Website: ycyk.brit.com.cn

# 全闭环条件下机载主被动雷达数字化仿真技术研究

蔡炜锋,夏伟杰,时晨光,郭栋财 (南京航空航天大学南京 210016)

摘要:随着计算机仿真技术的发展,可以结合实际雷达工作流程和处理算法来实现装备的数字孪生,从而脱离传统射频设备或半实物硬件平台。本文介绍了主动雷达搜索、跟踪及SAR成像的信号级仿真,被动雷达搜索、跟踪的功能级仿真流程和相关实现算法,并通过主被动雷达仿真基础运行软件进行算法集成,在闭环仿真验证平台下与控制、散射源和辐射源分系统进行交互,根据其输入的控制指令与回波数据实现各模式下的雷达处理,最后反馈给控制分系统,实现了闭环工作模拟。试验结果验证了该仿真技术的工作流程与信号处理算法的正确性,所给出的部分干扰过程分析进一步说明该技术 在机载主被动雷达设备的预研和复盘中具有广泛的应用前景。

关键词:单脉冲雷达仿真; SAR 仿真; 被动雷达仿真; 抗干扰分析
中图分类号: TN955; TP311.1
文献标志码: A
文章编号: 2095-1000(2023)06-0101-10
DOI: 10.12347/j.ycyk.20230821001
引用格式: 蔡炜锋, 夏伟杰, 时晨光, 等. 全闭环条件下机载主被动雷达数字化仿真技术研究[J]. 遥测遥控, 2023, 44 (6): 101-110.

# Research on digital simulation technology of airborne active and passive radar in full closed loop

CAI Weifeng, XIA Weijie, SHI Chenguang, GUO Dongcai

(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: With the development of computer simulation technology, the digital twin of equipment can be realized by combining the actual radar workflow and processing algorithm, so it can be separated from the traditional RF equipment or semi-physical hardware platform. This paper introduces the signal-level simulation of active radar search, tracking and SAR imaging, the functional-level simulation process and related implementation algorithms of passive radar search and tracking, and integrates the algorithms through the active and passive radar simulation basic operation software. Under the closed-loop simulation verification platform, it interacts with the control, scattering source and radiation source subsystems, realizes radar processing in each mode according to the control instructions and echo data input, and finally feeds back to the control subsystem to realize the closed-loop simulation. The experimental results verify the correctness of the workflow of the simulation technology and the correctness of the signal processing algorithm. The analysis of some interference processes further shows that the technology has a wide range of application prospect in the pre-research and review of airborne active and passive radar equipment.

Keywords: Monopulse radar simulation; SAR simulation; Passive radar simulation; Anti-interference analysis

Citation: CAI Weifeng, XIA Weijie, SHI Chenguang, et al. Research on digital simulation technology of airborne active and passive radar in full closed loop [J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2023, 44(6): 101–110.

# 引 言

主被动雷达能够充分发挥主动雷达的高精度 距离、角度测量以及成像能力,也具备被动雷达 工作范围远、隐蔽性强的优点。在主被动雷达的 性能验证阶段,往往通过设置大型复杂电磁干扰 场景进行飞行试验来获得数据。这种方法耗资巨 大,需要进行大量的人员调度,难以大量开展试 验。采用软件仿真的方法对主被动雷达的进行性 能评估具有移植性好、成本低、场景丰富的优点。

国内众多学者对雷达系统的仿真建模开展了 大量的研究工作。其中, 文献[1,2]总结了雷达半实 物仿真的研究进展和相关配套总控软件研制情况, 雷达半实物仿真相比外场飞行试验虽然具有更低 的成本和更好的保密性,但仍然需要解决微波暗 室设计、近距离试验和目标特性模拟与测量的问 题。文献[3-9]对各平台雷达数字化仿真技术设计 从体系架构研究到组件化设计,再到相关仿真软 件实现进行了介绍,但都缺乏对成像、被动雷达 和电子对抗的过程分析。文献[10-12]介绍了雷达 抗干扰仿真系统,并形成准确的雷达电子对抗动 态过程,获取各关键环节的试验数据,但没有考 虑不同干扰因素下的雷达抗干扰效果。本文所提 到的仿真技术没有半实物设备带来的硬件环境、 暗室环境问题,便于移植和展示。同时,该仿真 技术具备完整的单脉冲、成像和被动雷达仿真算 法,并通过主被动雷达闭环仿真验证平台进行了 全面的抗干扰功能试验,有力地支撑了相关系统 的设计与验证。

本文以主被动雷达设计过程全要素闭环仿真 为出发点,基于主被动雷达闭环仿真验证平台与 主被动雷达基础运行软件,对主动雷达单脉冲、 成像和被动雷达搜索、跟踪这四个功能进行仿真 技术研究。首先,介绍了主被动雷达闭环仿真验 证系统架构;第二部分介绍了主动雷达的信号级 仿真过程;第三部分则是被动雷达的功能级仿真 过程;最后,根据仿真结果论证了本文仿真方法 的有效性,并展示了部分抗干扰分析过程。

# 1 机载主被动雷达仿真系统架构介绍

机载主被动雷达闭环仿真验证平台是一套通 过全数字手段实现的信号级仿真平台,集成了目 标与干扰的电磁散射、电磁辐射特性仿真模型, 用于雷达回波和辐射源发射信号的产生,并且支 持导入目标特性数据、电磁干扰环境参数。仿真 验证平台又通过控制仿真、主被动雷达仿真系统 完成对整体流程的闭环控制和对接收回波的信号 与数据处理,实现对机载雷达设计验证过程中可 能出现的干扰偏差场景进行全面覆盖,进而支撑 雷达工作全流程的闭环设计与验证,为客观评定 雷达性能提供一个有效的基准平台。

图1为主被动雷达闭环仿真验证系统的架构分 布。该系统使用节拍式原则,固定推进步长。以 控制系统的指令下发为起点,将指令下发、散射 源与辐射源回波计算、主被动雷达处理、控制调 整飞行状态整个流程视为一个节拍仿真。在仿真 过程中,若雷达的脉冲重复频率与系统仿真步长 无法整除,则将起始时刻在当前推进节拍内的脉 冲归为当前节拍的回波数据。



Fig. 1 Simulation system architecture

其中,主被动雷达仿真系统作为仿真验证平 台中的核心部分,自顶向下设计为应用服务层、 业务逻辑层、信号处理层和数据交互层。应用服 务层主要完成雷达平台计算结果的态势显示以及 仿真回放的控制;业务逻辑层主要完成雷达工作 流程控制、报文解析和报文配置;信号处理层则 实现主动单脉冲、成像的信号级仿真和被动搜索 跟踪的功能级仿真;数据交互层主要通过以太网 通信硬件设备,在通信运行控制的时间同步周期 下,调用相关接口实现主被动雷达仿真系统与其 它系统的数据交互。

# 2 主动雷达系统仿真方法

#### 2.1 单脉冲模式信号级仿真

雷达系统单脉冲搜索、跟踪模式的信号处理 流程<sup>[13]</sup>如图2所示。雷达系统首先将收到的中频 信号做数字下变频后获得基带信号,再对低信噪 比的回波信号进行脉冲压缩、方位向快速傅里叶 变换(FFT),提高信噪比,在回波的距离-多普勒 域上用二维单元平均恒虚警检测(CA-CFAR)检测 目标。

获取CFAR检测点迹的角度、距离、速度等信息之后,如图3中的雷达数据处理流程所示,将 CFAR检测点按照幅值排序进行雷达数据处理。检 测点经过点迹聚类后,用质心点作为点云代表。 再根据运动数据和波束指向计算该点对应的坐标、 角度信息后,输入航迹关联模块,进行航迹的起 始和关联<sup>[14,15]</sup>。







单脉冲搜索阶段雷达一般会根据预先指定的 搜索范围,按照行排序的顺序进行扫描,再对不 同波束位置下进行探测,将得到航迹关联结果进 行聚类,按扫描轮次上报给控制系统。单脉冲跟 踪则会有随动目标的凝视波束,持续获取目标回 波信息,并且在航迹关联阶段采用更小的距离、 角度和速度阈值来对航迹进行更加严格的关联, 并对历史关联结果进行逻辑判断,选通输出符合 平滑特性的目标信息,并更新雷达跟踪状态。

#### 2.2 成像模式信号级仿真

成像模式下将中频信号变频到基带后采用大 斜视子孔径频域成像处理算法<sup>[16,17]</sup>,该算法通过距 离向处理、方位压缩、几何校正、量化增强后, 得到图像和处理结果参数,再通过仿真基础软件 将结果传回控制系统,处理流程如图4所示。

#### 2.3 信号处理流程推导

在进行信号处理时,首先以 $V_x$ 与 $V_y$ 的合成矢量为X轴,将原坐标系通过绕Z轴旋转得到参考坐标系。其几何关系如图5所示,平台高度为 $y_s$ ,波束射线指向的擦地角为 $\alpha_0$ ,波束射线指向的斜视角为 $\theta_0$ , $R_0$ 为波束中心经过目标时的斜距。

假设雷达信号为线性调频信号,则其基带信 号的时域表达式为:



图4 成像信号处理流程

Fig. 4 SAR signal processing flow





in reference coordinate

$$S_{u}(t_{r}, t_{a}) = w_{r} \left( t_{r} - \frac{2R(t_{a})}{c} \right) w_{a}(t_{a} - t_{0}) \cdot \exp \left( j\pi K \left( t_{r} - \frac{2R(t_{a})}{c} \right)^{2} \right) \cdot$$
(1)
$$\exp \left( -j \frac{4\pi R(t_{a})}{\lambda_{c}} \right)$$

其中, $t_r$ 为距离时间, $t_a$ 为方位时间, $w_r$ 距离窗函数, $w_a$ 为方位窗函数, $R(t_a)$ 为无近似瞬时斜距,c为光速, $\lambda_c$ 为波长,K为调频斜率, $t_0$ 为波束中心穿过目标的时刻。对式(1)进行距离傅里叶变换,则距离频域表达式为:

$$S_{ff}(t_r, t_a) = W_r(f_r) w_a(t_a - t_0) \cdot \exp\left(-j\pi \frac{f_r^2}{K}\right) \exp\left(-j\frac{4\pi (f_c + f_r) R(t_a)}{c}\right)$$
(2)

其中, *f*<sub>r</sub>为距离频率, *W*<sub>r</sub>为距离频率窗函数, *f*<sub>c</sub>为载频。线性距离走动校正函数为:

$$H_{\rm lrwc}(f_r, t_a) = \exp\left(-j\frac{4\pi v\sin\theta_0(f_c + f_r)t_a}{c}\right) \quad (3)$$

继续给出距离弯曲校正函数:

 $H_{\rm rcc}(f_r, f_a; R_0) =$ 

$$\exp\left(j2\pi f_r \frac{2R_0\cos\theta_0}{c} \frac{\frac{f_c}{c} - \frac{(f_a + f_{\rm DC})\sin\theta_0}{2\nu}}{\sqrt{\left(\frac{f_c}{c}\right)^2 - \left(\frac{f_a + f_{\rm DC}}{2\nu}\right)^2}}\right).$$
$$\exp\left(j2\pi f_r \frac{2R_0\sin^2\theta_0}{c}\right)\exp\left(-j2\pi f_r \frac{2R_0}{c}\right)$$
(4)

其中,  $f_{DC} = 2v \sin \theta_0 / \lambda$ 为多普勒中心频率,  $R_0$ 为波 束中心线长度。再给出距离脉压和二次距离脉压 函数:

$$H_{\rm rc\_src}(f_r; R_0) = \exp\left(j\pi \frac{f_r^2}{K}\right) \cdot \exp\left(-j\pi f_r^2 \frac{2R_0 \cos\theta_0}{c^2} \frac{\left(\frac{f_c}{c} \sin\theta_0 - \frac{f_a + f_{\rm DC}}{2\nu}\right)^2}{\left(\left(\frac{f_c}{c}\right)^2 - \left(\frac{f_a + f_{\rm DC}}{2\nu}\right)^2\right)^{\frac{3}{2}}}\right)$$
(5)

综上所述,将式(2)与式(3)相乘的结果作方位 向傅里叶变换到二维频域,再将其与式(4)、(5)相 乘,得到距离向处理后的信号二维频域。若为成 像模式则继续做方位向的高阶相位补偿和方位压 缩。单脉冲模式下的精度要求没有成像高,仅需 要做距离时域的逆傅里叶变换,即可得到待检测 的信号。

将方位、俯仰差信号一同用上述处理过程进 行处理得到三个通道的距离多普勒域信号。接下 来继续对和通道信号用十字形二维单元平均恒虚 警检测算法进行目标检测<sup>[18]</sup>。为了避免检测盲区, 将检测算法优化为边界循环复制扩展的CA-CFAR 检测,其原理如图6所示。

设某次仿真中根据目标尺寸设置的距离参考 单元为*M*,方位参考单元为*N*,检测单元*D*周围的



Fig. 6 Cross shaped cyclic CFAR detection

保护单元不参与平均干扰功率的计算。则检测单 元的平均干扰功率为

$$\bar{p} = \frac{1}{2(M+N)} \left( \sum_{m=1}^{2M} P_{m,D_y} + \sum_{n=1}^{2N} P_{D_x,n} \right)$$
(6)

其中, *P*为参考单元功率值, *D*<sub>x</sub>和*D*<sub>y</sub>分别为检测 单元在距离向和方位向上的位置。则目标检测门 限为

$$T = 2(M+N) \left( P_{ja}^{-\frac{1}{2(M+N)}} - 1 \right) \cdot \bar{p}$$
(7)

结合式(6)、式(7)循环遍历整个信号 RD 域的 采样数据,同时将采样数据与计算的检测门限比 较,记录能被检测到的检测点输出,进行后续的 测距、振幅和差测角。





Fig. 7 Diagram of beam illuminating in target

将带有距离、角度信息的检测点进行聚类处理,聚类采用距离-角度特征分选法。平台波束照射目标几何关系如图7所示,对应聚类过程如下:

 ① 获取当前测量斜距|*MB*|, 波束擦地角为α<sub>0</sub>, 设装订目标长度|*AC*|;

② 则聚类距离窗长为|AC |cos α<sub>0</sub>,角度窗长 β<sub>0</sub>=arcsin(|AC || MB |),其中|AC |<< |MB |;</p>

③ 获取当前检测点中功率最大的点作为基准, 将剩下的点与距离窗和角度窗进行联合比较,同 时符合则归为一类;重复③,直至无剩余检测点。

# 3 被动雷达系统仿真方法

#### 3.1 被动雷达搜索模式功能级仿真

本文根据文献[19]中被动雷达信号处理概述进 行简化,总结了一套被动雷达功能级仿真方案。 被动雷达在初始化后,首先根据目标雷达频率范 围计算搜索时需要遍历的信道频率。在进行辐射 信号配置时,按照一定停留周期给辐射源分系统 发送不同中心频率的配置参数。辐射源分系统返 回辐射信号的中心频率、带宽、到达角、到达时 间、采样点数、中频采样数据等。被动雷达搜索 模型接收到该数据后,将会进入如图8所示的数据 处理流程:



Fig. 8 Radiation data processing flow

其中,脉冲描述字(PDW)参数中的到达时间、 到达角、中心频率、脉宽参数可直接通过配置报 文获得。完成脉冲估计后,对得到的PDW进行辐 射源描述字(EDW)分选聚类,并将分选结果与目标 信息匹配后,把搜索得到的EDW上报给控制 系统。

#### 3.2 被动跟踪模式的功能级仿真

被动雷达收到控制系统下发的跟踪指令后, 根据目标编号切换到对应的中心频点上进行辐射 信号配置。再通过与搜索阶段相同的处理方式后, 进入跟踪的逻辑判定,输出结果。

### 4 系统仿真结果

# 4.1 无干扰条件下的主被动雷达仿真性能验证

被动雷达在仿真闭环回路当中为功能级仿真, 主要进行功能级的内容分选,因此仿真结果能够 保证正确,本节主要对主动雷达信号级仿真部分 开展验证与分析。在某次仿真中,给出部分主动 雷达测量的信号参数,如下所示:

载频: 10 GHz; 脉宽: 30 μs; 信号带宽: 100 MHz; 采样率: 150 MHz; 单脉冲时脉冲重复 频率: 15 000 Hz; 成像时脉冲重复频率: 4 000 Hz; 单脉冲时雷达与目标距离: 19 050 m; 成像时雷达 与目标距离: 45 800 m; 单脉冲时雷达高度: 8 500 m; 成像时雷达高度: 16 100 m; 雷达运动 速度: 1 100 m/s; 成像斜视角度: 70°; 图像分辨 率: 5 m。



图9为单脉冲跟踪状态下关联出航迹后的测距 结果和天线坐标系下方位、俯仰角的测量值。 图10为仿真和理论斜距和角度曲线之间的差值对 比结果,其距离误差在3m内,角度误差在0.02° 内,且经过坐标转换后得到东北天坐标系下的测 量点位基本落在目标附近。



Fig. 11 No jamming range and SAR image

图 11 为左侧相干处理周期当中第一个脉冲对 应目标一维距离像的分布,其长度为 110 m 左右, 此时成像斜视角为70°左右,将一维距离像长度沿 波束方向投影得到目标真实长度约为320m,与实 际长度相同。图11右侧为回波数据成像后投影到 地面的结果,目标清晰可见,分布与基准图相同。

**4.2** 干扰条件下的主动雷达仿真过程分析 4.2.1 阵列角反干扰下的仿真结果

对目标和阵列角反干扰场景下的仿真过程进行分析,设置阵列角反在(500,0,500)处,且RCS均值略大于目标。阵列角反与目标的一维距离像和SAR图像如图12所示。



Fig. 12 Array corner reflector jamming range and SAR image

阵列角反在雷达单脉冲跟踪阶段实施质心式 干扰<sup>[20]</sup>。此时,CFAR检测后对得到的检测点进行 聚类,获得两个点云,再进行各自点云峰值处的 一维距离向长度估计。点云1的检测点数和一维距 离向长度均小于点云2,认为点云1为阵列角反, 点云2为目标。在航迹关联过程中,部分时刻的斜 距和角度测量结果会波动到阵列角反的位置上, 说明会有阵列角反在检测点数和一维像上大于目 标的情况。在SAR图像上的目标与阵列角反的特 征明显存在差异,将图像从数据回路给到控制系 统之后,两者能被区分开来。 4.2.2 舷外有源密集假目标干扰下的仿真结果

对目标和舷外有源密集假目标场景下的仿真 过程进行分析,设置干扰机在(-500,0,-500)和 (-400,0,-500)处。密集假目标干扰与目标的一维 距离像和SAR图像如图13所示。密集假目标作为 一种欺骗式干扰,其原理为截获雷达的发射信号 参数后,用相同的参数生成发射信号,随机给予 时间延迟,向雷达方向辐射密集假目标干扰 信号。





Fig. 13 Fake target jamming range and SAR image

密集假目标干扰可以做到和目标具有相似的 一维距离向长度以及相似的检测点数,同时干扰 的能量较强。因此,在单脉冲跟踪阶段的质心跟 踪策略,容易导致雷达被有源干扰机诱偏。在 SAR图像上的目标与密集假目标的特征明显存在 差异,在信杂比良好的情况下,可以通过图像识 别方式进行区分。但在干扰机功率较大时,目标 信杂比不足会导致漏检。

# 4.2.3 舰载有源灵巧噪声干扰下的仿真结果

灵巧噪声是一种压制式有源干扰,通过截获 雷达信号参数生成多假目标信号后再将干扰信号 与随机噪声卷积,干扰具有假目标的特性,同时 也有很好的噪声压制效果,其信号基带可表 示为[21]:

$$J(t) = \sum A \left( R_{\text{randn}} \bigotimes e^{j\pi K (t-\tau)^2 - 2\pi f_c \tau} \right)$$
(8)

其中, *R*<sub>randn</sub> 表示与延时转发信号卷积的高斯噪声 函数。对目标和舰载有源灵巧噪声干扰场景下的 仿真过程进行分析,设置干扰机在(-10,0,-120), 即目标舰艏部位。某次仿真实验的成像结果如图 14所示。





灵巧噪声干扰压制下, 雷达回波中难以获取 有效的目标信息。其中,一维距离像无法确认目 标峰值, CFAR检测获取不到有效点信息。SAR图 像则出现大量密集噪点覆盖目标,无法通过图像 识别进行位置解算。

目前, 仿真平台采用信号参数捷变的方式来 进行有源干扰的对抗。若在跟踪或者成像阶段长 时间无法获取有效的目标信息, 则会根据装订好 的捷变策略进行捷变, 来保证有效的测量数据 输出。

4.2.4 舰载有源距离托引干扰下的仿真结果

主被动雷达仿真系统中的单脉冲跟踪模式主 要通过搜索探测、成像探测获取目标的初步位置 后,对目标所在位置进行连续波束扫描,再用自 动跟踪的方法实现对目标距离、角度的精细跟踪 和检测。这个方法很依赖前、后跟踪波门的设置, 将目标回波位置在脉压后保持在前跟踪波门附近, 从而达到稳定跟踪的状态。距离托引则是针对这 一跟踪手段的有效干扰策略,其波门托引干扰的 转发时延函数Δt(t)可表示为<sup>[21]</sup>:

$$\Delta t(t) = \begin{cases} 0 & 0 \le t < t_1, \text{@hillinghamma} \\ \frac{2v(t-t_1)}{c} \equiv \frac{2a(t-t_1)^2}{c} & t_1 \le t < t_1, \text{hillinghamma} \\ + \text{hillinghamma} \\ + \text{hillinghamma} & t_1 \le t < T_j, \text{Hillinghamma} \end{cases}$$

其中,*T<sub>j</sub>*为干扰机的拖引周期。设置干扰机在 (-10,0,-120)处,并实施距离拖引干扰。不同拖引 时刻下目标和距离拖引干扰下的回波采集结果如 图15所示。





在此次跟踪过程中,跟踪波门随着距离拖引 干扰逐步往后延,最终导致了在干扰机关闭期使 得回波中丢失目标信号,雷达跟踪系统转入记忆 跟踪一段时间后,转入捕获状态对目标进行再次 搜索。

4.2.5 舰载有源噪声调频压制干扰下的仿真结果

噪声调频压制干扰是通过截获雷达参数后, 生成对应频点上的频率调制信号后,再向雷达波 来向辐射干扰信号。其信号基带表达式如下<sup>[21]</sup>:

$$J(t) = A e^{j\pi K(t')(t-\tau)^2 - 2\pi f_c \tau}$$
(10)

其中, K(t')为信号的频率调制函数。设置干扰机 在(-10,0,-120)处,并实施噪声调频压制干扰。后 续绘制了此段回波中单个脉冲的频谱图和时频图 如图16所示。

由图16可见脉冲回波的频谱图杂乱不清,并 且时频图中略微可见目标回波的时频斜线。噪声



调频压制干扰大大降低了信干比,雷达无法通过 非相参或者相参积累获取高信干比的一维距离像 数据,直接导致了在进行CFAR检测时,虚警点位 的大量增加,增加了系统的运算负担和误报概率。

### 5 结束语

本文主要研究了主被动雷达仿真技术,并根 据主被动雷达仿真验证平台提供的输入数据,进 行主动雷达单脉冲、成像模式的信号级和被动雷 达搜索、跟踪的功能级仿真,再由本系统输出测 量数据给控制系统,完成主被动雷达工作过程的 闭环模拟。该技术脱离传统硬件设备,采用全数 字仿真的方式,解决了外场试验周期长、成本高 的问题。结果表明:本文仿真方法得到的单脉冲 测量误差在合理范围内,且SAR图像清晰。同时, 复杂干扰环境下的仿真也给抗干扰算法优化提供 了可靠的数据来源。

#### 参考文献

[1] 刘晓斌,赵锋,艾小锋,等.雷达半实物仿真及其关键技

( 0

术研究进展[J]. 系统工程与电子技术, 2020, 42(7): 1471-1477.

LIU Xiaobin, ZHAO Feng, AI Xiaofeng, et al. Research progress of radar hardware-in-the-loop simulation and its key technology[J]. Systems Engineering and Electronics, 2020, 42(7): 1471-1477.

- [2] 张莹. 机载雷达仿真系统总控软件的设计与实现[J]. 测 控技术, 2019, 38(12): 131-135.
   ZHANG Ying. Design and implementation of total control software for airborne radarsimulation system[J]. Measurement & Control Technology, 2019, 38(12): 131-135.
- [3] 严煜宇, 王学田, 高洪民, 等. 反舰导弹作战全数字仿真 软件设计与实现[J]. 微波学报, 2020, 36(S1): 27-30.
  YAN Yuyu, WANG Xuetian, GAO Hongmin, et al. Design and implementation of anti-ship missile combat alldigital simulation software[J]. Journal of Microwaves, 2020, 36(S1): 27-30.
- [4] 张军涛,李尚生,刘晨飞,等.基于Matlab的反舰导弹雷达导引头动态工作过程仿真[J]. 舰船电子工程, 2022, 42(3): 96-99, 165.

ZHANG Juntao, LI Shangsheng, LIU Chenfei, et al. Simulation of anti-ship missile radar seeker dynam-ic working process based on Matlab[J]. Ship Electronic Engineering, 2022, 42(3): 96-99, 165.

- [5] 夏云,卢冀.雷达数字化设计与仿真的技术体系架构研究[J].火控雷达技术, 2019, 48(2): 90-96.
   XIA Yun, LU Ji. Research on technology system architecture of a radar digital design and simulation system[J].
   Fire Control Radar Technology, 2019, 48(2): 90-96.
- [6] 彭玲玉, 吴其华, 刘晓斌, 等. 雷达信号处理模块组件化 设计与仿真[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2022, 20(2): 127-132.
  PENG Lingyu, WU Qihua, LIU Xiaobin, et al. Component-based design and simulation for radar signal processing module[J]. Journal of Terahertz Science and
- Electronic Information Technology, 2022, 20(2): 127-132.
  [7] 戴幻尧, 马磊, 王德旺, 等. 基于六自由度闭环弹道的脉 冲多普勒雷达导引头仿真[J]. 航天电子对抗, 2021, 37(4): 1-7.
  DAI Huanyao, MA Lei, WANG Dewang, et al. Coherent video modeling of pulsed Doppler radar seeker for 6-DOF closed loop trajectory simulation[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2021, 37(4): 1-7.
- [8] 赵亮, 史小斌. 数字阵列雷达仿真系统设计[J]. 火控雷 达技术, 2021, 50(4): 100-112.
   ZHAO Liang, SHI Xiaobing. Design of a digital array ra-

dar simulation system[J]. Fire Control Radar Technology,

2021, 50(4): 100-112.

 [9] 张华杰.通用脉冲雷达信号仿真软件设计与实现[J].火 力与指挥控制, 2021, 46(2): 97-103.
 ZHANG Huajie. Design and implementation of general pulse radar signal simulation software[J]. Fire Control &

Command Control, 2021, 46(2): 97-103.

- [10] 王华兵,朱宁,戚宗锋,等.基于信号描述字的雷达与 干扰数字仿真方法[J].电光与控制,2022,29(1):61-65.
  WANG Huabing, ZHU Ning, QI Zongfeng, et al. A radar and jammer simulation method using signal descriptor[J]. Electronics Optics & Control, 2022, 29(1): 61-65.
- [11] 张朝丰,李少杰,张双喜,等.机载火控雷达抗干扰仿 真系统设计[J].上海航天(中英文), 2022, 39(3): 100-106.
  ZHANG Chaofeng, LI Shaojie, ZHANG Shuangxi,

et al. Design of anti-jamming simulation system for airborne fire control radar[J]. Aerospace ShangHai (Chinese & English), 2022, 39(3): 100-106.

- [12] 任喜珂,刘东青,孙陈刚. 雷达对抗作战战场仿真系统 设计与实现[J]. 雷达与对抗, 2022, 42(3): 6-9.
  REN Xike, LIU Dongqing, SUN Chengang. Simulation system design and implementation of radar combat battlefield[J]. Radar&Ecm, 2022, 42(3): 6-9.
- [13] 张水泉. 弹载单脉冲雷达信号处理算法研究与实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2022.
- [14] 雷张华,谢敏.机载相控阵雷达的数据处理建模与仿 真[J]. 火控雷达技术, 2017, 46(2): 95-99.
  LEI Zhanghua, XIE Min. Modeling and simulation of data processing for airborne phased array radar[J]. Fire Control Radar Technology, 2017, 46(2): 95-99.
- [15] 陈华中. 一种机械式机动相控阵雷达目标跟踪算法研究[J]. 遥测遥控, 2020, 41(5): 36-41.
  CHEN Huazhong. A research on target tracking method for mechanical mobile phased array[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2020, 41(5): 36-41.
- [16] 曹晔, 闫海鹏, 张剑琦, 等. 高动态条件下舰船目标 SAR成像算法研究[J]. 遥测遥控, 2019, 40(4): 40-48. CAO Ye, YAN Haipeng, ZHANG Jianqi, et al. Research on ship target SAR imaging algorithm under high dynamic condition[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2019, 40(4): 40-48.
- [17] 李震宇,梁毅,邢孟道,等.弹载合成孔径雷达大斜视 子孔径频域相位滤波成像算法[J].电子与信息学报, 2015, 37(4): 953-960.

LI ZhenYu, LIANG Yi, XING Mengdao, et al. A frequency phase filtering imaging algorithm for highly

第44卷第6期

squint missile-borne synthetic aperture radar with subaperture [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2015, 37(4): 953-960.

- [18] 郑志国,周利. 一种弹载雷达末段跟踪 CFAR 检测方法 研究与实现[J]. 舰船电子工程, 2021, 41(2): 69-72, 139.
  ZHENG Zhiguo, ZHOU Li. Reserch and realization of CFAR detection method for terminal tracking of missile-borne radar[J]. Ship Electronic Engineering, 2021, 41(2): 69-72, 139.
- [19] 李斌. 被动雷达系统仿真平台并行化设计与实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2021.
- [20] 汤广富,李华,甘荣兵,等.海战场环境下角反射器干 扰分析[J].电子信息对抗技术,2015,30(5):39-45.
  TANG Guangfu, LI Hua, GAN Rongbing, et al. Analysis of corner reflector under naval battlefield[J]. Electronic Information Warfare Technology, 2015, 30(5):

39-45.

[21] 张统兵, 袁子乔, 王辉辉. 雷达有源干扰的建模仿真及 特征参数提取[J]. 火控雷达技术, 2022, 51(4): 107-116. ZHANG Tongbing, YUAN Ziqiao, WANG Huihui. Simulation of radar active jamming and extraction of characteristic parameters[J]. Fire Control Radar Technology, 2022, 51(4): 107-116.

#### [作者简介]

蔡炜锋	1999年生,	硕士研究生。
夏伟杰	1979年生,	教授,博士生导师。
时晨光	1989年生,	博士,副教授。
郭栋财	1999年生。	硕士研究生。

(本文编辑:傅杰)