

1-2-2019

Design and Implementation of Signal Level Mono-Pulse Tracking Radar Simulation System

Chaoxuan Shang

1.Army Engineering University, Shijiazhuang 050003, China; ;

Zhao Yang

1.Army Engineering University, Shijiazhuang 050003, China; ;

Zhuangzhi Han

1.Army Engineering University, Shijiazhuang 050003, China; ;

Han Ning

2.Instrument Technology Research Institute, Shijiazhuang 050003, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Design and Implementation of Signal Level Mono-Pulse Tracking Radar Simulation System

Abstract

Abstract: In view of the poor compatibility between the particle size of simulation and tracking feedback control in tracking radar simulation system, *a signal level mono-pulse tracking radar simulation system is constructed based on SystemVue simulation platform*. Simulation system is layered and simulation framework is built according to the requirements of the simulation system. *The key technologies in the process of simulation are analyzed, and the simulation results with distance and angle tracking loop are given*. System implementation is of great significance for mono-pulse radar system design, demonstration, equipment development appraisal as well as combat training and practice under the condition of information-based war, which also lays a foundation for further improvement and promotion of digital radar simulation system.

Keywords

tracking radar, simulation system, mono-pulse, signal level, SystemVue

Recommended Citation

Shang Chaoxuan, Zhao Yang, Han Zhuangzhi, Han Ning. Design and Implementation of Signal Level Mono-Pulse Tracking Radar Simulation System[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(3): 895-905.

信号级单脉冲跟踪雷达仿真系统设计与实现

尚朝轩¹, 赵杨^{1*}, 韩壮志¹, 韩宁²

(1. 陆军工程大学石家庄校区, 河北 石家庄 050003; 2. 军械技术研究所, 河北 石家庄 050003)

摘要: 针对跟踪雷达仿真系统中仿真粒度与跟踪控制反馈难以兼容的问题, 基于 SystemVue 仿真平台, 构建完整的信号级的单脉冲跟踪雷达仿真系统。围绕仿真系统的设计需求, 对仿真系统进行了分层, 构建了仿真框架, 将仿真过程中的关键环节与技术进行了剖析, 并给出了在信号级仿真条件下, 加入距离、角度跟踪环路之后的仿真结果, 验证了整个单脉冲跟踪雷达仿真系统的可行性。该系统的实现对于信息化战争条件下单脉冲雷达的系统设计、装备发展论证、装备试验鉴定及评估以及作战训练及演练具有重要意义, 为未来进一步完善与推进数字雷达仿真系统奠定了基础。

关键词: 跟踪雷达; 仿真系统; 单脉冲; 信号级; SystemVue

中图分类号: TN971

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2018) 03-0895-11

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201803016

Design and Implementation of Signal Level Mono-Pulse Tracking Radar Simulation System

Shang Chaoxuan¹, Zhao Yang^{1*}, Han Zhuangzhi¹, Han Ning²

(1. Army Engineering University, Shijiazhuang 050003, China; 2. Instrument Technology Research Institute, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: In view of the poor compatibility between the particle size of simulation and tracking feedback control in tracking radar simulation system, a signal level mono-pulse tracking radar simulation system is constructed based on SystemVue simulation platform. Simulation system is layered and simulation framework is built according to the requirements of the simulation system. The key technologies in the process of simulation are analyzed, and the simulation results with distance and angle tracking loop are given. System implementation is of great significance for mono-pulse radar system design, demonstration, equipment development appraisal as well as combat training and practice under the condition of information-based war, which also lays a foundation for further improvement and promotion of digital radar simulation system.

Keywords: tracking radar; simulation system; mono-pulse; signal level; SystemVue

引言

上世纪五十年代诞生了第一部单脉冲跟踪测量雷达系统^[1]。单脉冲雷达凭借着其廉价与高精度

的完美结合, 目前大量应用于各个领域中的跟踪雷达。近十几年来, 随着武器系统的发展, 国内外纷纷研制成功了相控阵单脉冲跟踪测量雷达系统, 这类跟踪雷达同时拥有单脉冲技术的精确跟踪测量性能和相控阵技术的波束捷变性能, 实现了同时对多目标的跟踪, 单脉冲跟踪雷达仍是目前应用最为广泛的一种跟踪测量雷达。

雷达系统仿真早在 20 世纪 70 年代便已经开



收稿日期: 2016-02-29 修回日期: 2016-06-24;
基金项目: 国家自然科学基金(61601496);
作者简介: 尚朝轩(1965-), 男, 河南, 博士, 教授、博导, 研究方向为雷达信号处理、武器系统评估; 赵杨(通讯作者 1992-), 男, 山东, 博士生, 研究方向为雷达系统仿真、雷达信号处理。

<http://www.china-simulation.com>

• 895 •

始,当时的仿真还主要集中在功能级的仿真,仿真粒度较为粗糙^[2]。70年代后期,随着计算机技术的发展,雷达系统的仿真也随之腾飞,80年代的贝卡谷地战争,90年代的海湾战争,21世纪的二次海湾战争,这三场战争见证了电子战从名不见经传到闻名天下的转变。从中不难发现,雷达电子战已经成为现代战争中不可缺少、甚至左右全局的关键因素。实装演习的缺点显而易见,费用高、次数少、环境单一以及准备周期过长,在此背景下,建立一套能够分析、评估电子战性能的仿真系统已经成为共识。它不仅可以实现对敌方电子装备的模拟,还能把单一装备的对抗上升到系统与系统、体系与体系的对抗。通过仿真手段对雷达电子战进行评估甚至是目前唯一有效的办法。

数字式仿真的发展敦促着仿真粒度不断缩小,雷达系统仿真已经由最初的功能仿真逐渐向信号的本质靠拢,尤其在信号处理领域,数字仿真系统几乎可以完美的复现实际雷达信号处理过程,但通过对诸多文献的阅读,可以发现跟踪雷达仿真系统仍存在的问题^[3, 4],主要是雷达系统仿真多集中在子系统的仿真,系统仿真不够完善,并且在天线伺服等控制回路,由高采样率得到的大量数据派不上太多用场,甚至略显多余,不能很好地解决仿真粒度与控制系统的冲突。本文为解决以上问题,基于 SystemVue 平台,设计了较为完整的信号级的单脉冲跟踪雷达数字仿真平台,将天线伺服系统嵌入到雷达的跟踪过程,实现了对整个信号级跟踪雷达的一体化建模仿真,最后分析了仿真结果,验证了仿真平台的可行性,对今后利用该雷达平台进行电子战相关领域的分析与评估具有重要作用。

1 仿真系统框架

1.1 需求分析

信号级的单脉冲跟踪雷达仿真系统面向跟踪雷达系统,合理的仿真框架是基础。本文主要解决在信号级的雷达仿真系统中添加控制模块,以完成雷达系统闭环建模的问题。为了满足仿真系统在武器装

备从设计、研制、测试以及维护的整个过程的适用性,在以下几个方面均需要满足要求:

(1) 通用性。能够支持传统机械扫描单脉冲雷达,又同时兼顾到先进的相控阵单脉冲雷达;既能支持比幅法测角,又能支持相位法测角等在各种单脉冲雷达系统仿真中都能普遍涵盖。

(2) 扩展性。根据不同开发者需求的侧重点,可以有针对性的进行某一模块或者几个模块的深入开发,比如信号处理模块、射频非线性模块、天线伺服模块等等;必要时可以替换相应的环节,甚至改变某些环节的顺序、或者构成方式。

(3) 交互性。通过清晰明了的仿真界面、简洁有序的系统分层以及多种辅助设计分析工具使开发者能够直观的了解仿真系统,通过对各级仿真结果的检验完善设计方案,边评估边改进,从而使设计逐步完善。

1.2 跟踪雷达任务分析

单脉冲跟踪雷达主要用于测定目标的距离、方位、仰角等信息并完成敌我属性识别,同时通过火控计算机结算目标未来点坐标,实时向火力系统提供精确的目标射击诸元,控制火力系统拦截该目标^[5]。

本文主要瞄准雷达对目标探测跟踪的闭环过程,故可将单脉冲雷达的整个探测跟踪过程分为以下3个部分:目标与雷达位置、发射接收与信号处理、跟踪控制。

第一部分主要用于在大地坐标系或者雷达天线坐标系下,产生雷达、目标的原始运动轨迹,在多目标或者多散射点的情况下,则分别产生各自的运动轨迹,并根据雷达与目标相对位置和角度的变化改变目标散射截面积。

第二部分的主要工作是信号的发射,以及将天线环节送来的回波信号进行放大、检波、滤波、积累、恒虚警处理等一系列处理过程,从杂波中检测到运动目标,提取出目标的各种有用信息,并将这些信息实时、自动、精确地输送到计算机系统以及跟踪系统,并配合系统自动完成对指定空域内目

标跟踪, 同时对危险目标进行报警。

第三部分则是将接收系统产生的俯仰、方位差信号进行处理, 满足伺服系统需求, 并用此信号控制功率变换器, 最终驱动电机完成天线座运动控制和目标随动。在相控阵跟踪雷达中, 则利用对差信号处理之后得到的相位信息控制波束指向。

1.3 框架构建

根据以上需求分析, 同时考虑到系统的实现难度, 提出单脉冲雷达跟踪仿真系统如图 1 所示。

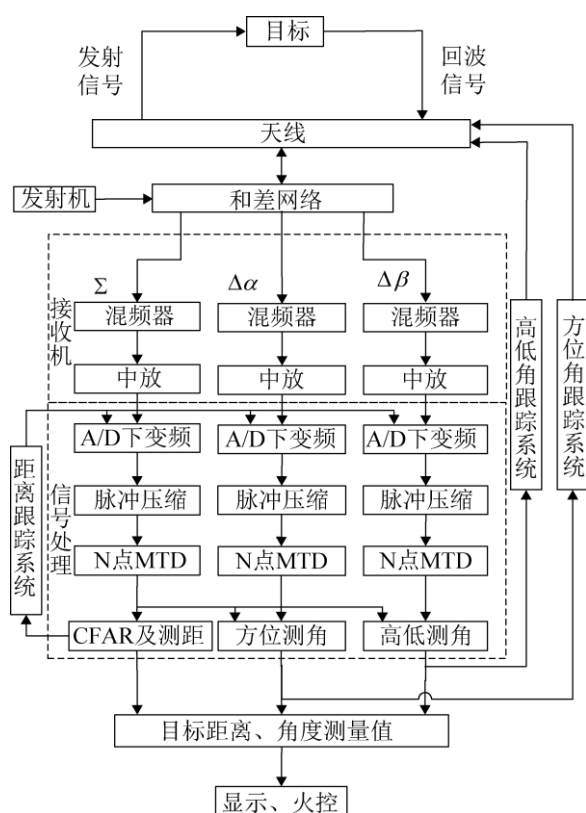


图 1 单脉冲雷达仿真系统示意图

Fig. 1 Single pulse radar simulation system

图中距离跟踪系统的反馈信号用于距离波门的选通, 高低差、方位差跟踪系统的反馈信号用于控制天线伺服; 和路信号同时用于与高低差、方位差信号进行和差比幅测角。整个仿真系统的信号处理部分只包含了应用广泛的数字下变频、脉冲压缩、以及恒虚警处理, 其它环节用户在搭建时可以根据需要添加或删减。雷达实际工作过程中, 信号处理的各个环节都要严格地保证信号的相位

相参性, 主要由频率综合器以及定时器进行控制, 由于该平台是基于数据流的仿真, 时间控制在每个模块的输入与输出端口均有已严格要求。

2 关键模块设计

SystemVue 是 Agilent 公司近些年大力发展的一款电子系统级仿真工具软件, 主要针对于通信、雷达、导航和电子战等领域^[6]。它以图符化模块构建理论模型, 是一个适用于动态系统分析的仿真平台, 能够对系统设计进行数字仿真, 完成系统性能的合理分析和仿真评估^[7]。其分析窗口可根据系统运行结果同时展现多个仿真波形图、频谱图等, 方便用户对比分析, 还可以根据需要改变数据接收器的参数, 快速绘制出时域、频域等多种曲线图。其内部搭载了详细的雷达、电子战模块以及应用实例, 在其公司对软件的测试报告^[8-10]中显示, 该软件可形成纯软件的完整的雷达系统以及雷达对抗系统。该软件可调用 Matlab 软件以及 C++ 程序, 形成程序包子模块, 在最新版本中已经能完全兼容 Matlab 语言, 减少了在软件连接中产生的不必要的麻烦, 方便用户的编译。该软件也可以通过接口模块, 连接相应硬件设备, 实现半实物系统。

故可将目标与雷达位置、发射接收与信号处理、跟踪控制 3 个部分分别归纳为航迹层、信号层与跟踪控制层的设计, 下面将分别进行阐述。

2.1 航迹层设计

航迹层主要包括雷达与目标的位置、速度、加速度以及目标的雷达散射截面(RCS), 对于单部雷达而言, 其发射和接受位置相同, 如若有多个目标, 则需设定多条运动轨迹和多个散射点。

2.1.1 简单航迹

根据目标航迹的复杂程度, 可以使用软件平台中给定的模块, 比如匀速或匀加速直线运动的目标, 把运动物体当做点目标看待, 其 RCS 基本保持不变, 具体实现如图 2(a): 目标的运动轨迹与 RCS 变化模型均在“Target”模块中进行设置。

2.1.2 自定义航迹

用户也可以通过构建运动方程实现目标的曲线、爬升以及俯冲运动等,如图2(b)。此时可以构建统一的以雷达为中心的坐标系,从而省略坐标转换过程。运动方程的构建可通过 Matlab 模块实现,详见仿真结果。

运动目标的 RCS 受目标与雷达之间相对位置以及姿态角的影响而是起伏的,此处参考常用的 Swerling III 模型来描述 RCS 的起伏特性,其概率密度函数(PDF) $p(\sigma)$ 表示如式(1):

$$p(\sigma) = \frac{4\sigma}{\sigma_a^2} \exp\left(-\frac{2\sigma}{\sigma_a}\right) \quad (1)$$

式中: σ 为 RCS; σ_a 为设定的 RCS 均值。设 RCS 均值为 1, 变化范围为 0 到 6, 分布特性如图 3 所示。

2.2 信号层设计

信号层的设计包含信号从产生、发射到接收、处理的全过程。在跟踪雷达中,对目标回波进行信号处理,不仅要实现目标的检测,同时要完成对距离误差、角度误差的提取,旨在为跟踪控制系统提供控制信号,这是实现闭环跟踪的关键。下面就几个主要模块加以介绍。

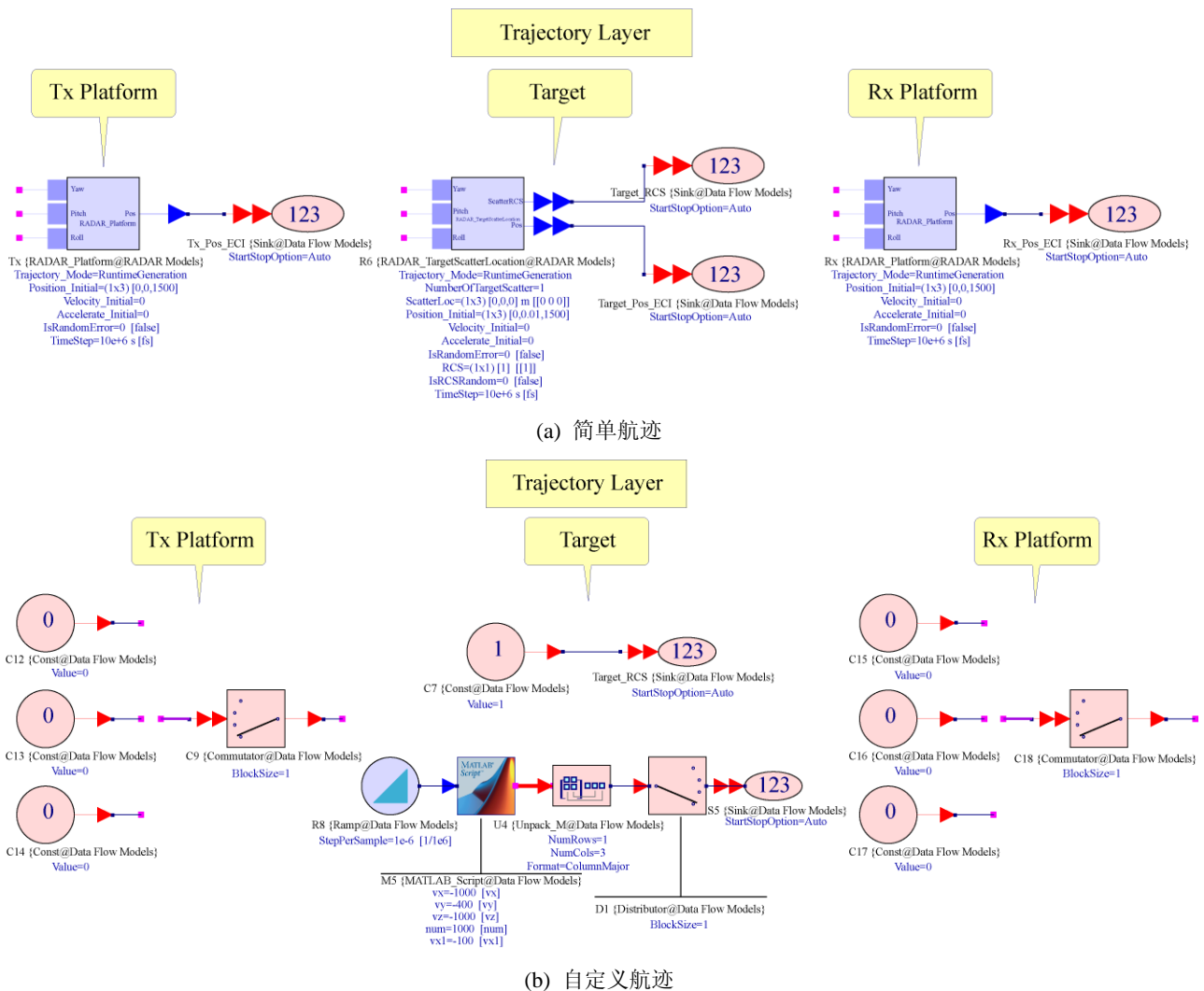


图 2 航迹层设计

Fig. 2 Trajectory layer design

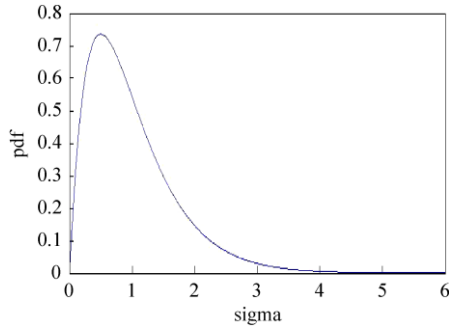


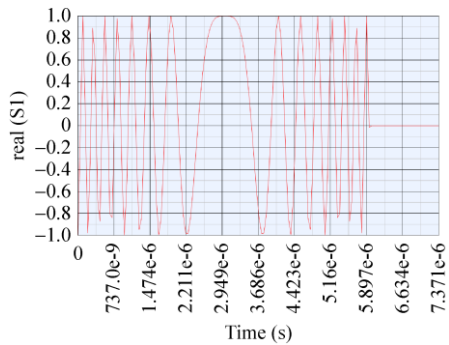
图 3 RCS 分布特性
Fig. 3 Distribution feature of RCS

2.2.1 发射信号

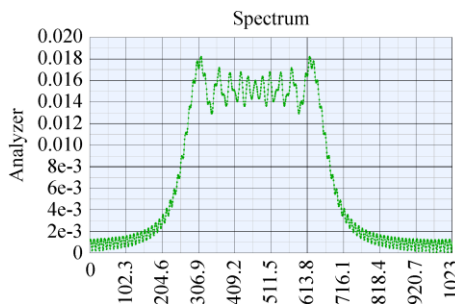
为了解决距离分辨率与速度分辨率的矛盾, 跟踪雷达一般会选用线性调频信号或者相位编码信号等, 并会采取频率捷变以及大带宽等一系列手段提高自身隐身能力, 在设计时应当充分考虑到以上因素, 此处选用线性调频信号, 其定义为:

$$s(t) = \begin{cases} \exp[j\pi\beta(t-\tau/2)^2], & 0 \leq t \leq \tau \\ 0, & \tau \leq t \leq PRI \end{cases} \quad (2)$$

式中: β 为带宽, t 为脉宽, PRI 为脉冲重复周期。其波形与频谱如图 4 所示。



(a) 发射信号波形

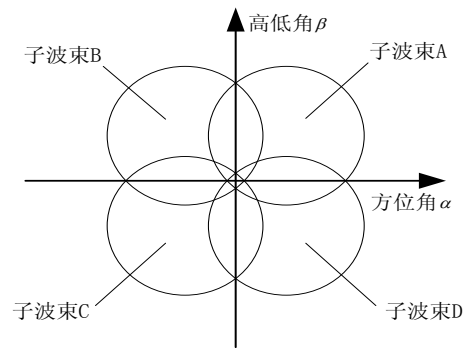


(b) 发射信号频谱

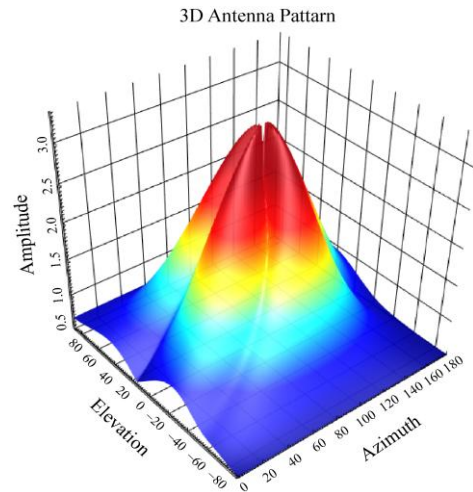
图 4 发射信号
Fig. 4 Transmitting signal

2.2.2 天线方向图模型

此处采用典型的单脉冲卡塞格伦形式的反射面天线, 其方向图是较为复杂, 一般采用特定的数学函数来作为简化的近似模型。跟踪雷达天线通常采用辛克函数来近似, 则单个单元天线方向图用 $F(\theta) = \sin \theta / \theta$ 表示。由于火控雷达是对空间目标进行三维跟踪测量的, 需要进行三维天线方向图的模拟来描述空间波束的分布情况^[11]。天线方向图示意图如图 5 所示。



(a) 天线四馈源子波束空间截面



(b) 三维馈源示意图

图 5 天线四馈方向图
Fig. 5 Four source antenna Pattern

2.2.3 脉冲压缩模型

对于 LMF 信号而言, 脉冲压缩后旁瓣较高, 可能导致在目标检测中超过检测门限造成虚警率

的增高,因而常常需要采用失配加权方法来抑制旁瓣。通常失配加权方法是选择合适的窗函数(如汉宁函数、汉明函数等)与匹配滤波器的频率响应相乘来实现的。在仿真中,采用频域数字脉压加窗方法进行。该方法是通过输入信号与参考信号进行 FFT 相乘,将乘积进行 IFFT 变换至时域,并采用时域加窗的失配加权方法来抑制旁瓣过高的问题^[12],其原理图如图 6 所示。

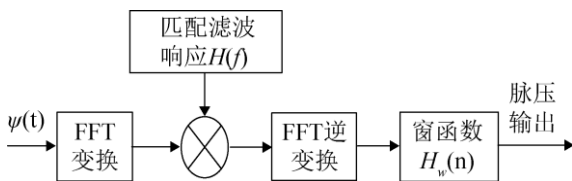


图 6 频域数字脉压加窗原理框图

Fig. 6 Digital pulse compression principle

参考信号为回波信号复共轭,可表示为:

$$H(f) = k\psi_{LFM}^*(f) \exp(-j2\pi ft_0) \quad (3)$$

式中, $\psi_{LFM}(f)$ 为 LFM 信号的频谱。

加窗前脉压输出可表示为:

$$\psi_0(t) = FFT^{-1}(\psi_{LFM}(f)H(f)) \quad (4)$$

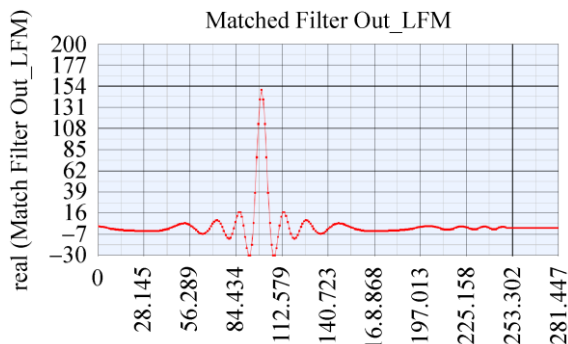
加窗后脉压输出可表示为:

$$\psi_0'(t) = FFT^{-1}(\psi_{LFM}(f)H(f))H_w(n) \quad (5)$$

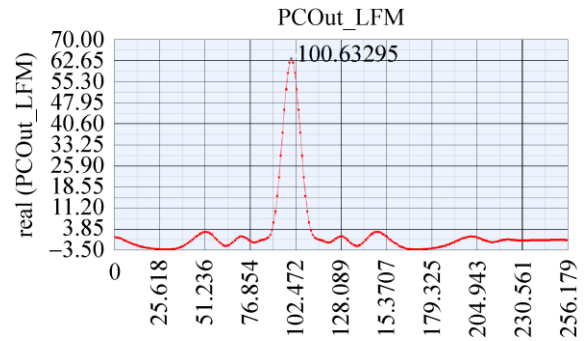
此处,采用汉明(Hamming)窗处理,其时域表示式为:

$$H_w(n) = \begin{cases} 0.54 - 0.46 \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right), & 0 \leq n \leq N-1 \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (6)$$

LFM 信号加窗前后脉压输出波形如图 7 所示。



(a) 加窗前波形



(b) 加汉明窗后

图 7 脉压输出波形

Fig. 7 Output signal after pulse compression

在加窗之前,脉压输出的最大旁瓣电平达 -13.4 dB,在采用汉明窗加权处理后,最大旁瓣电平明显减小,仅 -40 dB 左右,而主瓣宽度 τ 略有变宽。这个现象说明加窗处理可以较好的抑制旁瓣电平,但是对距离分辨力的有一定的影响。

2.2.4 距离误差提取

在距离自动跟踪时,采用分裂波门方法,该方法是在信号处理检测到目标后,通过时间鉴别器获取表征距离误差变化情况的前、后波门差异,进而控制波门移动来实现实时连续地跟踪测量目标距离。其工作原理是将前、后波门中心与回波信号中心之间的时间差转换成不同幅度、不同极性的量化数值,通常可以通过分裂前、后波门与回波信号中心重叠面积积分的差值来解算。时间鉴别器输出特性曲线如图 8 所示。

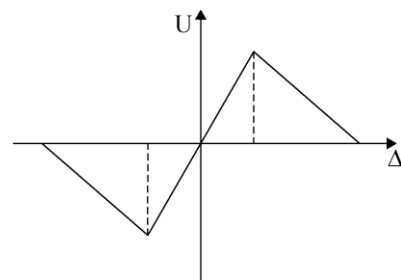


图 8 时间鉴别输出函数曲线

Fig. 8 Output curve of time discriminator

从曲线中可以看出,距离分裂波门内表征距离误差的时间差与时间鉴别特性幅度近似呈线性比例关系。故可以依据幅度与距离误差的线性关系通

过插值解算出距离误差。

在仿真中, 需要对选通的距离波门内进行等间隔采样和相关处理来进行测距。为了保证波形不失真, 通常采样间隔要比压缩后的脉冲宽度小很多, 一个选通波门内的回波信号会产生多个超过目标检测门限的采样点。回波中心与波门中心关系示意图如图 9 所示。

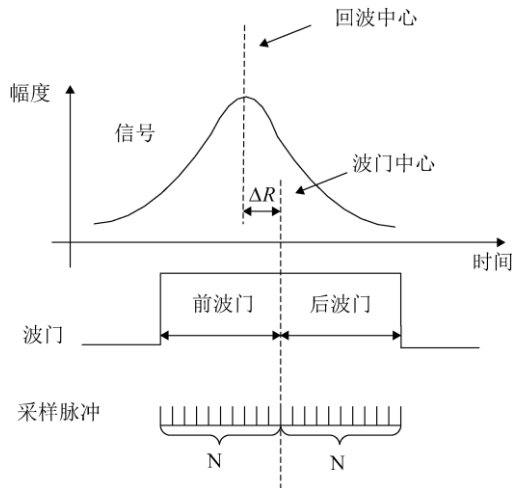


图 9 距离误差生成原理

Fig. 9 Generating principle of distance error

设前波门、后波门采样点数都为 N , 其波门内的超过门限的采样点幅度分别表示为 $H_1, H_2 \cdots H_N, L_1, L_2 \cdots L_N$, 此时, 波门中心与目标的距离误差可以依据前、后波门内幅度之和的差值, 并以距离波门内的最大采样点幅度作归一化处理便可得到^[13], 可表示为:

$$\Delta R = \frac{\sum_{i=1}^N H_i - \sum_{j=1}^N L_j}{2K_T \max(H_1, H_2 \cdots H_N, L_1, L_2 \cdots L_N)} \quad (7)$$

式中: K_T 为时间鉴别特性曲线斜率。

2.2.5 角度误差提取

为满足跟踪雷达在高低角、俯仰角上同时跟踪目标, 此处采用双平面振幅和差的测角方式, 故角误差的提取需要从方位角、高低角两个平面考虑。对于双平面振幅和差测角而言, 表征目标偏离雷达中心波束角度大小和相位比值的方位角、高低角鉴别输出函数可表达为:

$$S_{\Delta\alpha} = \frac{\psi_\alpha(t)}{\psi_\Sigma(t)} \quad (8)$$

$$S_{\Delta\beta} = \frac{\psi_\beta(t)}{\psi_\Sigma(t)} \quad (9)$$

方位角、高低角鉴别输出曲线如图 10 所示。

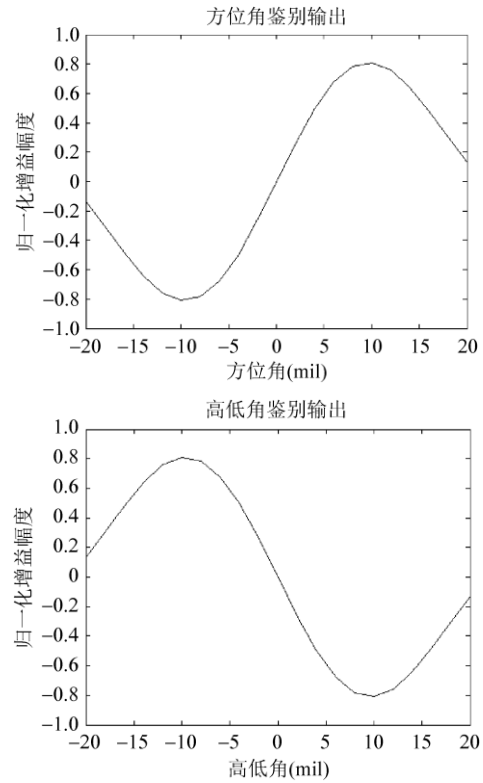


图 10 角度鉴别输出曲线

Fig. 10 Output curve of angle identification

不难看出, 在波束测角范围内 $S_{\Delta\alpha}$, $S_{\Delta\beta}$ 曲线呈线性变化, 近似为直线, 利用插值的方式就可以获取角误差。

在仿真中, 依据已知的距离波门选通后的和、差的三路回波信号, 分别对各自通道内所有采样点幅度求和, 并作归一化处理, 便可分别估算出方位角和高低角误差信号, 则目标的方位偏差角 α 和高低偏差角 β 可以近似的估计为^[14]:

$$\hat{\alpha} = \frac{1}{K_\alpha} \frac{\sum U_\alpha(N_i, \alpha)}{\sum U_\Sigma(N_i)} \quad (10)$$

$$\hat{\beta} = \frac{1}{K_\beta} \frac{\sum U_\beta(N_i, \beta)}{\sum U_\Sigma(N_i)} \quad (11)$$

式中: $\sum U_\Sigma(N_i)$ 、 $\sum U_\alpha(N_i, \alpha)$ 、 $\sum U_\beta(N_i, \beta)$ 分别表示距离波门内的和通道、方位差通道、高低差通

道信号实部之和； K_α 、 K_β 分别为方位与高低方向的角度鉴别斜率。

2.3 控制层设计

跟踪控制系统主要包括距离自动跟踪系统与天线伺服系统两部分，两者都是负反馈闭环控制系统，其主要任务是分别控制距离波门移动和波束指向，使距离波门和波束主瓣始终对准目标，并连续、实时测定目标的三维空间坐标^[15]。

2.3.1 距离跟踪系统建模与仿真

数字距离跟踪方式在测距精度、系统联调、响应速度等方面具有明显优势，故本文采用数字距离跟踪系统来进行建模仿真。通常此系统主要由提取距离误差的时间鉴别器D、用于距离与速度平滑与预测的 α - β 滤波器、用于消除速度误差的速度产生器、用于获取目标距离的距离计数器、用于对距离波门产生时间量化的插值延时器、用于获取前后距离波门的波门产生器以及用于系统调零、控制的逻辑装置等组成。基于跟踪性能考虑，通常将系统作为二阶离散闭环系统来构建模型^[16]，其功能结构图如图11所示。

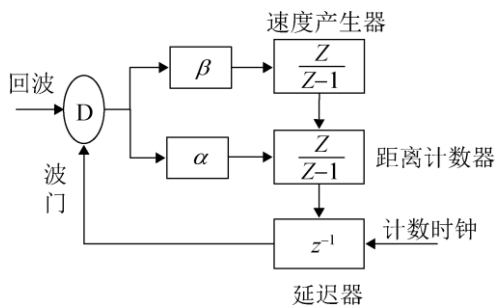


图11 自动距离跟踪系统结构框图

Fig. 11 Structure of auto distance track system

该系统传递函数模型可以表示为：

$$H(Z) = \frac{(\alpha + \beta)Z - \alpha}{Z^2 - (2 - \alpha - \beta)Z - (\alpha - 1)} \quad (12)$$

式中： α 、 β 分别为距离与速度支路的滤波参数。

2.3.2 天线伺服系统建模与仿真

伺服系统是靠误差工作的反馈闭环控制系统，

通常设计成由电流回路速度回路和位置回路组成的三环二阶无静差系统，要求具有快速响应特性高跟踪精度和宽调速范围的性能指标^[17]。伺服系统数字仿真是利用计算机数值计算的方法，建立伺服系统控制对象的数学模型，通过选择不同形式和参数的校正环节，计算系统的输出特性。

由于天线控制系统在方位、高低两个支路相互独立、控制模式一致。以方位支路为例，其功能结构如图12所示。

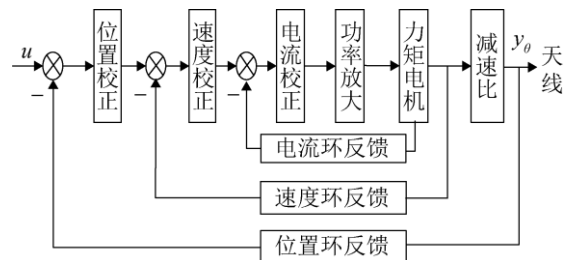


图12 方位角天线控制系统结构

Fig. 12 Structure of azimuth antenna control system

图中， μ 为电压电枢驱动， y_θ 为雷达天线的角度位移大小。在仿真建模时，通常采用满足性能指标需求的典型二阶传递函数来模拟天控系统的输出特性，其数学模型可描述为：

$$G_\theta(s) = \frac{Y_\theta(s)}{U(s)} = \frac{K}{T_2s^2 + T_1s + 1} \quad (13)$$

式中，通过计算机的输入、输出特性可以获得不同的控制环节的待定系数的值，本文的天控系统输出特性如图13所示。

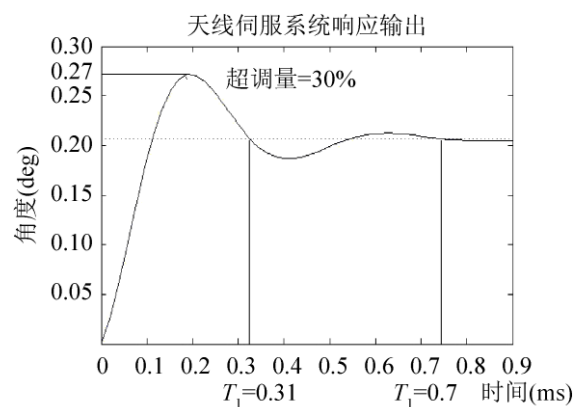


图13 天控系统输出特性

Fig. 13 Output feature of antenna control system

3 仿真实验

仿真中, 跟踪雷达的工作参数设置见表 1。

表 1 仿真参数

Tab. 1 Simulation parameter

雷达参数	大小	单位
脉冲宽度	5	μs
脉冲带宽	10	MHz
脉冲重复周期	100	μs
跳频频点	20	
工作频率	10	GHz
工作带宽	1	GHz
发射峰值功率	160	kW
天线主瓣增益	40	dB
虚警概率	10^{-6}	
综合损耗因子	6	dB
数据率	10	Hz
采样频率	20	MHz

发射线性调频信号的脉冲压缩比为 1:150, 采用 8 点 MTD。雷达发射、接收平台位置相同, 均设为坐标系原点, 目标航迹初始位置设定为 $x_0=16$

km, $y_0=10$ km, $z_0=5$ km, 假设目标航迹方程为:

$$\begin{cases} x = x_0 - 200t - t^2 \\ y = y_0 - 3500\sin(0.25\pi t) \\ z = z_0 - 25t \end{cases} \quad (14)$$

在自动跟踪模式下, 飞行时间 t 设定为 15 s。

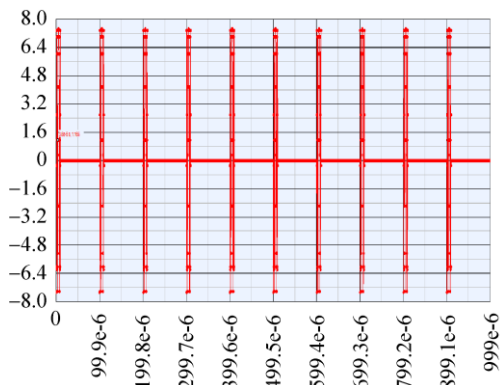
3.1 信号层结果

仿真系统的信号层输出结果如图 14。

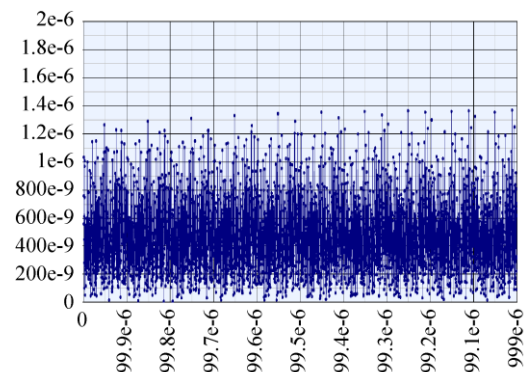
图中, (a) 为发射脉冲信号; (b) 为接收机接收到的带有杂波的混合信号, 目标信号被淹没在杂波中; 为去噪经过脉压处理后的回波信号; (c) 为经过放大检波滤波之后的输出波形, 可见能够初步将信号提取出来; (d) 为经过脉压匹配滤波之后的输出结果, 信号幅度有所放大, 且对噪声有明显的抑制; (e) 为经过 8 点 MTD 处理之后的输出结果; (f) 为经过 CFAR 处理后的清晰可见的目标信号。

3.2 跟踪控制结果

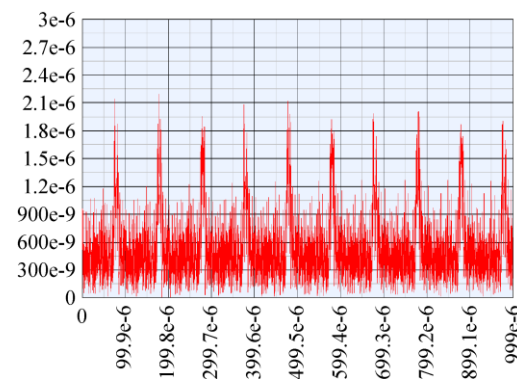
跟踪控制系统的仿真结果如图 15。



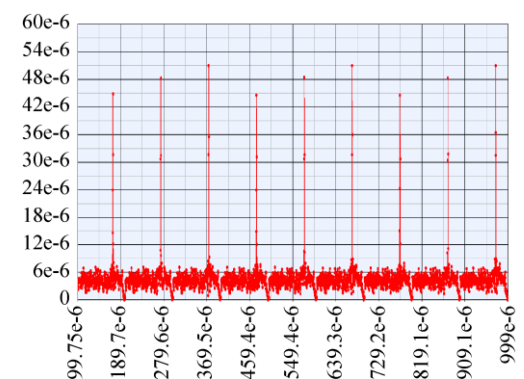
(a) 发射脉冲



(b) 接收回波



(c) 放大检波输出



(d) 脉压输出

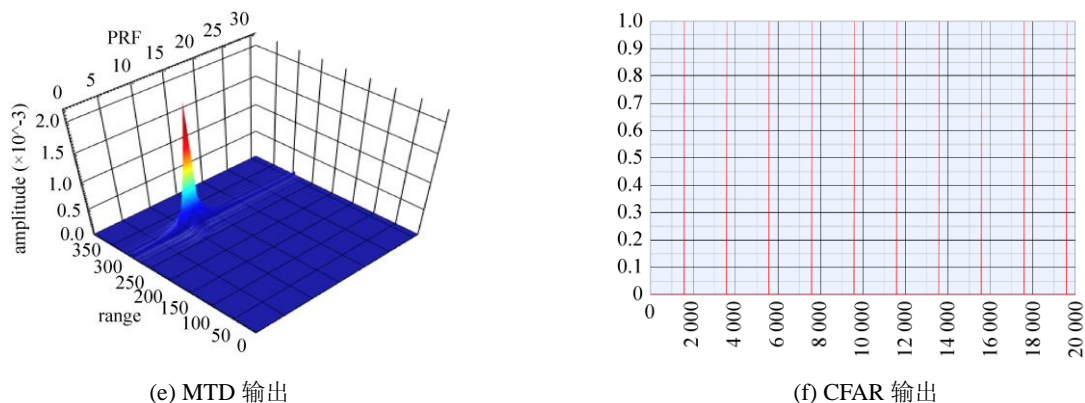


图 14 和路信号处理结果
Fig. 14 Signal processing result of 'sum' route

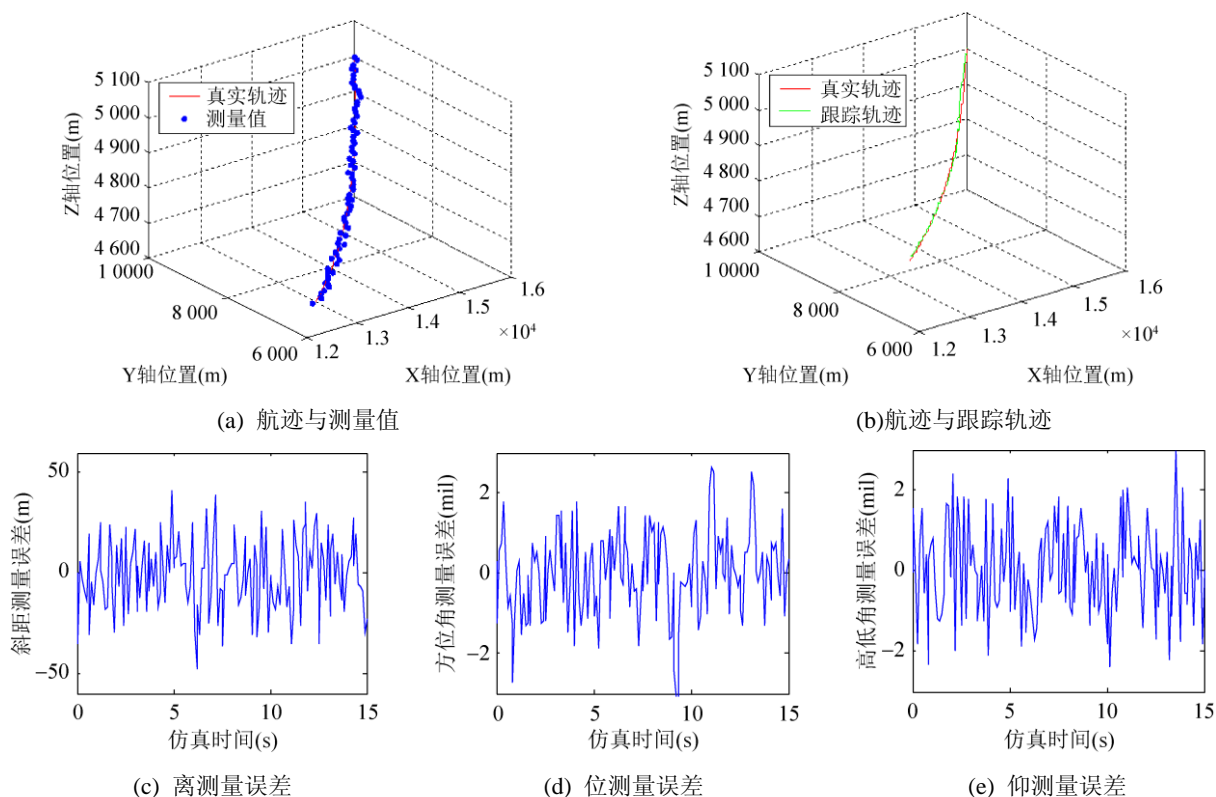


图 15 距离、角度跟踪结果
Fig. 15 Distance and angle tracking result

从仿真结果中可以看出,通过真实航迹与测量值的对比,可知跟踪雷达在探测跟踪过程中测角误差不超过 3 mil,测距误差为 40 m 左右,这说明该跟踪雷达能够动态闭环探测跟踪目标,具有较高的测角精度与测距精度,同时验证了该仿真系统各模块模型的准确性与有效性,为后续更深入的仿真系统的搭建提供有力支持;但同时跟踪环路的设计上仍有很大的提高空间,测角与测距误差仍与实际

雷达要求的精度有一定差距,需要进一步的完善。

4 结论

本文基于 SystemVue 软件,建立了单脉冲跟踪雷达仿真系统。详细阐述了该系统的组成结构及重要模块实现方法,在不影响仿真系统的信号处理的前提下,将距离、角度跟踪闭环添加到单脉冲雷达系统中,实现了信号级的跟踪雷达仿真。仿真实验

中, 利用该系统测试了仿真系统的跟踪精度, 结果显示本文构建的单脉冲雷达仿真系统能够有效地跟踪目标, 在诸多组建模块中, 同时可以利用更优、更逼真的建模方法进行有针对性的替换、增减, 以实现更优的效果。本文建立的信号级单脉冲跟踪雷达仿真系统符合数字化、信号级仿真的方向, 既能作为跟踪雷达精密仿真的基础, 又能作为电子对抗领域的子系统, 进而发挥更大的作用。

未来工作主要集中在对于单脉冲雷达的半实物仿真及仿真系统拓展两方面。利用实际装备代替信号产生或者信号处理单元等等, 提高系统的实时性; 仿真系统拓展则是将该系统应用于更完整的仿真系统中, 建立一套更完善的电子对抗仿真系统。

参考文献:

- [1] 王德纯, 丁家会, 程望东, 等. 精密跟踪测量雷达技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.
Wang Dechun, Ding Jiahui, Cheng Wangdong, et al. Precision tracking and measuring radar technology[M]. Beijing, China: Publishing House of Electronics Industry, 2006.
- [2] 王雪松, 肖顺平, 冯德军, 等. 现代雷达电子战系统建模与仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010.
Wang Xuesong, Xiao Shunping, Feng Dejun, et al. Modeling and Simulation of modern radar electronic warfare system[M]. Beijing, China: Publishing House of Electronics Industry, 2010.
- [3] 牟泽磊. 某型火控雷达信号处理仿真[D]. 成都: 电子科技大学, 2011.
Mu Zelei. Signal processing simulation of one certain type fire control radar[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2011.
- [4] 宋胜红. 单脉冲跟踪测量雷达系统建模与仿真[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
Song Shenghong. Modeling and simulation of monopulse tracking radar[D]. Xi'an: Xidian University, 2014.
- [5] 许小剑, 黄培康. 雷达系统及其信息处理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010.
Xu Xiaojian, Huang Peikang. Radar system and its information processing[M]. Beijing, China: Publishing House of Electronics Industry, 2010.
- [6] Limin Liu, Cheng Cheng, Zhuangzhi Han. Realization of radar warning receiver simulation system[J]. International Journal of Control and Automation (S2005-4092), 2015, 8(3): 363-374.
- [7] 林森, 高明明. SystemVue 环境下 M-Link 的应用[J]. 中国科技信息, 2008, 1(23): 91-93.
Lin Sen, Gao Mingming. The application of M-Link under SystemVue environment[J]. China Science and Technology Information, 2008, 1(23): 91-93.
- [8] David L, Anurag B. Radar system design and interference analysis using agilent SystemVue[Z]. Agilent Technologies Application Note, 2010.
- [9] David L, Anurag B. Using Agilent SystemVue to create realistic scenarios for radar and EW applications[Z]. Agilent Technologies Application Note, 2012.
- [10] David L, Anurag B. Using SystemVue's radar library to generate signals for radar design and verification[Z]. Agilent Technologies Application Note, 2011.
- [11] 陈长海. 反舰雷达导引头建模与仿真研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2009.
Chen Changhai. The study of modeling and simulation of anti-ship radar seeker[D]. Xi'an: Xidian University, 2009.
- [12] Richard E T, Maneesh S. Time frequency analysis as probabilistic inference[J]. IEEE Transaction on Signal Processing (S1053-587X), 2014, 62(23): 6171-6183.
- [13] 朱莹, 王金广, 高其娜, 等. 噪声干扰下雷达角度跟踪时滞伺服系统仿真[J]. 系统仿真学报, 2014, 8(26): 1814-1819.
Zhu Ying, Wang Jinguang, Gao Qi'na, et al. Noise jam on angle tracking radar delay servo system simulation[J]. Journal of System Simulation, 2014, 8(26): 1814-1819.
- [14] 王桃桃. 基于 Matlab/Simulink 的机载相控阵雷达系统的仿真研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
Wang Taotao. Simulation research of airborne phased array radar system based on Matlab/Simulink[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014.
- [15] 王小漠, 张光义. 雷达与探测[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
Wang Xiaomo, Zhang Guangyi. Radar and detection[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008.
- [16] 安红, 杨莉, 宋悦刚. 单脉冲雷达导引头角度跟踪环路建模及抗干扰仿真分析[J]. 中国电子科学研究院学报, 2012, 1(2): 52-57.
An Hong, Yang Li, Song Yuegang. Modeling and anti-jamming simulation analysis of angle tracking loop of monopulse radar seeker[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2012, 1(2): 52-57.
- [17] 赵严冰, 陈正宁. 单脉冲雷达导引头角度跟踪环路半实物仿真[J]. 现代防御技术, 2014, 42(6): 146-153.
Zhao Yanbing, Chen Zhengning. Hardware-in-loop simulation of angle tracking loop for monopulse radar seeker[J]. Modern Defence Technology, 2014, 42(6): 146-153.