

【武器装备】

用于嵌入式空战训练的火控雷达仿真方法

饶敏, 佟惠军, 秦树海

(空军航空大学, 长春 130022)

摘要:对嵌入式空战训练系统及其关键技术进行了介绍,着重分析了基于雷达中频模拟器的火控雷达嵌入式仿真系统的体系结构及其基本原理,并讨论了系统的时空一致性问题并进行了仿真实验。

关键词:嵌入式训练;火控雷达;雷达中频模拟器

中图分类号:TN958

文献标识码:A

文章编号:1006-0707(2011)11-0041-04

Simulation Method of Fire Control Radar by Embedded Training System for Air Combat

RAO Min, TONG Hui-jun, QIN Shu-hai

(Department of Aviation Armament Engineering, Aviation University of Air Force, Changchun 130022, China)

Abstract: Embedded training system for air combat is the new development of simulation training, as it has been an important training way in developed country in 21 century. It is a key technology to embed a simulation radar system in equipment, and the radar can be used in usual way in real air battle. It first embeds air combat training system and key technologies for a simple introduction, then focuses on a radar intermediate simulator-based fire control radar embedded simulation system architecture and its basic principles, and discusses the system problems about the same space-time and performs the simulation experiments.

Key words: embedded training; fire control radar; radar intermediate simulator; simulation

基于嵌入式空战训练是指在现实装备中嵌入用以完成空战训练的系统,使操作人员更加熟练地掌握各项战斗技能、能力的一种训练方式。其本质就是在不改变飞机系统内部结构,不影响装备作战性能的前提下,以一定的技术手段,将仿真训练设备嵌入到装备内部,并充分利用其内部通信设备组网,形成与实际环境相融合的完整的模拟训练系统,从而实现实装环境下的训练功能,使装备具备训练和作战双重功能^[1]。简要示意图见图1^[2]。

20世纪90年代西方国家军队就将嵌入式训练系统作为21世纪军队的关键训练技术之一^[3]。主要解决利用实兵扮演“蓝军”的对抗演练成本高,训练空域需求复杂,而且不能有效地模仿敌方空中和地面威胁特性,安全保密性较差等问题;以及传统的模拟设备不能对空战训练任务进行全时空的覆盖,受训练环境限制,并且真实感和训练效果都达不到令

人十分满意的效果,尤其是在飞行员身体感知、情景意识和机动模拟方面存在明显的不足等问题^[4]。其主战战斗机的机上电子战模拟器嵌入在机翼下的吊舱内,在飞行中能够产生虚拟威胁信号至雷达告警接收机。上世纪末西方国家军队与国家空天实验室和空间研究所签署了一项价值为1.88亿美元的合同,为其21世纪初装备的战斗机开发嵌入式训练系统。

嵌入式训练系统关键技术是训练态势生成。所谓态势,是指战争过程中敌对双方作战要素的部署和行动所造成的形势和状态的变化^[5]。现代空战的主要作战模式是超视距空战。超视距空战具有很强的复杂性和开放性,飞行员的决策过程不确定,随机影响因素多。所以嵌入式空战训练需要构造的虚拟训练态势非常复杂,包括虚拟兵力的生成、作战进程和行动的预测、战场信息的实时显示等。这些作战态势

收稿日期:2011-09-20

作者简介:饶敏(1989—),男,硕士研究生,主要从事嵌入式训练系统。

都应该通过显示终端实时地显示给飞行员。其中最复杂的是火控雷达的仿真嵌入。

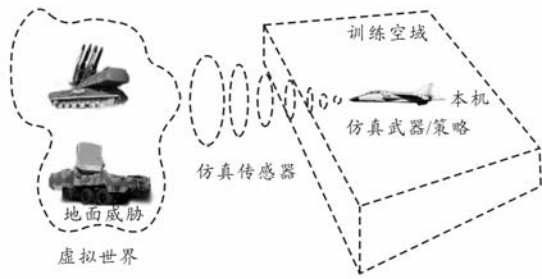


图1 嵌入式训练简要示意图

1 仿真火控雷达的体系结构嵌入技术

目前各国军用飞机大都采用综合航空电子技术。典型航空电子系统见图2。针对综合航空电子系统,按嵌入式系统理论一般可采用传感器端嵌入或处理计算机端嵌入。

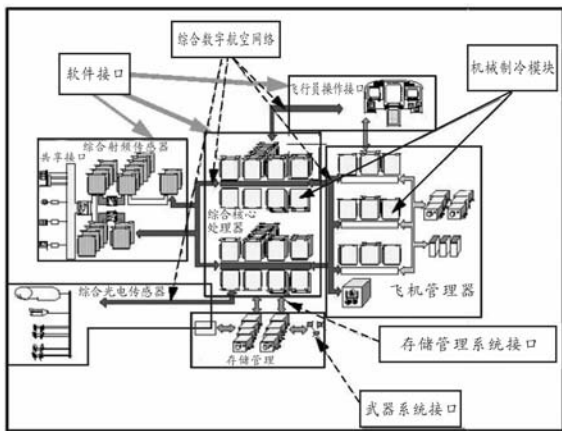


图2 典型航空电子系统结构

本文研究火控雷达的仿真主要是基于可置于雷达数据处理机柜的DDS(direct digital synthesis, DDS)中频信号模拟器设计实现的。DDS即直接数字频率合成技术是一种频率合成的新方法,它能在雷达处理计算机的控制下,在中频频段上产生模拟目标回波的和差三通道信号,能模拟出目标的各种实时的运动姿态和运动特征(如距离、速度、加速度等)。

火控雷达的仿真系统由硬件和软件2部分组成,硬件部分为雷达中频信号模拟器和地面辅助设备,软件部分有目标运动航迹仿真软件、运动模型仿真软件和视景仿真软件。雷达仿真系统的组成如图3所示。

该系统主要是在雷达处理计算机后端嵌入DDS雷达中频信号模拟器,通过运用程序接收地面辅助设备的弹道数据、目标运动模型数据和三维地形数据并装入雷达处理计算机,再经过处理机模拟目标实时特性进行数据调度、运算、处理,产生所需的DDS调幅、调相、调频等控制字,从而生成模拟目标的位置、距离、速度等多种精确信息。雷达中频模拟

器主要由地面中心计算机、ARM、雷达处理机和DDS4部分组成。地面中心处理机完成对目标进行建模、运算,存储三维地形数据和目标航迹数据,并且生成雷达中频信号仿真数据库。雷达处理机主要是起控制机的作用,通过对数据进行实时的运算和处理,产生各种不同的DDS控制字。主控模块采用的是ARMS3C44BOX并固化到雷达处理机中,完成程序的加载和参数的实时设置,并控制处理机模拟不同的目标信号。DDS盒采用的是AD公司的AD9854,利用多个芯片可同时模拟多个目标的中频信号^[6]。这些模拟信号经检波和视频处理,分别产生雷达回波信号的I/Q和支路 Σ 、俯仰差支路 $\Delta\alpha$ 以及方位差支路 $\Delta\beta$ 。雷达中频模拟器的组成如图4所示。

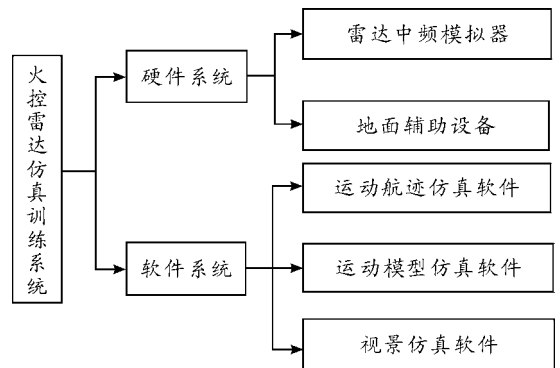


图3 火控雷达仿真系统的组成

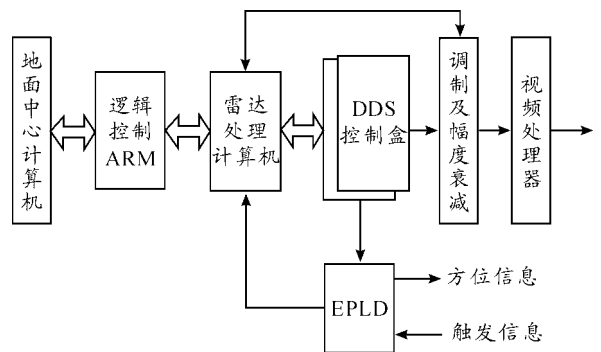


图4 雷达中频模拟器的组成

2 仿真火控雷达信号生成技术

2.1 仿真雷达系统的信号流程

在仿真训练之前,主控模块ARM通过应用程序接收地面中心计算机的目标航迹数据、运动模型数据和三维地形数据,并通过主机RS232总线传送给雷达处理计算机。雷达处理计算机根据这些目标航迹、运动模型参数和地形数据实时生成目标基带特征数据,并储存到目标特征数据缓冲区。并且三维地形数据可以经雷达处理机进行视景仿真软件处理之后直接传送给雷达显示器进行显示,从而模拟空地导弹电视末制导的电视图像。

再由数字正交调制上变频器读取缓冲区中的雷达目标基带特征数据,并和模拟器生成的数字中频信号作正交上变频调制,输出的调制信号,经高速 D/A 和模拟带通滤波器,转换成雷达模拟回波信号输出^[7],再经中频放大器,同步检

波,送视频处理器处理,从雷达坐标测量机输出目标三维坐标,通过雷达综显主机的应用软件在雷达显示器上实现三维可视化场景仿真和训练态势显示。系统信号流程如图 5 所示。

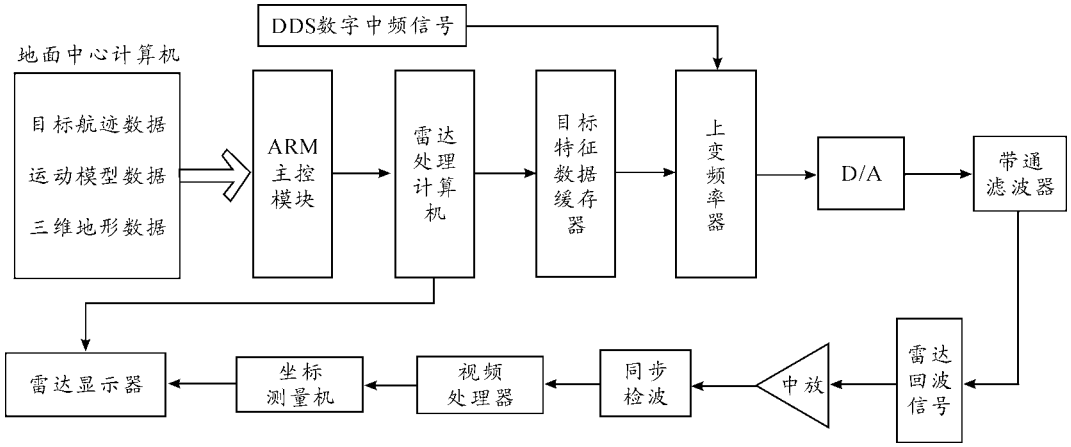


图 5 仿真雷达系统的信号流程

2.2 雷达中频信号模拟原理

假设雷达发射波形 $x(t)$ 为

$$x(t) = \text{rect}(t/T_0) \cdot a(t) \cdot \cos[\omega_0 + \varphi(t)] \quad (1)$$

目标的瞬时径向距离为 R_0 , 瞬时径向速度为 v_0 , 瞬时方位角为 A , 瞬时俯仰角为 E , 目标回波为^[8]

$$x_r(t) = \text{rect}\left[\frac{t - 2R_0/c}{T_0}\right] \cdot a\left(\frac{t - 2R_0}{c}\right) \cdot \cos\left[(\omega_0 + \omega_d) \cdot \left(t - \frac{2R_0}{c}\right) + \varphi\left(t - \frac{2R_0}{c}\right)\right] \quad (2)$$

$$\text{rect}(t/T_0) = \begin{cases} 1 & -T_0 \leq t \leq T_0 \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

其中: c 为光速; $\omega_d = 2\omega_0 v/c$ 为目标回波的多普勒角频率。设雷达的中心频率为 ω_{Li} , 不考虑幅度的变化, 则目标的中频信号可以表示为^[9-13]

$$x_r(t) = \text{rect}\left[\frac{t - 2R_0/c}{T_0}\right] \cdot a\left(\frac{t - 2R_0}{c}\right) \cdot \cos\left[(\omega_{Li} + \omega_d) \cdot \left(t - \frac{2R_0}{c}\right) + \varphi\left(t - \frac{2R_0}{c}\right)\right] \quad (3)$$

为了得到式(2)中的中频信号, 先产生具有多普勒调制的 I, Q 2 路视频信号:

$$I(t) = \text{rect}(t/T_0) \cdot a(t) \cdot \cos[\omega_d + \varphi(t)] \quad (4)$$

$$Q(t) = \text{rect}(t/T_0) \cdot a(t) \cdot \sin[\omega_d + \varphi(t)] \quad (5)$$

再将上述 2 式子所表示的信号经过延时 $2R_0/c$ 后, I/Q 调制到中频 ω_{Li} , 就可以得到要求的中频回波信号。 $a(t)$ 和 $\psi(t)$ 与雷达的体制有关。由此可以算出序列为:

$$x_I(t_n) = a(t_n) \cdot \cos[\varphi(t_n)] \quad (6)$$

$$x_Q(t_n) = a(t_n) \cdot \sin[\varphi(t_n)] \quad (7)$$

其中: $t_n = T_0/2 + nT_s, n = 0, 1, 2, \dots, N-1, T_s = 1/f_s, f_s$ 为采样

频率。故雷达的发射信号的视频表达式为

$$x_0(t) = \text{rect}(t/T_0) \cdot a(t) \cdot \cos[\varphi(t)] \quad (8)$$

若 $x_0(t)$ 的视频带宽为 B_0, f_s 的选择需要满足采样定理, 即 $f_s \geq 2B_0$ 。 f_s 越大序列 $I(n)$ 和 $Q(n)$ 的点就越多, 计算序列所需的计算量就越大。由于目标的多普勒角频率 ω_d 已知, 由此可以计算出序列为:

$$F_I(t_n) = \cos(\omega_d \cdot t_n) \quad (9)$$

$$F_Q(t_n) = \sin(\omega_d \cdot t_n) \quad (10)$$

可以计算出回波信号的 I, Q 两路视频序列^[9-12]:

$$I(t_n) = x_I(t_n) \cdot F_I(t_n) - x_Q(t_n) \cdot F_Q(t_n) = a(t_n) \cdot \cos(\omega_d t_n + \varphi(t_n)) \quad (11)$$

$$Q(t_n) = x_I(t_n) \cdot F_Q(t_n) - x_Q(t_n) \cdot F_I(t_n) = a(t_n) \cdot \sin(\omega_d t_n + \varphi(t_n)) \quad (12)$$

雷达触发脉冲触发并延时 $2R_0/c$, 序列 $I(n)$ 和 $Q(n)$ 经过 D/A 变换和低通滤波, 得到模拟的回波信号:

$$I(t) = \text{rect}\left[\frac{t - 2R_0/c}{T_0}\right] \cdot a\left(\frac{t - 2R_0}{c}\right) \cdot \cos\left[\omega_d \cdot \left(t - \frac{2R_0}{c}\right) + \varphi\left(t - \frac{2R_0}{c}\right)\right] \quad (13)$$

$$Q(t) = \text{rect}\left[\frac{t - 2R_0/c}{T_0}\right] \cdot a\left(\frac{t - 2R_0}{c}\right) \cdot \sin\left[\omega_d \cdot \left(t - \frac{2R_0}{c}\right) + \varphi\left(t - \frac{2R_0}{c}\right)\right] \quad (14)$$

经过调制器进行正交调制, 就可以产生所需的雷达中频回波信号

$$x_r(t) = I(t) \cdot \cos(\omega_{Li} t) - Q(t) \cdot \sin(\omega_{Li} t) = a\left(t - \frac{2R_0}{c}\right) \cdot \sin\left[(\omega_{Li} + \omega_d) \cdot \left(t - \frac{2R_0}{c}\right) + \varphi\left(t - \frac{2R_0}{c}\right)\right]$$

$$\varphi\left(t - \frac{2R_0}{c}\right) + \varphi_0 \quad (15)$$

φ_0 为由 I/Q 调制器本振初相决定的固定相位差。再将回波信号通过数控衰减器适当衰减,然后发送给雷达中频接收机前端,模拟距离对雷达回波脉冲的强度的影响。

3 嵌入式仿真雷达的时空统一

嵌入式空战系统是一个分布式、实时、异步复杂系统,嵌入式训练功能的实现是由训练系统产生的虚拟态势和实际装备的运行状态协同完成的。如何保持在实装训练模式下,仿真雷达各系统间的时空一致、态势相关是一个很大的难点。

首先,雷达中频模拟器、雷达处理计算机和综显主机系统都有不同运行周期,如果不保持严格的时空一致,则模拟的三维地景图像、目标运动姿态和航迹难以形成统一连贯的训练态势,在综显主机中无法持续进行显示,最后导致训练过程无法持续进行。因此在发布训练态势和控制训练流程时,要对各个系统进行统一的时间变换,确保每个系统运行同步,并且要对各个系统进行统一的坐标变换,使产生的训练态势连贯合理,从而保持系统时间上、空间上的一致性。其次,要使模拟的火控雷达系统和导弹武器系统之间保持时空上的一致性,即保证模拟的雷达画面和导弹末制导的电视图像画面之间在时空上是匹配的。而且还要在模拟系统和实装系统之间建立起安全、快捷的信息交互通道,即保证雷达中频模拟器和雷达处理计算机之间、模拟的火控雷达系统和导弹武器系统之间的接口一致。所以需要开发专门的态势关联数学模型进行统一的态势关联,使加载的目标运动航迹能够和视图图像相融合,从而实时有效地显示出来。再次,由于机载雷达装备环境的特殊性,在保持各系统间在时空一致并且态势关联时,就对各系统间的信息交互技术提出了较高的要求,包括系统运行信息采集、处理、传输和储存等环节。各系统在进行信息交互时不但需要满足装备内部的电磁兼容性和实时性的要求,而且对系统内部的安装布线也有很高的要求。

4 结束语

经在实验室条件下的嵌入式仿真结果可知,空地导弹的电视末制导图像(见图6)和雷达中频模拟器仿真的雷达图像(见图7)具有时空统一性且满足实时性的要求,即模拟仿真的雷达图像和导弹攻击的地景画面是时空匹配的。所以,使用 DDS 雷达中频模拟器进行火控雷达仿真的方法在理论上是可行了,且具有频率转换快、频率分辨率高、相位连续和稳定可靠等优点,具有非常广阔的应用前景。但是该方法只在实验室条件下进行了仿真实验,并未应用到真实飞机上,在工程实践上还有待进行进一步的检验。



图6 空地导弹电视末制导图像

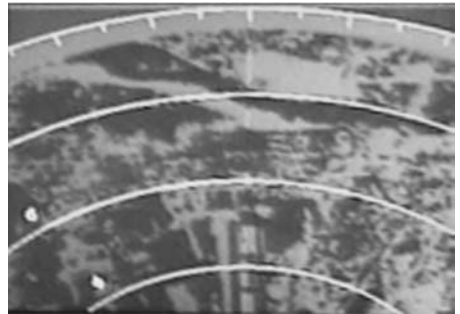


图7 雷达中频模拟器仿真的雷达图像

参考文献:

- [1] 白文瑞,赵志宁. 嵌入式仿真在炮兵模拟训练系统中的应用[J]. 军事运筹与系统工程,2010(3):24-26.
- [2] GWedzinga. E-CATS: First Time Demonstration of Embedded Training in a Combat Aircraft[J]. Aerospace Science and Technology,2006(10):73-84.
- [3] 樊世友,朱元昌. 嵌入式仿真研究[J]. 计算机仿真,2005(12):10-13.
- [4] 陈凌,吴冰,胡志伟,等. 机载嵌入式空战训练的研究与进展[J]. 计算机仿真,2010(2):108-112.
- [5] 常天庆,张波,赵鹏,等. 嵌入式训练技术研究综述[J]. 系统仿真学报,2010(11):2694-2697.
- [6] 杨峻岭. 基于 DDS 的雷达中频回波模拟器的设计与实现[J]. 系统工程学报,2006(9):1299-1302.
- [7] 李卫江. 一种雷达多目标模拟器的主控 DSP 软件设计与实现[J]. 军民两用技术,2004(12):37-39.
- [8] 张涛,陈亮. 现代 DDS 的研究与概述[J]. 电子产品世界,2007(5):7-10.
- [9] 李为民. 舰船目标雷达回波特征信号的建模与仿真[J]. 系统仿真学报,2005(9):2047-2050.
- [10] 林澄清,赵修斌,田孝华. 基于 ZMNL 的雷达杂波建模仿真[J]. 兵工自动化,2009(12):25-28.
- [11] 张镭. 多雷达数据融合的误差校正[J]. 四川兵工学报,2010(2):38-39.
- [12] 于爽,蒋洪晖. 数字化雷达正交解调的设计与仿真实现[J]. 四川兵工学报,2010(8):88-89.
- [13] 孙兵,王蔚然. 基于 DSP 的激光防撞雷达动态成像校正系统[J]. 激光杂志,2004,25(3):43-45.