波功率为：

$$P_r = 10^{G_{pc}/10} P_i \tag{2}$$

式中 P_i 为脉压之前的回波功率。利用 P_r 能够计算出信噪比，实现目标检测。可以发现，功能级仿真并不进行实际回波数据的采样，因而具有复杂度低、运行速度快等优势。

1.2 雷达信号处理组件划分及实现

雷达信号处理部分组件划分为天线模拟、综合信噪比计算、目标检测与参数测量 3 个组件库，如图 1 所示。各组件之间采用统一的接口进行参数及数据传递，根据雷达类型选择及参数设置，可分别实现不同雷达的天线模拟，进而利用不同雷达体制之间的共性特征，分别调用各组件库，实现机械扫描、相控阵等雷达信号处理的功能级仿真。

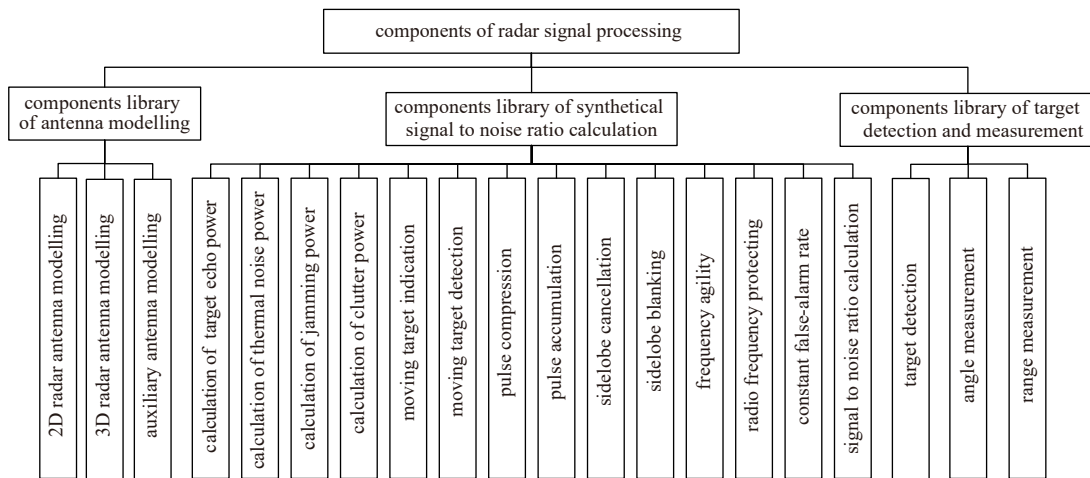


Fig.1 Component partition of radar signal processing
图 1 雷达信号处理组件划分

雷达信号处理的实现流程如图 2 所示，根据输入的雷达参数进行天线模拟，结合参数设置进行综合信噪比计算，将计算结果输入目标检测组件，若检测成功，则根据检测结果进行目标距离、角度等参数测量，得到目标点迹信息，输出至雷达数据处理部分进行处理。

2 雷达数据处理组件化设计

雷达数据处理部分组件划分如图 3 所示，包括资源调度组件库及航迹处理组件库。资源调度组件库包括波位

编排及调度策略两个组件。波位编排组件实现雷达对空域的划分，主要包括纵列波位编排及交错波位编排功能^[12]。调度策略^[13]组件则根据雷达事件的优先级，进行自适应资源调度安排。

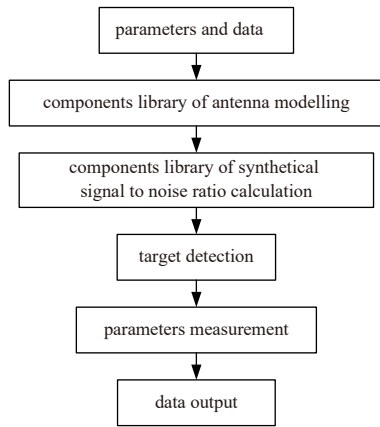


Fig.2 Radar signal processing based on components
图2 组件化雷达信号处理流程

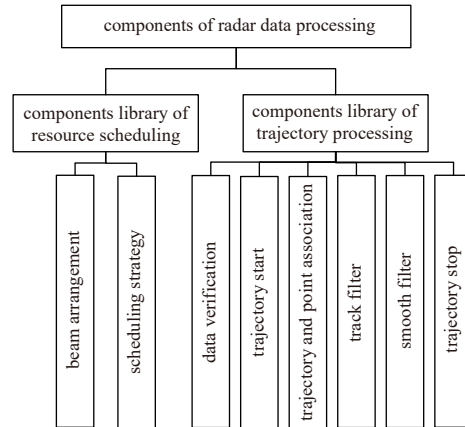


Fig.3 Component partition of radar data processing
图3 雷达数据处理组件划分

航迹处理组件库包括数据校验、航迹起始、点航迹关联、跟踪滤波、航迹滤波、航迹终结6个组件，其处理流程如图4所示。首先根据信号处理的输入点迹，进行数据校验。若不存在可靠航迹，则将点迹信息输入至航迹起始组件进行航迹起始判断；否则，则将点迹与可靠航迹进行点航迹关联，若关联成功则更新航迹，并进行跟踪滤波及平滑滤波。当航迹满足终结条件时，进行航迹终结操作。

与机械扫描雷达相比，相控阵雷达对航迹的处理需要区分阵面信息，且需要单独安排资源进行目标跟踪，因此，需要设置标志位实现不同体制雷达的航迹处理过程。另一方面，由于对航迹进行滤波的原理相同，在航迹处理组件库中设置统一的航迹数据接口，能够对滤波相关的组件进行复用，从而大大降低开发的工作量。

3 仿真结果

3.1 雷达信号及数据处理仿真平台

雷达信号及数据处理功能级仿真平台整体仿真框图如图5所示。其中战情模拟器、电磁环境模拟器及综合显示器作为雷达信号及数据处理仿真平台的外部支撑平台，分别提供战情设置、杂波及干扰环境模拟、目标点/航迹显示等功能。通过组件化设计，该仿真平台能够实现相控阵、一维机扫、一维机扫加俯仰相扫、无源探测四种类型的雷达体制模拟。

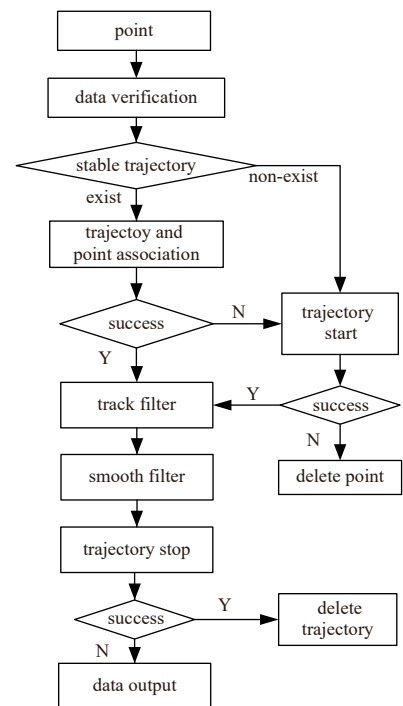


Fig.4 Flow chart of track processing
图4 航迹处理流程图

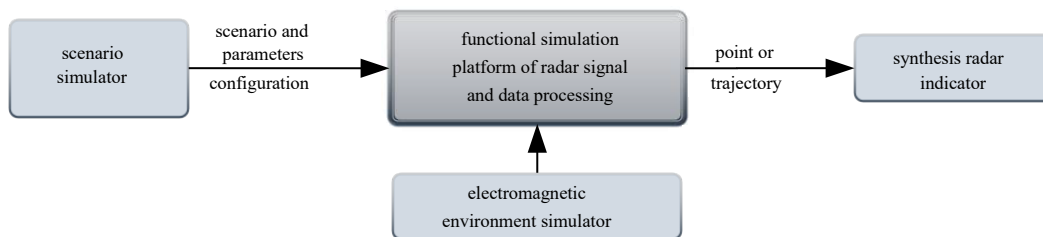


Fig.5 Simulation diagram
图5 仿真框图

3.2 雷达信号处理点迹测量仿真

以雷达旁瓣匿影为例，对信号处理的完整过程进行仿真。设置雷达类型为相控阵，目标由东向西飞行，飞行速度为 300 m/s。干扰机与目标并排飞行，设置干扰经纬度确保其信号由雷达旁瓣进入。干扰机产生的假目标距离间隔为 15 km，结果如图 6 所示。

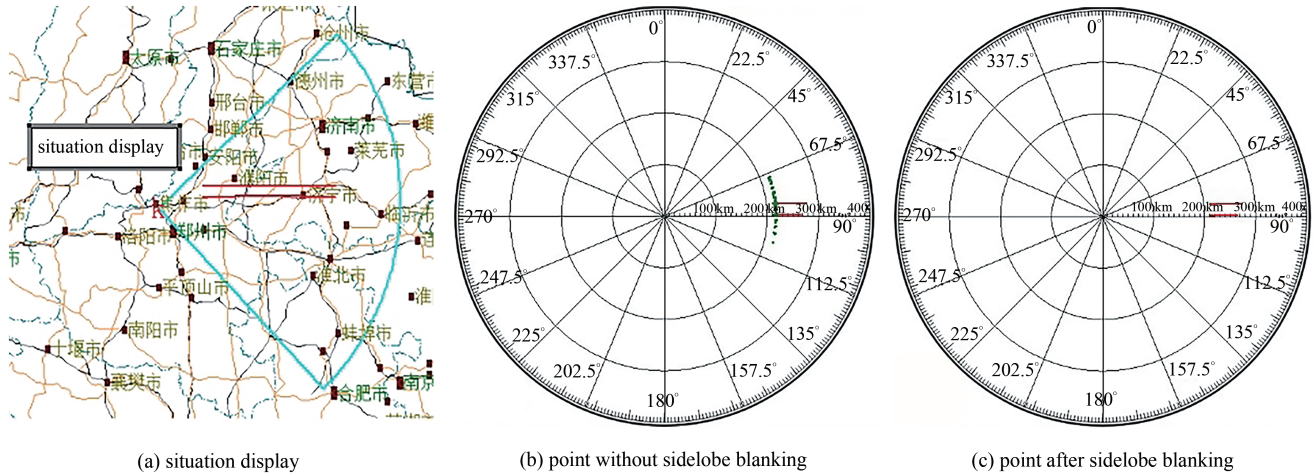


Fig.6 Point measurement results before and after sidelobe blanking
图 6 旁瓣匿影前后的点迹测量结果

不采用旁瓣匿影时，得到的点迹测量结果如图 6(b)所示，假目标干扰造成雷达旁瓣形成大量虚假点迹信息，从而影响目标判别。采用旁瓣匿影处理后，得到的点迹测量结果如图 6(c)所示，其中旁瓣的点迹信息被有效消除，验证了旁瓣匿影组件的有效性。

3.3 典型飞行场景雷达数据处理仿真及跟踪性能分析

对于交叉飞行场景，设置目标 1 起始位置为(117.27°E, 34.29°N)，终止位置为(114.27°E, 34.29°N)。目标 2 起始位置为(117.27°E, 34.09°N)，终止位置为(114.27°E, 34.59°N)，结果如图 7 所示。

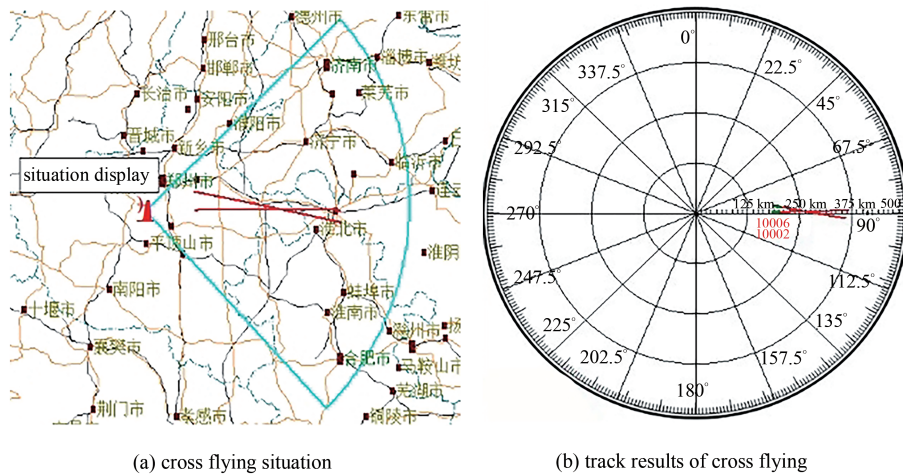


Fig.7 Situation of cross flying and track results
图 7 目标交叉飞行态势及雷达测量航迹结果

图 7(a)为交叉飞行的目标态势图，通过运行仿真系统，得到雷达测量的目标航迹如图 7(b)所示。根据测量航迹结果可以发现，两个目标在 250 km 附近出现交叉，且航迹显示清晰，与图 7(a)态势显示基本一致。

下面分析雷达的目标跟踪性能，将目标 1 的雷达站直角坐标测量值与目标实际值进行对比，得到测量误差如图 8 所示。

可以发现在目标刚刚被发现时，测量误差较大。随着目标与雷达之间的距离不断变小，测量误差逐渐减小，并最终达到 10 m 以内。测量误差与回波信噪比、雷达分辨率等指标均有关系。当目标距离雷达较远时，回波信噪比较小，测量误差较大；而分辨率则决定了雷达测量误差的下限。因此，航迹测量误差真实地反映

了雷达各参数与实际场景的关系，从而说明仿真系统各组件模型的准确性。

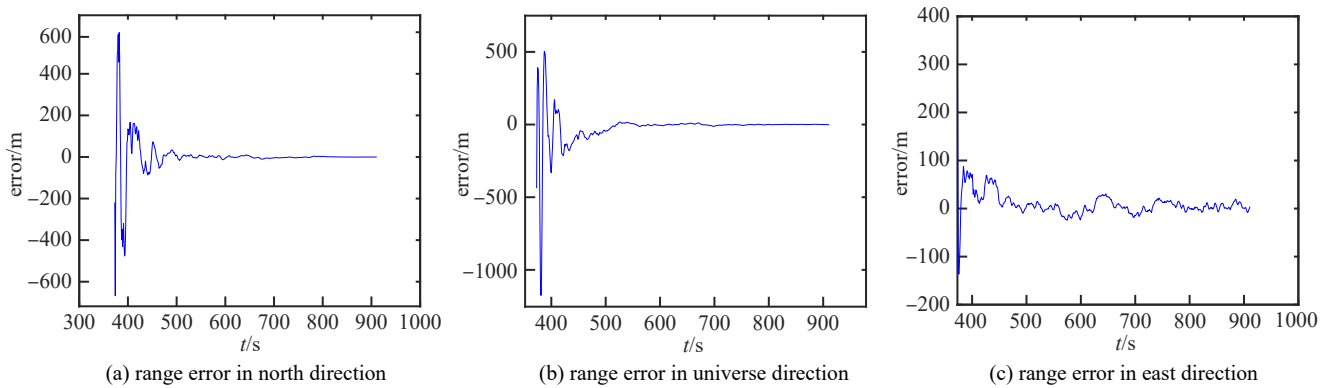


Fig.8 Constant speed target track performance
图 8 匀速运动目标跟踪性能

对于机动目标，设定目标进行转弯机动，得到跟踪性能如图 9 所示。

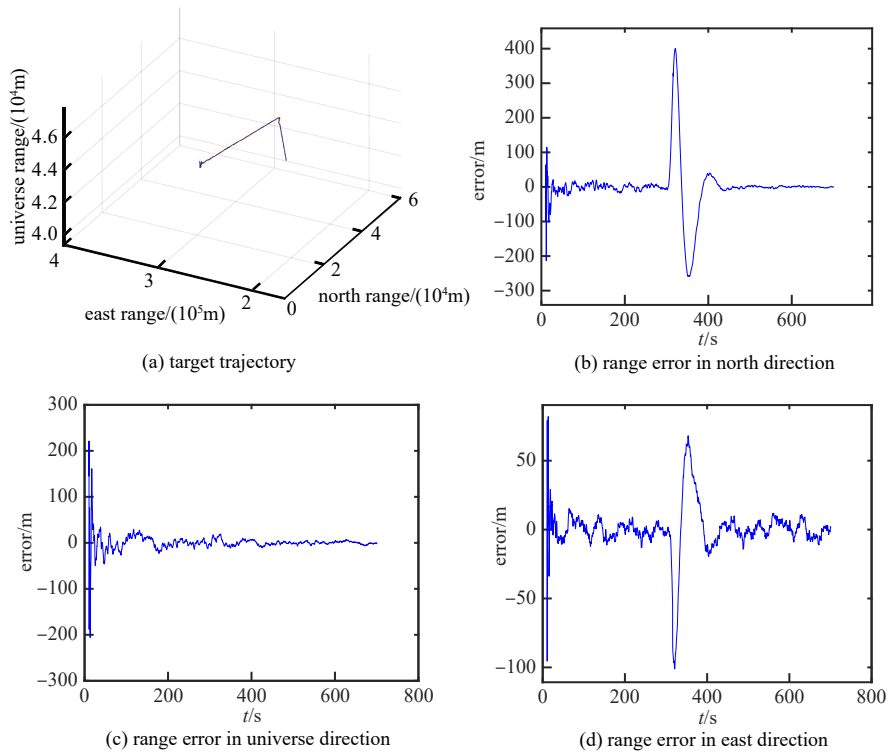


Fig.9 Maneuvering target track performance
图 9 机动目标跟踪性能

图 9(a)为机动目标运动航迹，图 9(b)和图 9(d)分别为北方向和东方向的跟踪误差。在目标机动后，北方向和东方向的跟踪误差变大，随着目标机动结束，跟踪误差逐渐变小。图 9(c)为天方向的跟踪误差，由于目标机动只在北和东方向进行，没有高度上的机动，所以该方向的跟踪误差没有出现较大起伏。因此，仿真系统对不同类型的目标具有精确的跟踪性能。

3.4 多部雷达信号及数据处理仿真

下面分析组件化仿真方法在实现多种雷达体制仿真时的优势。设置单阵面相控阵雷达、机械扫描雷达和四阵面相控阵雷达由北向南排列。150 个目标向雷达飞行，态势及仿真结果如图 10 所示。

雷达 1 的为 1 个阵面且阵面指向正东，因此无法探测到其余三个方向的目标，结果如图 10(b)所示。雷达 2 为机械扫描雷达，其没有单独的资源进行跟踪照射，因此仅有 1 个搜索数据率，仿真结果如图 10(c)所示。雷达 3 为 4 阵面相控阵雷达，与雷达 1 相比，能够观测到四个方向的目标，仿真结果如图 10(d)所示。

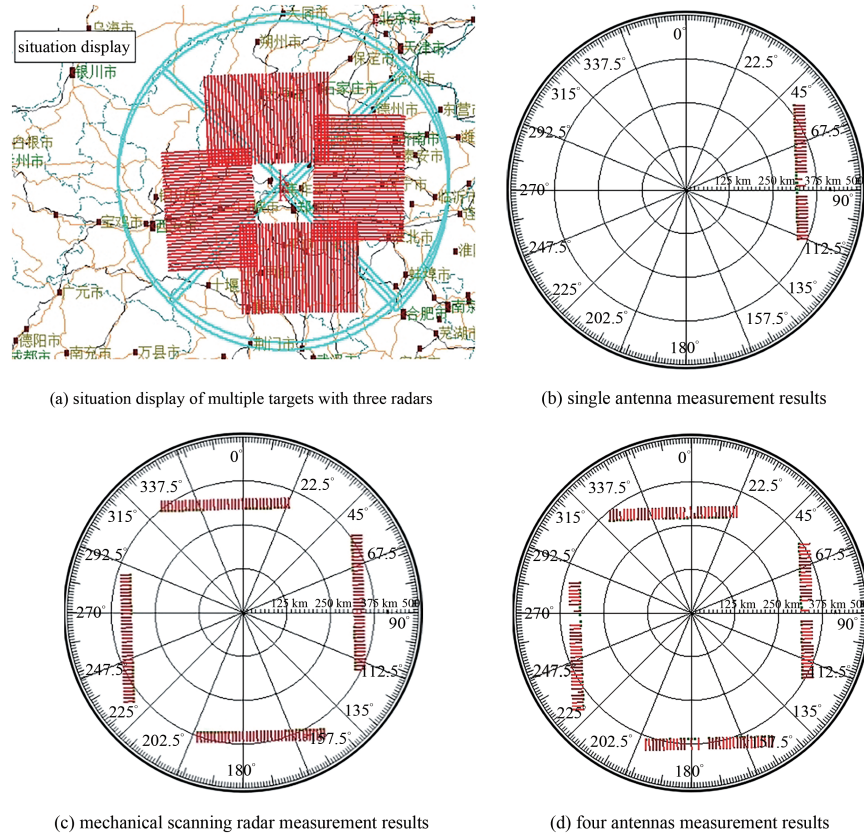


Fig.10 Point and track results of multiple targets with three types of radar

图 10 三部雷达多目标点/航迹态势及测量结果

4 结论

雷达信号及数据处理仿真技术涉及多个学科领域,具有广阔的发展前景。本文以功能级仿真方法为基础,提出组件化的设计方法,将雷达信号处理及数据处理划分为 28 个组件。各组件之间采用统一的接口实现参数及数据传递,组件之间的相对独立使得各组件便于单独进行功能扩展及优化。此外,通过设置标志位实现同一组件中不同雷达体制的功能模拟,可以大大提高仿真平台的开发效率。随着雷达技术的不断发展,对组件功能进行优化设计和扩展完善,将是下一步的研究方向。

参考文献:

- [1] 安红,张雁平,杨莉,等. 基于组件的信号级雷达模型可重构设计[J]. 电子信息对抗技术, 2020,35(4):57-61,77. (AN Hong, ZHANG Yanping, YANG Li, et al. Reconfigurable design of signal level radar model based on component[J]. Electronic Information Warfare Technology, 2020,35(4):57-61,77.)
- [2] 陶秋峰,谷雨,方韬,等. 相控阵雷达系统功能仿真及应用[J]. 计算机仿真, 2014,31(8):6-9,36. (TAO Qiufeng, GU Yu, FANG Tao, et al. Functional simulation on phased array radar system and its application[J]. Computer Simulation, 2014,31(8):6-9,36.)
- [3] 安红,杨莉,张朔,等. 雷达电子战信号级数字仿真系统架构设计[J]. 航天电子对抗, 2019,35(4):6-9. (AN Hong, YANG Li, ZHANG Shuo, et al. Architecture design of radar EW signal level simulation system[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2019,35(4):6-9.)
- [4] 安红,杨莉,张朔,等. 雷达电子战信号级并行仿真系统设计与实现[J]. 航天电子对抗, 2021,37(3):1-5. (AN Hong, YANG Li, ZHANG Shuo, et al. Design and implementation of radar EW signal level parallel simulation system[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2021,37(3):1-5.)
- [5] 杜国红,韦伟,李路遥. 作战仿真实体组件化建模研究[J]. 系统仿真学报, 2015,27(2):234-239. (DU Guohong, WEI Wei, LI Luyao. Research on component-based modeling of combat simulation entity[J]. Journal of System Simulation, 2015,27(2):234-239.)
- [6] 孙华伟. 组件化雷达建模仿真平台设计[D]. 西安:西安电子科技大学, 2017. (SUN Huawei. The design of radar system modeling and simulation platform based on components[D]. Xi'an, China: Xidian University, 2017.)
- [7] 王博,范彬,刘肖静,等. 基于组件的雷达电子战仿真系统架构设计[J]. 雷达与对抗, 2019,39(3):8-10,15. (WANG Bo, FAN

- Bin,LIU Xiaojing,et al. Component-based radar electronic warfare simulation[J]. Radar & ECM, 2019,39(3):8–10,15.)
- [8] 赵士璋. 舰载多功能相控阵雷达的建模与仿真[D]. 西安:西安电子科技大学, 2017. (ZHAO Shixuan. Modeling and simulation on shipborne multi-function phased array radar[D]. Xi'an,China:Xidian University, 2017.)
- [9] 李萌,王昊. 机械扫描雷达的扇形扫描非均匀采样问题的研究[J]. 火控雷达技术, 2020,49(4):38–41. (LI Meng,WANG Hao. Research on non-uniform sampling of sector scanning of mechanical scanning radar[J]. Fire Control Radar Technology, 2020,49(4):38–41.)
- [10] 朱润,沈凡,高清. 平台摇摆下舰载相控阵雷达被动探测测角误差仿真[J]. 舰船电子对抗, 2020,43(5):13–16,37. (ZHU Run, SHEN Fan,GAO Qing. Simulation of angle measurement error of passive detection for shipborne phased array radar under platform sway[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2020,43(5):13–16,37.)
- [11] 万显荣,易建新,占伟杰,等. 基于多照射源的被动雷达研究进展与发展趋势[J]. 雷达学报, 2020,9(6):939–958. (WAN Xianrong,YI Jianxin,ZHAN Weijie,et al. Research progress and development trend of the multi-illuminator-based passive radar [J]. Journal of Radars, 2020,9(6):939–958.)
- [12] 周颖,王雪松,王国玉,等. 相控阵雷达最优波位编排的边界约束算法研究[J]. 电子学报, 2004(6):997–1000. (ZHOU Ying, WANG Xuesong,WANG Guoyu,et al. Study on boundary-confined algorithm of optimal beam position arrangement for phased array radar[J]. Acta Electronica Sinica, 2004(6):997–1000.)
- [13] 刘俊凯,陈忠宽,马梁,等. 基于变长度调度间隔的雷达资源调度算法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016,14(1):58–63. (LIU Junkai, CHEN Zhongkuan, MA Liang, et al. Radar resource scheduling algorithm based on variable length scheduling interval[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2016,14(1):58–63.)

作者简介:

刘晓斌(1990–), 男, 郑州市人, 讲师, 博士, 主要研究方向为电子信息系统仿真评估 .email: xiaobin@yeah.net.

吴其华(1990–), 男, 江苏省盐城市人, 讲师, 博士, 主要研究方向为雷达对抗、雷达信号处理.

赵 锋(1978–), 男, 南京市人, 教授, 博士, 主要研究方向为电子信息系统仿真评估.

艾小锋(1983–), 男, 四川省安岳市人, 副研究员, 博士, 主要研究方向为双基地雷达成像、特征提取.

(上接第 146 页)

- [13] 唐峥钊. 基于微多普勒效应的 ISAR 干扰技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2019. (TANG Zhengzhao. Study on countermeasures against ISAR based on micro-Doppler effect[D]. Xi'an,China:Xidian University, 2019.)
- [14] 潘小义. 基于目标散射及微动特性调制的 ISAR 干扰方法研究[D]. 长沙:国防科技大学, 2014. (PAN Xiaoyi. Study on ISAR jamming techniques based on scattering and micro-motion characteristics modulation of targets[D]. Changsha,China:Graduate School of National University of Defense Technology, 2014.)
- [15] CHEN V C,LI F,HO S,et al. Micro-Doppler effect in radar-phenomenon, model, and simulation study[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2006,24(1):1–21.

作者简介:

潘小义(1986–), 男, 副教授, 博士, 硕士生导师, 主要研究方向为新体制雷达对抗仿真及应用 .email: mrpanxy@nudt.edu.cn.

艾 夏(1986–), 男, 高级工程师, 博士, 主要研究方向为雷达目标特性.

刘佳琪(1963–), 男, 研究员, 博士, 博士生导师, 主要研究方向为雷达目标识别与雷达干扰技术.

陈吉源(1994–), 男, 博士研究生, 主要研究方向为雷达信号处理.

肖顺平(1964–), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要研究方向为电子对抗仿真与评估技术.