

基于HLA信号级火控雷达目标跟踪系统仿真^①

肖强, 李孝玉, 黄世银, 魏晗, 徐衍

(中国人民解放军63981部队, 武汉430311)

摘要: 目标跟踪作为火控雷达的一种重要工作模式, 同时是火控系统的首要任务. 本文基于HLA构建了可扩展、可重用的火控雷达信号级目标跟踪仿真系统. 依据火控雷达闭环、连续跟踪与自动测量特点, 从信号级仿真出发, 通过火控雷达跟踪系统中天线模块、接收机与信号处理模块、控制系统模块的有机结合, 完成动态目标跟踪仿真过程. 结果表明仿真系统能逼真有效完成火控雷达目标跟踪仿真, 对火控雷达训练模拟系统设计与雷达电子战系统评估研究中有一定的参考价值.

关键词: HLA; 目标跟踪; 火控雷达; 信号仿真

Signal Simulation of Target Tracking System of Fire-Control Radar Based on HLA

XIAO Qiang, LI Xiao-Yu, HUANG Shi-Yin, WEI Han, XU Kan

(No. 63981 Unit of PLA, Wuhan 430311, China)

Abstract: Target tracking is not only an important operation mode of fire-control radar, but also the primary task of the fire-control system. Extensible and repeatable signal-level target tracking simulation system of fire-control radar based on HLA is developed in this paper. Then according to the features of closed loop, continuous tracking, automatic measuring, starting from the signal-level simulation, combining antenna module, receiver and signal processing module, control system module in tracking system of fire-control radar, dynamic target tracking simulation is completed. The simulation result indicates that the dynamical process of target tracking is carried out through the simulation system distinctly and effectively, which is of some reference value for the research on training simulation system design of fire-control radar and electronic warfare system evaluation.

Key words: high level architecture; target tracking; fire-control radar; signal-level simulation

作为现代地面防空作战中最常用的电子探测装备之一, 火控雷达以精密跟踪为主要功能, 从而控制武器系统快速瞄准并精确射击来袭目标^[1]. 在现代电子战中, 火控雷达目标跟踪性能受到诸多的电子对抗措施的严重影响, 故对火控雷达目标跟踪研究是一直是一个热点. 近些年, 仿真技术凭着试验重复性好且环境与场地选择灵活、安全系数高等优势取代了传统实装试验, 已在军事领域广泛应用^[2]. 对现役通用雷达而言, 实现整个雷达系统一体化建模, 有效评估雷达的探测跟踪性能, 对最大程度地发挥雷达乃至整个防空系统的作战效能有着重要意义.

从国内雷达仿真研究现状来看, 虽在功能仿真层面能够实现动态目标探测跟踪, 而对信号处理环节采用功能等效替代, 模型粒度大, 以致逼真性较差且在信号处理与跟踪控制系统间的信息有效转换是个亟待解决的问题. 为解决上述问题, 本文以现役火控雷达为研究对象, 基于HLA构建某典型火控雷达目标跟踪仿真系统. 在此基础上, 详细介绍了运用信号级仿真对火控雷达目标跟踪过程建模仿真实现思路, 并对各个模块模型进行一体化准确建模. 最后以HLA仿真系统为平台实现动态目标跟踪仿真并进行结果分析.

^① 收稿时间:2015-05-13;收到修改稿时间:2015-06-19

1 构建火控雷达目标跟踪仿真系统

1.1 HLA 简介

HLA 是当前 IEEE 建模仿真的标准, 它为复杂仿真系统联合协同仿真实现上提供统一规范、分布交互、资源共享的仿真技术框架^[3]. 火控雷达目标跟踪仿真是用来对模拟实现火控雷达对来袭目标的动态跟踪过程, 在完成各个子系统独立功能开发后, 将每一个子系统作为联邦内一个联邦成员, 并通过运行时间支撑结构(RTI)来实现它们之间的准确、快速、有效的信息传输与交互, 进而组成了一个完整的 HLA 仿真联邦系统^[4].

1.2 系统联邦构成以及成员功能

根据仿真系统需求, 以典型的对空攻防作战为背景, 将整个火控雷达目标跟踪仿真系统作为一个联邦, 从作战任务分工上可分为火控雷达, 目标, 显示, 管理控制四个联邦成员. 其系统联邦构成如图 1 所示.

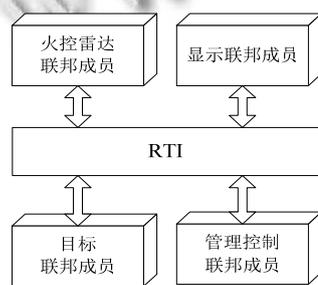


图 1 系统联邦构成

1) 火控雷达联邦成员: 作为构建仿真系统的核心组成部分. 主要用于逼真模拟实现火控雷达对空间目标动态、闭环、自动探测跟踪测量过程, 实时获取目标距离、方位角和高低角测量数据.

2) 目标联邦成员: 作为攻防对抗的另一方, 它的主要功能是根据实际战场情况进行航迹设定, 并模拟目标的飞行航迹和目标散射特性, 并在收到雷达照射信号后, 为火控雷达回波信号生成实时提供必要的目标真实航迹坐标信息和目标瞬时截面积.

3) 管理控制联邦成员: 作为整个系统仿真的管理控制方, 起导演作用. 主要用来设定作战场景、战场态势初始化参数设置、监控其他联邦成员状态以及控制整个仿真系统的开始、结束. 另外一个功能是根据一定的评估指标获取仿真过程中某些仿真节点数据, 完成火控雷达目标跟踪性能的合理有效评估.

4) 显示联邦成员: 通过订购其他联邦成员的一些

参数, 在模拟界面上动态显示跟踪航迹, 能更直观地分析攻防对抗中的跟踪情况.

2 火控雷达目标跟踪建模仿真

对于火控雷达来说, 虽然目标跟踪仅仅是一种工作模式, 但涉及整个雷达从天线发射接收射频信号生成雷达回波信号, 再到接收与信号处理系统、控制系统, 从而实时获取目标信息, 并在外部取样时间脉冲作用下以一定的数据率实时将当前的目标角度与距离信息传送到中心计算机系统, 计算机系统综合各分系统的测量数据, 得到实时的目标距离、方位角与高低角, 为后续数据处理、火力控制与射击指挥等作战任务提供目标信息^[5]. 此处以某型单脉冲火控雷达对目标跟踪过程来进行仿真模拟, 按照雷达跟踪模式下信号处理流程, 将火控雷达目标跟踪系统可分为天线、雷达回波信号、接收机与信号处理、以及控制系统四个部分, 并建立相应仿真模块, 其目标跟踪的功能结构框图, 如图 2 所示.

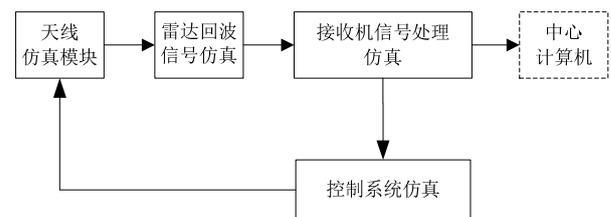


图 2 功能结构

2.1 天线模块

由于雷达天线方向图是获取实时指向角度与波束增益调制的具体体现, 对雷达目标回波信号生成有着直接影响, 是仿真中必要的一部分.

在没有天线实测数据的情况下, 天线方向图是十分复杂的, 很难做到全面、准确的建模. 在主要考虑主瓣和第一副瓣影响, 此处用辛格函数模块仿真单个平面内归一化振幅天线方向图的数学表达式^[2]:

$$F(\theta) = \begin{cases} \frac{\sin(\alpha\theta / \Delta\theta_0)}{\alpha\theta / \Delta\theta_0} & |\theta| \leq \theta_0 \\ g_1 \frac{\sin[\alpha(\theta \pm \theta_1) / \Delta\theta_1]}{\alpha(\theta \pm \theta_1) / \Delta\theta_1} & \theta_0 < |\theta| \leq \theta_2 \\ g_2 & |\theta| > \theta_2 \end{cases} \quad (1)$$

式中 $\Delta\theta_0$ 为天线主瓣 3dB 的波束宽度, $\Delta\theta_1$ 为第一副瓣 3dB 的波束宽度, g_1 为第一副瓣最大电平, g_2 为

副瓣平均电平, α 为 2.783 常数, $\theta_0 = \pi\Delta\theta_0 / \alpha$ 为主瓣波束右零点, $\theta_1 = \pi(\Delta\theta_0 + \Delta\theta_1) / \alpha$ 为第一副瓣波束中心点, $\theta_2 = \pi(\Delta\theta_0 + 2\Delta\theta_1) / \alpha$ 为第一副瓣波束右零点.

2.2 雷达回波信号仿真模块

本文主要是研究雷达对目标跟踪过程, 为简化问题, 雷达回波信号通过目标回波信号与接收机热噪声两种信号的叠加来生成的, 进而作为接收机仿真的输入. 该火控雷达发射信号为线性调频波形, 具备较强的抗干扰能力和良好的探测性能. 接收机热噪声通常采用符合高斯分布 $N(0, \sigma_N^2)$ 的随机样本函数阵列来仿真模拟. 雷达回波信号仿真流程如图 3 所示.

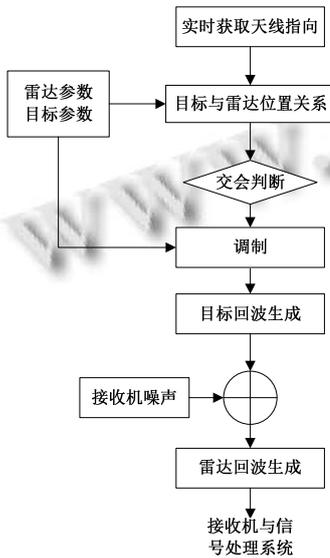


图 3 雷达回波信号仿真流程

首先根据天线方向图获取实时指向, 结合目标与雷达的位置关系来判别目标是否在火控雷达的波束范围之内, 若在波束范围内, 则目标反射的回波被雷达接收. 此时, 通过对雷达发射信号进行时域、频域、幅度调制来获取目标回波信号, 再通过叠加噪声便可模拟生成雷达回波信号.

2.3 接收机与信号处理仿真模块

本文研究是基于软件平台实现的, 不关心具体电路, 仅仅考虑雷达接收的实现过程. 鉴于雷达接收机比较器和差处理后的射频信号频率太高, 此处直接从中频回波信号考虑, 具体的雷达接收机与信号处理仿真流程如图 4 所示.

此雷达接收机系统是一个三支路单脉冲跟踪接收机, 其主要任务是接收三路回波信号, 进行下变频处理, 获取 I、Q 两路正交视频回波信号. 在接收机中两

个差通道信号用来测角, 另一个和通道信号用来测距、显示以及作为相位比较的基准. 和通道与差通道信号处理流程基本一致, 通过对和通道信号做脉冲压缩、包络检波、目标检测等信号处理, 若检测到目标, 利用和通道信号进行距离误差提取, 而角误差依靠距离信息和差通道信号来提取. 此时, 通过依据实时的天线指向与距离波门中心实时位置分别与相应的角误差、距离误差相叠加, 便实时得到目标测量参数信息.

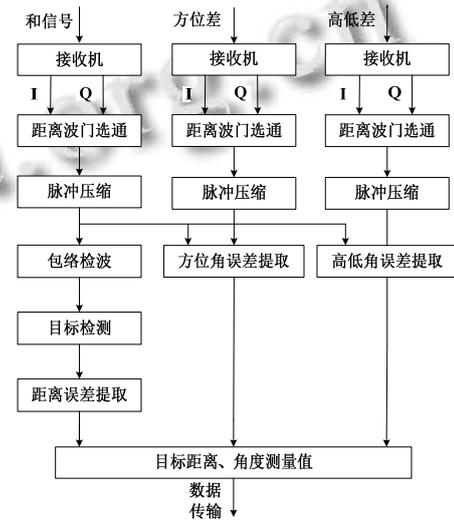


图 4 接收机与信号处理仿真流程

2.4 控制系统仿真模块

控制系统主要包括控制距离波门与天线指向实时在跟踪范围内, 是典型负反馈闭环系统, 其性能的好坏直接影响火控雷达的跟踪精度. 故跟踪控制系统的建模仿真对实现闭环、连续跟踪仿真有着重要意义.

2.4.1 天线控制系统模型

火控雷达天线控制系统一般由电流回路、速度回路以及位置回路组成. 一般来说, 天线控制系统主要用于俯仰角度控制和方位角度控制. 以俯仰角控制系统为例, 在实际仿真建模时, 通常采用满足性能指标需求的典型二阶传递函数来近似表示天线控制系统数学模型, 在此基础上确定其模型参数便可, 其数学模型可描述为:

$$G_\theta(s) = \frac{Y_\theta(s)}{U(s)} = \frac{K}{T_2 s^2 + T_1 s + 1} \quad (2)$$

式中, μ 为电压电枢驱动, y_θ 为天线角度位移大小, T_2 , T_1 , K 三者为模型参数.

2.4.2 距离跟踪控制模型

由于目标的运动状态是变化的, 因而距离跟踪器

也在不断调整,已保持目标在距离上被锁定. 本文采用^[6]给出的分裂波门跟踪的方式,通过前、后波门采样点幅度的差异就可以得到距离误差变化情况,进而通过控制距离选通门的位置来实现距离跟踪. 实际应用中,基于跟踪性能考虑,通常将距离跟踪控制系统作为二阶离散闭环系统来构建模型,其数学模型为:

$$H(Z) = \frac{(\alpha + \beta)Z - \alpha}{Z^2 - (2 - \alpha - \beta)Z - (\alpha - 1)} \quad (3)$$

式中, α 、 β 分别为距离与速度支路的滤波参数.

3 仿真实例

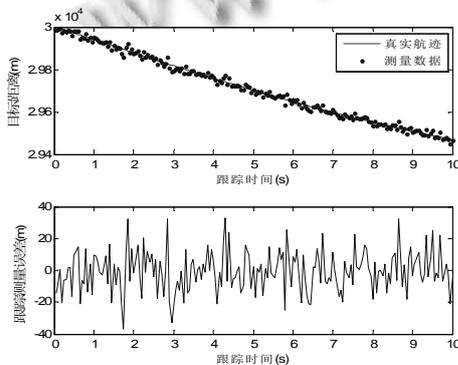
在构建的 HLA 仿真系统运行中,各联邦成员实现实时的数据交互,雷达联邦成员不断获取目标成员提供的目标真实航迹值与目标横截面积,实时生成雷达回波,以完成目标跟踪,获取距离、方位角、高低角目标测量数据,管理控制联邦成员主要获取的各成员的结果数据,有火控雷达成员的工作时间与目标测量数据以及目标联邦成员的真实航迹值,从而完成雷达目标跟踪性能的评估.

该雷达参数默认为:工作频率为 8GHz,发射峰值功率 160Kw,天线主瓣增益 40dB,第一副瓣电平为 -18dB,半功率波束宽度为 $3^\circ \times 3^\circ$,脉冲宽度 0.1us,脉冲重复周期为 1ms,目标 RCS 默认为 $2m^2$,目标航迹初始设定为 $x_0=20km, y_0=20km, z_0=10km$,假设目标航迹方程为:

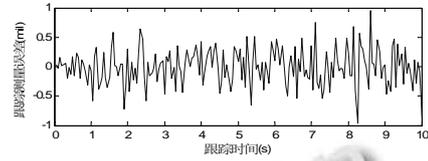
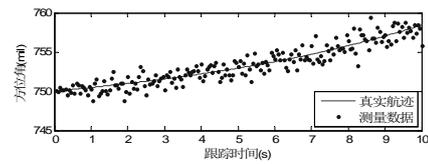
$$\begin{cases} x = x_0 - 50t \\ y = y_0 - 250\sin(0.025t) + 10t \\ z = z_0 - 20t \end{cases} \quad (4)$$

在仿真系统运行后,其仿真结果如图 5 所示.

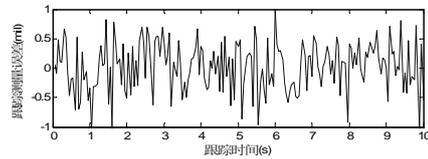
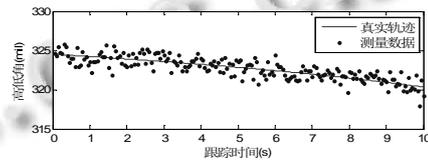
依据仿真结果可以看出,火控雷达在探测跟踪过程中测角误差与测距误差都在要求的范围之内,这说明火控雷达能够动态闭环探测跟踪目标,具有较高的测角精度与测距精度.



(a) 距离跟踪测量结果



(b) 方位角跟踪测量结果



(c) 高低角跟踪测量结果

图 5 跟踪测量结果

4 结语

本文针对火控雷达的特点,基于 HLA 开发了目标跟踪仿真系统,详细阐述了联邦构成和联邦成员各自功能,并对火控雷达跟踪过程进行建模,为火控雷达动态目标探测跟踪仿真提供模型依据. 最终通过跟踪仿真实例,验证了信号级跟踪仿真的逼真性与正确性. 由于本文主要研究信号级火控雷达目标跟踪过程,故其他联邦成员模型有所简化,但跟踪仿真系统的开发是通用的,对以后进一步研究一定的参考价值. 在以后的研究中,将会开发视景仿真功能和考虑加入更真实的环境因素,如杂波,从而使仿真效果更具可信性.

参考文献

- 1 杨小龙,李成玉.组网火控雷达抗 ARM 跟踪技术.计算机测量与控制,2012,20(8):2174-2176.
- 2 赵国庆.雷达对抗原理.西安:西安电子科技大学出版社,2012.
- 3 周彦,戴剑伟.HLA 仿真程序设计.北京:电子工业出版社,2002.
- 4 李成玉,杜伟明,等.基于 HLA 的火控雷达网融合控制系统仿真研究数.中国测试技术,2014(3):137-141.
- 5 徐喜安.单脉冲雷达系统建模与仿真研究[学位论文].成都:电子科技大学,2006.
- 6 杨亚洁.相控阵机载火控雷达系统建模与仿真[学位论文].西安:西安电子科技大学,2011.