

文章编号: 2095-4980(2022)02-0127-06

## 雷达信号处理模块组件化设计与仿真

彭玲玉, 吴其华\*, 刘晓斌, 赵 锋, 肖顺平

(国防科技大学 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:** 为有效提高雷达系统仿真效率, 本文提出了一种雷达信号处理模块组件化设计方法。所提方法首先根据雷达信号处理各流程的独立性建立信号处理功能组件库; 在此基础上根据所仿真雷达对象进行组件的选择与拼接可灵活构建出所需信号处理模块。最后通过基于 Visual Studio 2013 平台中构建的雷达组件化信号处理模块的系统试验证明了所提方法的有效性。

**关键词:** 组件化; 信号处理; 雷达仿真; 信号级仿真

中图分类号: TN955

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2021336

## Component-based design and simulation for radar signal processing module

PENG Lingyu, WU Qihua\*, LIU Xiaobin, ZHAO Feng, XIAO Shunping

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

**Abstract:** In order to improve the efficiency of radar system simulation, a component-based method for constructing signal processing module of radar simulation system is proposed in this paper. Firstly, a library of signal processing function components is established based on the independence of the different functions of radar signal processing for the proposed method; on this basis, the required signal processing modules can be flexibly constructed by selecting and splicing components after analyzing the simulated radar; finally, the effectiveness of the proposed method is demonstrated by the experiment through the radar componentized signal processing module constructed in Visual Studio 2013 platform.

**Keywords:** component design; signal processing; radar simulation; signal simulation

相比于光学传感器, 由于全天时、全天候、远距离的探测优势, 雷达成为国土防御、态势感知、空间监视、遥感测绘等军民领域的核心传感器<sup>[1]</sup>。为摸清雷达性能边界, 评估雷达对抗效能等, 仿真试验是雷达系统设计以及使用过程中不可或缺的环节<sup>[2]</sup>。雷达试验主要分为外场试验与内场试验两类。其中外场试验通过外场实际环境开展, 完全复现雷达真实处理过程, 可信度高, 然而却具有成本高、保密难度大、可控度差等明显不足。相比而言, 内场试验则可有效克服外场试验中的不足, 其主要分为半实物仿真<sup>[3-4]</sup>以及全数字仿真两种典型方式<sup>[5-8]</sup>。其中全数字仿真完全通过计算机、服务器等通用计算设备模拟雷达工作过程, 具有成本低廉、开发周期短、灵活程度高的优势, 因此已成为雷达试验的一种重要方式。

雷达全数字仿真按照仿真粒度主要有功能级与信号级两种模式。两种模式的主要区别在于对雷达信号处理模块的仿真粒度不同。功能级仿真将雷达信号处理简化为以信噪比计算为核心的模型, 一般用于对仿真效率要求高的多传感器体系级仿真; 信号级仿真则完整复现信号采样与处理的过程, 一般用于对仿真精细度要求高的单装对抗场景, 也是本文所针对的研究对象。在构建雷达信号级数字仿真系统时, 信号处理模块是其中必不可少的组成部分, 其主要功能为完成雷达从回波信号采样到形成点迹报告的处理过程。传统的信号处理模块一般根据所要模拟的雷达体制、型号等直接进行整体个性化构建, 在同时模拟多体制雷达时工作量大, 灵活性不足。实际上, 从雷达信号处理原理上看, 其从逻辑上可以拆分为正交鉴相、匹配滤波、包络检波等

收稿日期: 2021-09-11; 修回日期: 2021-09-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61890542; 62071475)

\*通信作者: 吴其华 email: Stevewoo1990@outlook.com

单元,不同体制雷达信号处理则为这些单元的特异化组合。基于此,本文提出了一种基于组件化的雷达仿真系统信号处理模块设计与实现方法。首先,根据组件化设计的思想将雷达信号处理过程按处理单元来进行设计封装形成组件库;在此基础上,按照所模拟雷达的处理流程从组件库中选取对应组件进行拼接即可构成信号处理模块。针对不同体制雷达的仿真需求,所设计方法通过这种组件拼接的方式具有效率更高、开发更为便捷的明显优势。

## 1 典型雷达仿真系统构成

以相控阵雷达为例,在雷达系统全数字信号级仿真中,除去雷达主控以外按照雷达功能一般可以将整个雷达系统分为资源调度、天线模拟、回波模拟、信号处理、数据处理几个模块。这几个模块实现的功能分别为:

- 1) 资源调度模块:完成雷达资源调度功能的模拟,包括空域划分、波位编排、信号策略等;
- 2) 天线模拟模块:完成雷达天线的模拟,包括天线方向图、辅阵方向图等;
- 3) 回波模拟模块:完成雷达回波信号的模拟,包括能量调制、散射特性调制、时延模拟、多普勒模拟等;
- 4) 信号处理模块:完成雷达信号处理功能的模拟,包括脉冲压缩、包络检波、抗干扰处理等;
- 5) 数据处理模块:完成雷达数据处理功能的模拟,包括航迹管理、航迹起始、航迹终结、航迹滤波等。

图1给出了典型相控阵体制雷达各模块之间的信息交互关系。信号处理模块主要完成从雷达接收到回波信号到生成目标点迹之间的处理过程,是雷达系统的核心环节之一,实践表明其也是雷达系统仿真中最为复杂的部分。不同体制雷达其信号处理的流程往往也具有特异性,处理环节繁多,处理过程各异,处理功能多样。传统的雷达系统仿真中,通常针对所要模拟的雷达直接进行整体设计实现其信号处理模块,这种方式在面对多体制、多型号雷达系统仿真需求时明显面临灵活性不足、工作量繁重、维护困难等问题。而从雷达原理上看,雷达信号处理模块从组成上可以进一步细分为具有较强独立性的功能单元,不同雷达信号处理可以通过这些功能单元的线性组合构成。基于此,本文提出一种基于组件化的雷达信号处理模块仿真方法,将雷达信号处理的功能单元封装成独立组件并构建出组件库,在具体仿真使用中根据特定的功能需求通过组件拼接直接构建出信号处理模块。

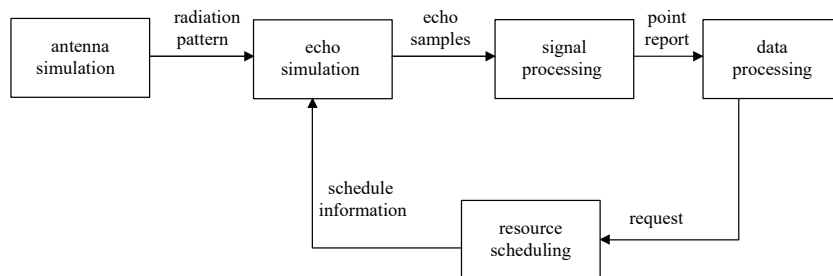


Fig.1 Module relations of a typical phased array radar  
图1 典型相控阵雷达系统各模块交互关系

## 2 雷达信号处理模块组件库设计

### 2.1 信号处理组件库构成

雷达信号处理组件库基于C++语言开发,根据雷达信号处理的基本原理,如图2所示,构建出的信号处理组件库已包括以下功能组件:正交鉴相组件、中频滤波组件、脉冲压缩组件、包络检波组件、一维恒虚警检测(Constant False Alarm Rate, CFAR)组件、二维CFAR组件、距离定心组件、距离测量组件、角度测量组件、雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS)测量组件、速度测量组件、动目标显示(Moving Target Indication, MTI)组件、动目标检测(Moving Target Detection, MTD)组件、旁瓣对消组件、旁瓣阴影组件。

### 2.2 组件设计方法

对于每个功能组件,采用统一框架的方式进行设计,以便于开发人员使用。每个组件均由以下四个部分构成:初始化函数、参数输入函数、功能执行函数、结果输出函数。

- 1) 初始化函数 initialize():完成组件的初始化;
- 2) 参数输入函数 set\_val\_in():输入组件执行需要的参数;

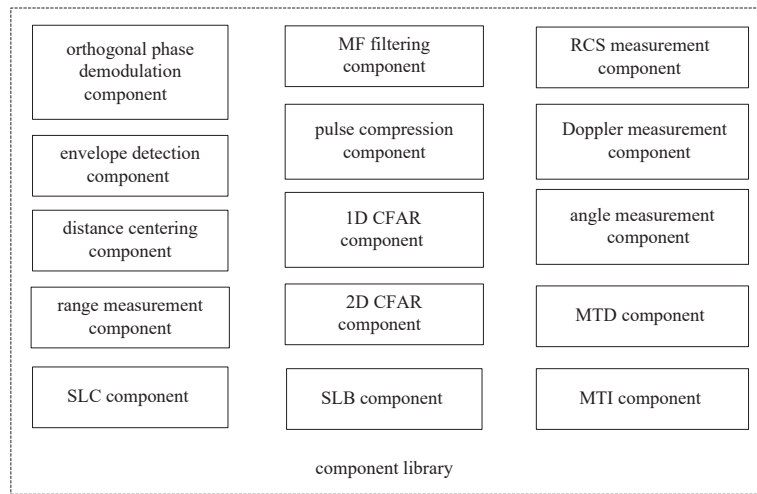


Fig.2 Component library of radar signal processing  
图2 信号处理组件库

- 3) 功能执行函数 `execute()`：组件功能执行；
- 4) 结果输出函数 `get_val_out()`：输出组件运行的结果数据。

下面以包络检波组件为例，简要说明组件构建的基本方法与步骤。  
根据雷达原理，包络检波的功能为去除信号的相位信息，其数学模型如下：

$$x(n) = \sqrt{x_r(n)^2 + x_i(n)^2}, \quad n = 1, 2, \dots, N \tag{1}$$

式中： $x_r(n)$  和  $x_i(n)$  分别表示输入信号的实部与虚部； $N$  为信号点数。

根据包络检波的原理，设计组件的运行步骤如图 3 所示。

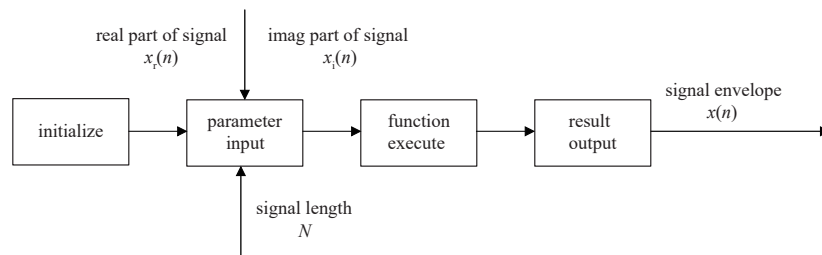


Fig.3 Operating procedure of envelope detection component  
图3 包络检波组件的运行步骤

- 1) 首先设计该组件的初始化函数，根据包络检波的原理，该组件为直接输入输出型，不需要设计组件初始化功能；
- 2) 其次确定组件的输入参数，根据公式(1)，其输入参数为待处理信号的实部与虚部，分别表示为  $x_r(n)$  和  $x_i(n)$ ，并输入信号点数为  $N$ ；
- 3) 然后设计组件的执行函数，根据公式(1)编写执行算法进行计算即可；
- 4) 最后确定组件的输出结果，根据公式(1)，该组件的输出为去除相位信息后的信号包络  $x(n)$ 。

按照上述同样的步骤对其他信号处理组件按照其原理进行设计，即可构成信号处理组件库，在实际封装中，将组件编译为 dll 动态链接库，在使用时直接根据所需要的功能调用对应的 dll 动态链接库即可。

### 3 基于组件库的雷达信号处理模块构建

在构建出信号处理组件库后，根据仿真对象的实际需求构建信号处理模块的过程如图 4 所示。

- 1) 首先根据仿真雷达对象进行需求分析，明确其不同工作模式下信号处理模块由哪些功能组件构成以及各功能组件之间的交互逻辑；
- 2) 其次从组件库中选取所需要的组件；

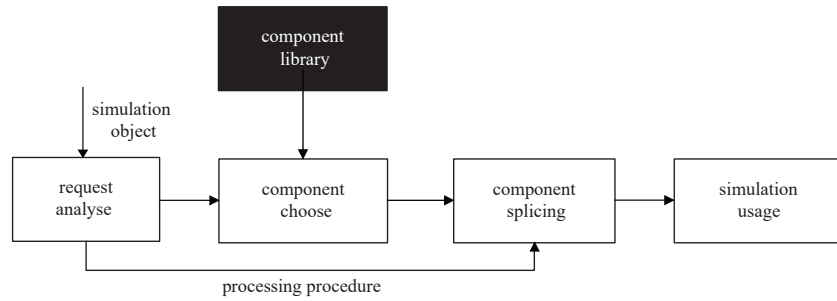


Fig.4 Building procedure of signal processing module

图4 信号处理模块构建过程

3) 然后根据需求分析中所确定的信号处理流程进行组件的拼接;

4) 最后将构建的信号处理模块接入仿真系统进行使用。

下面以某型相控阵雷达为例对其低空探测场景下信号处理模块的构建进行说明。

首先, 分析此型雷达信号处理模块的构成。相比于常规信号处理而言, 在低空探测场景下为克服杂波影响, 该雷达在一个驻留波位内顺序发射 3 个线性调频脉冲, 接收后进行 3 脉冲 MTI 处理。因此, 其信号处理流程如图 5 所示。

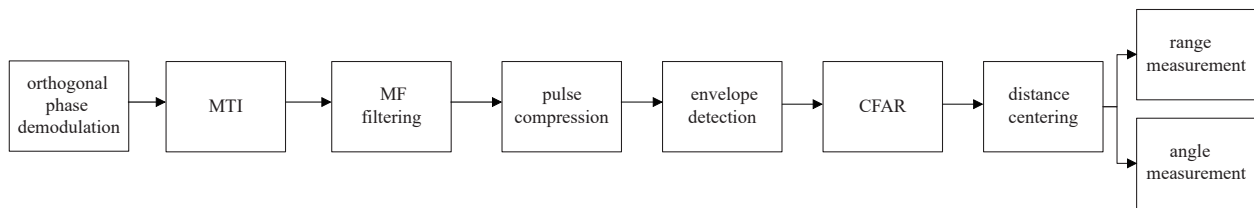


Fig.5 Signal process module and procedure for a certain radar

图5 某雷达信号处理模块组成及处理流程

其次, 根据图 5 的流程图来看, 从组件库中选择此信号处理模块需要的组件包括正交鉴相组件、中频滤波组件、MTI 组件、脉冲压缩组件、包络检波组件、CFAR 组件、距离定心组件、距离测量组件以及角度测量组件。

然后根据信号处理流程进行组件的拼接, 将选择出的组件 dll 动态链接库在信号处理模块中按照处理顺序进行连接, 根据该雷达信号处理的参数按照 2.2 节组件设计方法进行组件初始化参数与输入参数的设置以及输出结果之间的交互。

最后即形成了所需要的信号处理模块函数, 对于其他场景模式下的不同信号处理流程参照此步骤进行设计完成, 加入到仿真系统中进行调用。

## 4 实际试验验证

### 4.1 试验仿真系统架构

本节通过一个具体雷达信号处理仿真系统试验来验证本文所提基于组件库的信号处理模块设计方法的有效性。整个系统的架构如图 6 所示, 主要由目标回波模拟器、控制设备以及信号处理服务器三个部分构成, 通过光纤互相连接来完成数据交互。其中目标回波模拟器可以按照设定的目标距离来完成特定信号下简单目标回波的模拟, 控制设备则完成信号处理服务器与回波模拟器之间的信息交互, 一方面将信号处理服务器的发射信号参数通过光纤传给模拟器, 另一方面则将模拟器生成的回波传递给信号处理服务器进行处理。

### 4.2 试验场景设计

试验中, 针对某 X 波段相控阵体制雷达高空探测场景进行模拟。在高空探测场景下, 其在一个波位驻留内发射单个线性调频脉冲, 假设其信号载频为  $f_s=10$  GHz, 中频为  $f_0=30$  MHz, 信号带宽为  $B=5$  MHz, 脉冲宽度  $T=300$   $\mu$ s, 一个波位驻留时间为  $T_d=1$  ms, 回波采样率  $f_s=20$  MHz。由于使用模拟器不能模拟角度信息, 这里仅假设目标距离为  $R=50$  km。基于以上场景与条件, 该雷达仿真试验中的信号处理流程如图 7 所示, 所需要组件包括正交鉴相、中频滤波、脉冲压缩、包络检波、CFAR、距离定心以及距离测量组件。通过微软 Visual Studio 2013 开发环



境将选取的组件 dll 动态链接库进行拼接编写成信号处理执行函数在信号处理服务器中部署运行，以执行仿真雷达信号处理功能，如图 8 所示。这里需要额外假定的关键信号处理参数包括：中频滤波带宽设置为 10 MHz；脉冲压缩算法采用频域脉压方法；CFAR 算法采用单元平均 CFAR(Cell Averaging-CFAR, CA-CFAR)，保护单元与参考单元数分别为 2 和 16，CFAR 门限值为 5 倍。

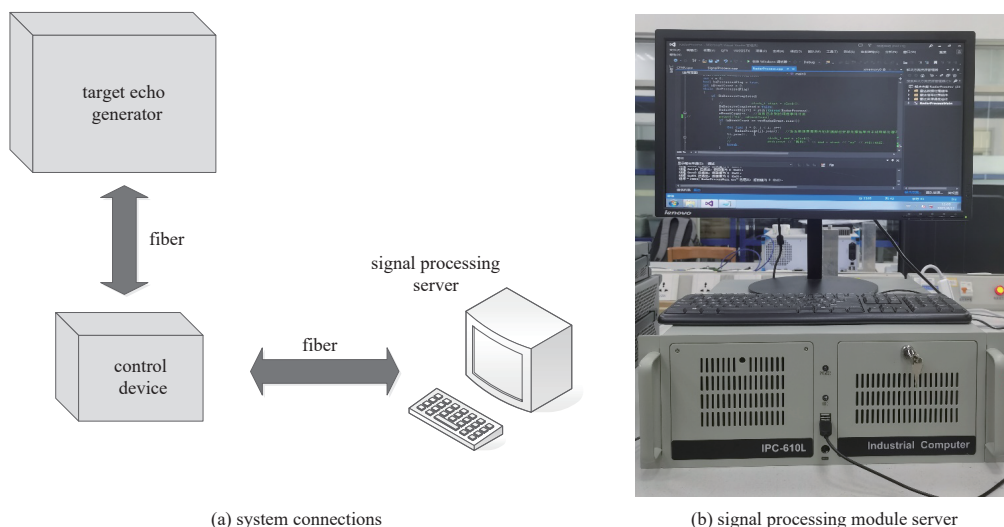


Fig.6 Structure of the radar signal processing module experiment system  
图 6 雷达信号处理仿真试验系统架构

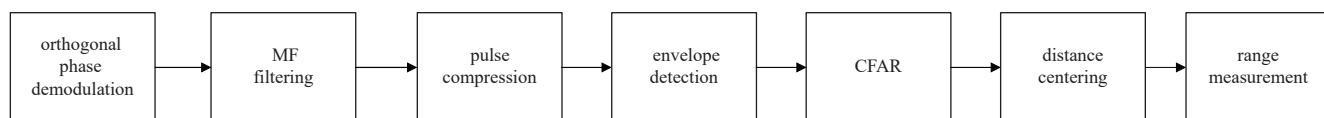


Fig.7 Procedure of the radar signal processing module of the experiment system  
图 7 雷达信号处理仿真试验系统信号处理模块处理流程

### 4.3 试验结果分析

在给定的信号参数与仿真场景下，将信号处理模块各阶段处理后的回波信号采样存储下来并用 MATLAB 作图得到的结果如图 9 所示。

从图 9(b)可以看出，中频滤波后回波信号的频谱范围为 -5 MHz 到 5 MHz，与中频滤波的 10 MHz 带宽范围一致；从图 9(c)可以看出，包络检波后的脉冲压缩输出峰值位置在  $R=50\text{ km}$  处，与目标参数设置一致；从图 9(d)红色框出的部分可以看出，进一步再经过 CFAR 处理、距离定心以及距离测量后得到的最终点迹报告中目标的距离信息为 50 km，与仿真条件中假定一致。因此，试验结果证明了本文提出的组件化雷达信号处理模块的正确性与有效性。

## 5 结论

本文提出了一种雷达仿真系统信号处理模块组件化设计与仿真方法。所提方法通过将雷达信号处理分解成若干功能组件的方式，在实际使用中可以根据不同仿真场景、不同雷达对象等进行灵活拼接，极大地提高了雷达系统仿真的效率，仿真试验也证明了所提方法的有效性。实际上，对于雷达仿真来说，天线模拟、回波模拟、数据处理、资源调度等其他处理模块也可进一步分割成更多独立功能组件，如数据处理模块按照功能可以划分为航迹起始、航迹关联、跟踪滤波、航迹管理等独立功能模块，后续将针对此方面开展深入研究，以达到雷达仿真全系统的组件化设计。

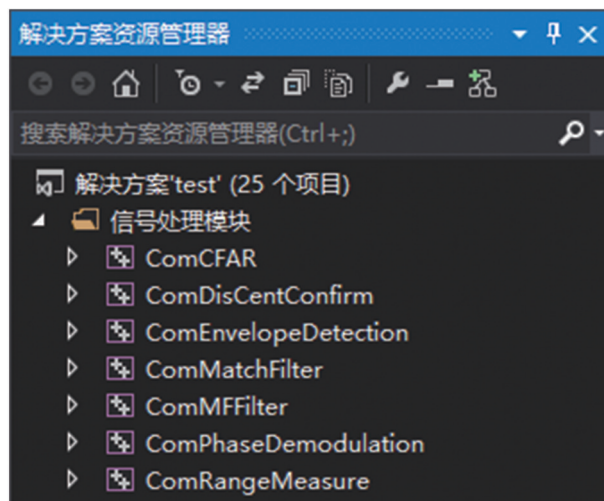


Fig.8 Radar signal processing module constructed in Visual Studio  
图 8 Visual Studio 中构建的对应信号处理模块

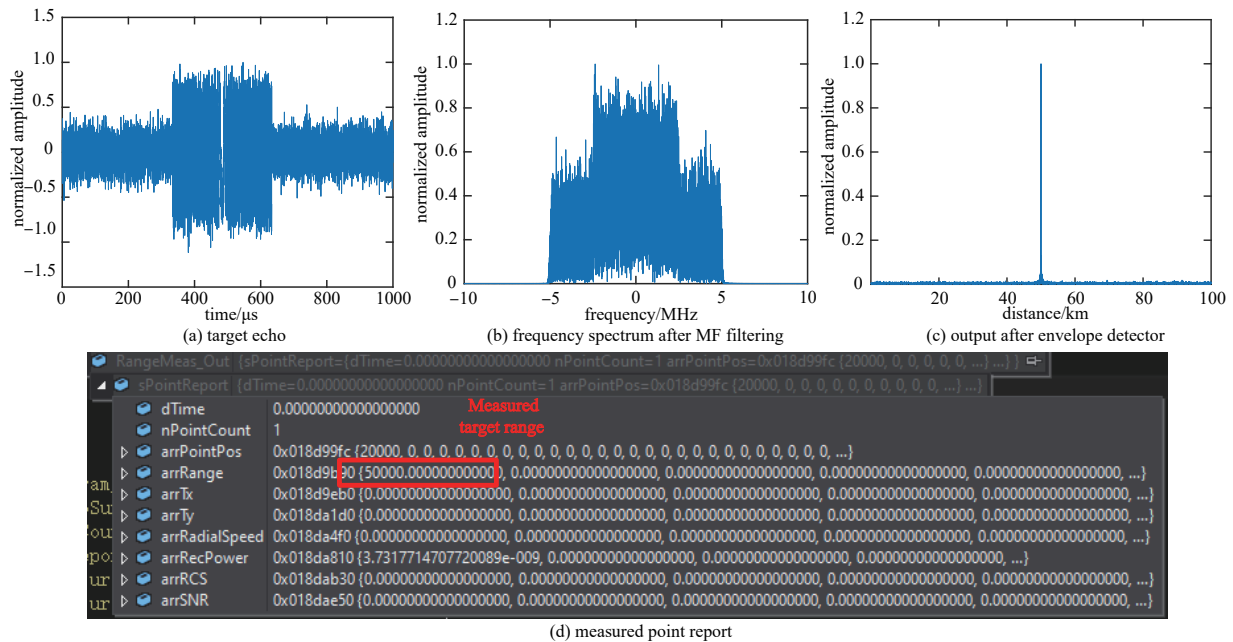


Fig.9 Processing result of radar signal processing module  
图9 信号处理模块处理结果

#### 参考文献:

- [1] OLIVER C, QUEGAN S. Understanding synthetic aperture radar images[M]. Boston, London: Artech House, 2004.
- [2] 王雪松, 肖顺平, 冯德军, 等. 现代雷达系统建模与仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010. (WANG Xuesong, XIAO Shunping, FENG Dejun, et al. Modern radar system modeling and simulation[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2010.)
- [3] HE W C, ZHANG L X, LI N J. A new method to improve precision of target position in RFS[C]// Proceedings of the international conference on microwave and millimeter wave technology. Guilin, China: [s.n.], 2007: 1-3.
- [4] LIU Xiaobin, LIU Jin, WU Qihua, et al. Experimental study on pulse radar probing in RFS based on interrupted transmitting and receiving[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2018, 31(3): 575-583. doi:10.1016/j.cja.2017.12.017.
- [5] 安红, 杨莉. 电磁环境仿真与可视化分析系统[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018, 16(6): 1039-1044. (AN Hong, YANG Li. Electromagnetic environment simulation and visualization analysis system[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018, 16(6): 1039-1044.) doi:10.11805/TKYDA201806.1039.
- [6] 孙艳丽, 张海, 陈小龙, 等. 基于实测数据的雷达动目标多变换积累仿真[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2020, 18(5): 813-819. (SUN Yanli, ZHANG Hai, CHEN Xiaolong, et al. Multi-transform domain method for moving target of sea radar based on real radar data[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2020, 18(5): 813-819.) doi:10.11805/TKYDA2019208.
- [7] 赵锋, 王雪松, 肖顺平, 等. 相控阵雷达系统分布式仿真[J]. 系统工程与电子技术, 2005, 28(9): 848-852. (ZHAO Feng, WANG Xuesong, XIAO Shunping, et al. Distributed simulation of the phase array radar system[J]. System Engineering and Electronics, 2005, 28(9): 848-852.)
- [8] 赵晶, 刘义, 来庆福, 等. 防空作战电磁环境建模与仿真[J]. 系统仿真学报, 2012, 24(2): 258-262. (ZHAO Jing, LIU Yi, LAI Qingfu, et al. Modeling and simulation of battlefield electromagnetic environment in aerial defense warfare[J]. Journal of System Simulation, 2012, 24(2): 258-262.) doi:10.16182/j.cnki.joss.2012.02.011.

#### 作者简介:

彭玲玉(1989-), 女, 江苏省盐城市人, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为雷达电子战仿真与评估以及雷达电子侦察技术. email: 757918196@qq.com.

吴其华(1990-), 男, 江苏省盐城市人, 博士, 讲师, 主要研究方向为雷达电子战仿真与评估以及雷达电子对抗.

刘晓斌(1990-), 男, 郑州市人, 博士, 讲师, 主要研究方向为雷达电子战仿真与评估以及雷达信号处理.

赵锋(1978-), 男, 南京市人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为雷达电子战仿真与评估以及雷达信号处理.

肖顺平(1964-), 男, 南昌市人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为雷达电子战仿真与评估以及雷达极化信息处理.