

# 预警卫星半实物仿真系统设计与实现

刘佳, 张恒, 何漫, 崔毅楠, 严卿

(中国运载火箭技术研究院 研发中心, 北京 100076)

**摘要:** 国防支援计划 (DSP) 是美国现役的预警卫星系统, 主要对导弹进行早期探测和预警; 为评估 DSP 卫星对目标的探测能力, 文中分析了预警卫星的部署情况和工作模式, 提出了预警卫星仿真系统的总体设计方案, 确定该系统的功能模块以及实现方式; 根据预警卫星双波段探测的工作模式构建了红外双色扫描探测模型, 提出了基于双霍夫变换的多帧关联目标检测算法, 利用目标的运行特性有效去除背景噪声, 并结合双波段探测信息融合策略降低卫星虚警率; 最后利用双星定位方法预估目标轨迹并对不同发射角目标的预测轨迹与真实轨迹之间的误差进行对比分析; 通过试验运行, 该系统达到了预期结果, 具备对目标导弹的探测和跟踪能力, 为导弹性能评估提供一种仿真手段和依据。

**关键词:** DSP; 预警卫星; 半实物仿真; 探测模型

## Design and Implementation of Semi-physical Simulation for Early Warning Satellite

Liu Jia, Zhang Heng, He Man, Cui Yinan, Yan Qing

(Research and Development Center, China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China)

**Abstract:** The Defense Support Program (DSP) is a US active early warning satellite system that conducts early detection and early warning of missiles. In order to analyze the target detecting ability of DSP satellites, this paper analyzes the deployment situation and working mode of the early warning satellite, and proposes the general framework of the early warning satellite simulation system which determines the functional modules and the realization mode of the system. According to the double-band detection mode of the early warning satellite, this paper proposed an infrared two-color scanning detection model. In this model, First a multi-frame correlation target detection algorithm based on double-Hough transform is proposed, which can effectively remove the background noise, then combines the information fusion strategy reducing the false alarm rate, and finally using double-star positioning function to estimate the trajectory of target, in the meantime the error between the predicted trajectory and the real trajectory is analyzed. This simulation system has gets the expected results, having the capabilities for detection and tracking the missile, and provide a means of simulation and basis for performance evaluation.

**Keywords:** DSP; warning satellite; semi-physical simulation; detection model

## 0 引言

国防支援计划 (DSP) 卫星<sup>[1]</sup>是美国的防御系统的第一道防线, 部署在地球静止轨道上, 在轨的卫星一般保持 5 颗, 分布在全球各大洲上空, 实时监测全球导弹发射、地下核试验和卫星发射情况, 其中 4 颗为工作星, 1 颗为备份星。4 颗工作星的典型定点位置是: 西经 37° (大西洋)、东经 10° (欧洲)、东经 69° (东半球及印度洋) 和西经 152° (太平洋)。备份星定点于东经 152° (印度洋东部)。预警卫星<sup>[2]</sup>主要利用红外探测器来发现目标, 当导弹发动机点火后, 卫星利用红外探测器可探测导弹助推段尾焰的红外辐射, 然后将探测到的目标信息发送回地面站。地面站将融合探测信息预估导弹轨迹。

随着仿真技术的发展, 为了分析评估 DSP 卫星对目标的探测能力, 设计了 DSP 卫星半实物仿真系统, 并构建了卫星红外探测模型, 该模型主要包括目标检测、双波检测信息融合和目标轨迹估计功能, 以实现对该目标的探测和跟踪仿真。

## 1 卫星半实物仿真系统总体设计

根据卫星的工作模式, 该系统在硬件上主要包括两大块: 星上信息处理机和地面信息处理机; 在软件上主要包括目标捕获跟踪、主机控制、信息处理和性能评估 4 个功能模块。星上信息处理机采用嵌入式板卡<sup>[3]</sup>实现, 主要实现目标捕获跟踪功能模块; 地面信息处理机采用高性能计算机, 开发软件的方式实现主机控制、信息处理和性能评估功能模块。星上信息处理机通过串口的方式与地面信息处理机通信交互。该系统的总体架构如图 1 所示。

1) 主机控制: 该模块负责对整个半实物仿真系统的想定参数配置、运行控制、三维态势演示。该模块生成仿真控制指令和初始化参数, 实现对星上信息处理机和地面信息处理机的初始化、运行控制和运行结果显示。

2) 目标捕获跟踪: 该模块以嵌入式板卡形式实现, 主要完成对红外仿真图像的目标检测与目标跟踪。

3) 信息处理: 该模块接收星上信息处理机发送的目标检测结果, 对结果数据进行融合, 预报导弹运动轨迹, 并将结果发送到主机控制模块显示。

4) 性能评估: 该模块对仿真过程中的目标探测数据进行

收稿日期: 2017-04-08; 修回日期: 2017-04-29。

作者简介: 刘佳 (1986-), 女, 山西朔州人, 工程师, 主要从事系统仿真方向的研究。

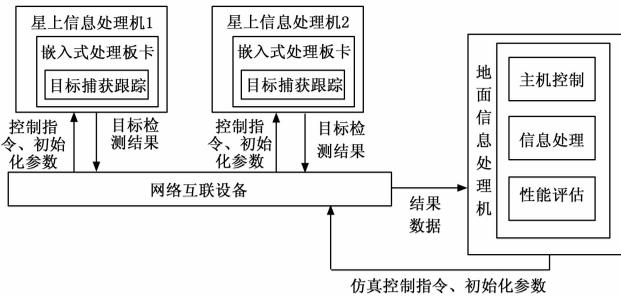


图 1 预警卫星半实物仿真系统总体框图

分析, 计算卫星的探测概率、虚警率、漏检率、探测时间。

## 2 目标红外探测模型设计

### 2.1 红外探测模型

国防支援计划 (DSP) 卫星部署在地球同步轨道, 工作模式是双星扫描方式, 探测器工作波段<sup>[4]</sup>选择  $2.7 \mu\text{m}$  和  $4.3 \mu\text{m}$ , 卫星的扫描成像体制为双向过采样。根据双向过采样的特性, 点目标通过过采样扫描成像后, 所成图像为  $2 \times 2 \sim 4 \times 3$  大小的像斑。为了降低探测模型中的虚警率, 首先进行单帧红外图像目标检测, 然后利用目标运动特征进行多帧目标跟踪检测去除强噪声点和干扰目标, 再融合双波段检测结果, 估计出目标的运动轨迹。

#### 2.1.1 单帧检测

在单帧图像中<sup>[5]</sup>采取最大中值滤波, 抑制背景, 提高信噪比, 依据统计分割方法进行图像分割, 提取当前帧疑似目标点, 完成斑状目标的预检测。设原始图像为, 对进行最大中值背景估计

$$\tilde{f}(x, y) = \max(\text{med}1, \text{med}2, \text{med}3, \text{med}4) \quad (1)$$

其中:

$$\text{med}1 = \text{med}(I(x, y-1), I(x, y), I(x, y+1)) \quad (2)$$

$$\text{med}2 = \text{med}(I(x-1, y), I(x, y), I(x+1, y)) \quad (3)$$

$$\text{med}3 = \text{med}(I(x-1, y-1), I(x, y), I(x+1, y+1)) \quad (4)$$

$$\text{med}4 = \text{med}(I(x+1, y-1), I(x, y), I(x-1, y+1)) \quad (5)$$

再从原图中去除估计出的背景, 即有

$$f_a(x, y) = |f(x, y) - \tilde{f}(x, y)| \quad (6)$$

统计分割方法可表示为:

$$f_T(i) = \begin{cases} 0, & \text{if } f(i) < th \\ 1, & \text{if } f(i) \geq th \end{cases} \quad (7)$$

$$th = \mu + r \cdot \sigma \quad (8)$$

其中:

$$\mu = \frac{1}{M \cdot N} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(i, x, y) \quad (9)$$

$$\sigma = \sqrt{\left( \frac{1}{M \cdot N - 1} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} (f(i, x, y) - \mu)^2 \right)} \quad (10)$$

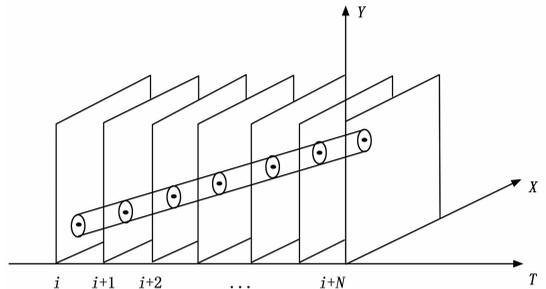
其中:  $M, N$  分别为图像行数和列数。

#### 2.1.2 多帧检测

多帧检测首先采用跟踪方法利用目标的运动性质排除单帧检测方法没有消除的强随机噪声、背景边缘等虚假目标像素, 应用运动性质对序列中的疑似目标像素加以约束, 形成疑似目标轨迹; 然后采用识别方法利用目标轨迹的灰度特征消除在跟

踪算法中形成的虚假目标轨迹, 尤其是诱饵形成的目标轨迹, 大大的降低虚警率。该模型采用一种基于双霍夫变换的目标轨迹关联算法<sup>[6]</sup>。

在多帧图像中, 目标轨迹具有连续性, 而噪声点则具有随机性。根据这个特性, 算法中使用目标轨迹关联的方法来确定目标轨迹。对于多帧图像的目标关联而言, 每一个候选点都有一个在本身图像上的坐标  $(x, y)$  以及一个帧号  $(i)$ 。因此在多帧的目标关联中, 其实是在一个  $X-Y-T$  空间中寻找一个真实的弹道轨迹。在实时的轨迹关联中, 一段时间内弹道估计近似于一条直线, 所以这里就是在  $X-Y-T$  空间中寻找近似于直线的目标轨迹, 其  $X-Y-T$  空间如图 2 所示。

图 2 目标在  $X-Y-T$  空间中示意图

在  $X-Y-T$  空间中确定一个直线需要 3 个参数, 为了降低估计 3 个参数所产生的计算量和存储量, 进行参数空间的降维, 即把一个有 3 个参数估计的霍夫变换问题转变成 2 次对 2 个参数进行估计的霍夫变换。

双霍夫变换首先去关联目标的轨迹直线, 其需要估计的参数为直线的方向  $\theta$  以及原点到直线距离  $\rho$ , 其直线方程如公式所示。

$$x \cos(\theta) + y \sin(\theta) = \rho \quad (10)$$

通过参数  $(\theta, \rho)$  可以确定唯一的一个直线, 而图像平面中的每一个点对应于一组直线, 也就是一组的  $(\theta, \rho)$ 。算法按照时间的顺序, 将从第一帧开始的所有候选点所对应得  $(\theta, \rho)$  累加到一个 2 维的平面累加器  $\{(\theta, \rho)\}$  中去, 按照顺序, 每一帧中的每个点累加一次, 最后在累加器平面中寻找峰值, 这些具有峰值的  $(\theta, \rho)$  就应当是可疑的目标轨迹所在的直线。在上述霍夫变换中, 没有利用时间信息, 导致目标轨迹关联的结果很容易受到噪声点的影响。因此需要在一个新的二维平面中估计直线。这个平面的一个维度为时间  $t$ , 即帧号, 另外一个维度为, 为点到原点的距离, 其计算如公式所示。

$$l = \begin{cases} x \cos(\theta + 90^\circ) + y \sin(\theta + 90^\circ), & \text{if } 0 \leq \theta + 90^\circ < 180^\circ \\ x \cos(\theta - 90^\circ) + y \sin(\theta - 90^\circ), & \text{if } 0 \leq \theta - 90^\circ < 180^\circ \end{cases} \quad (11)$$

图 3 为利用双霍夫变换目标轨迹关联算法的结果, 其中图 (a) 为 6 帧图像经过上文所述的方法进行背景抑制, 分割, 候选点跟踪, 分类去除背景点之后的图像叠加所得。图 (b) 为使用上述双霍夫变换关联的结果, 其中用圆标记了起始位置。对比可知, 双霍夫变换能够有效的去除噪声点。

#### 2.1.3 信息融合

卫星探测器工作模式为双波段, 前者用于目标的点火探测, 后者用于目标轨迹监测, 两个波段的图像经过上述过程检

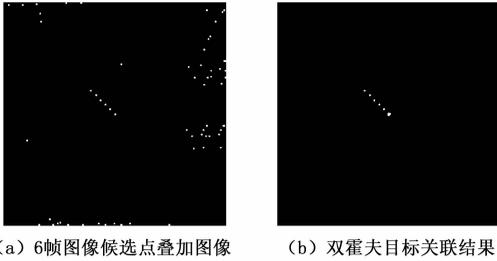


图 3 基于双霍夫变换目标轨迹关联结果示意图

测目标后，信息融合模块对两波段的检测结果进行<sup>[7]</sup>决策级融合。若两波段探测器均探测到目标，则在图像上分别标出目标的位置；若短波扫描图像出现目标，而在中波扫描图像的相应位置没出现目标，则在短波扫描图像中标出目标位置，根据短波扫描探测结果确定目标位置信息；若只在中波扫描图像中检测到目标，则认为不是目标，流程如图 4 所示。

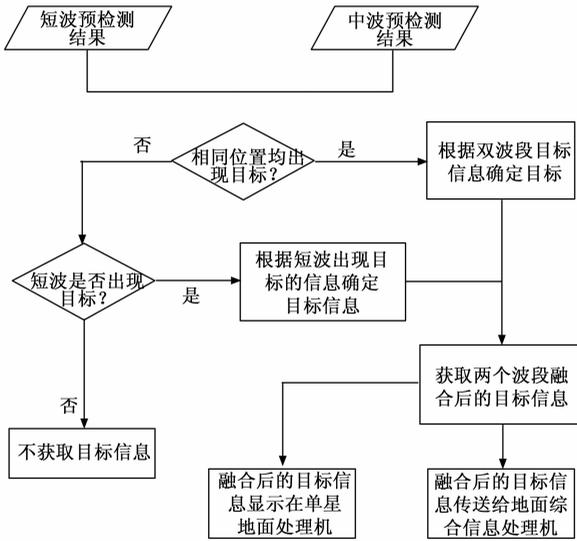


图 4 双波段融合流程图

2.1.4 轨迹估计

卫星探测到目标后，通过双星定位算法获得目标轨迹。轨迹预估主要包括两个过程，首先需要根据当前仿真时刻之前的若干帧的检测结果来重建出目标的仿真时刻之前的轨迹，然后根据求得的轨迹来预报目标后面的轨迹及落点估计。

2.1.4.1 基于立体视觉的双星定位弹道点重建

在双星观测条件下<sup>[8]</sup>，由传感器探测模型可得弹道点在各颗卫星传感器上的映射关系为：

$$Z_{ci} \begin{bmatrix} u_{ci} \\ v_{ci} \\ 1 \end{bmatrix} = M_{ci} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11}^i & m_{12}^i & m_{13}^i & m_{14}^i \\ m_{21}^i & m_{22}^i & m_{23}^i & m_{24}^i \\ m_{31}^i & m_{32}^i & m_{33}^i & m_{34}^i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

将  $i$  取不同值所得到的方程组进行联立，转换后得到上述方程组，若该方程组满足最小二乘解条件，则可以唯一的求出  $P$  点的空间位置  $(X, Y, Z)$ 。在实际应用中，由于数据总是有噪声的，上式中系数矩阵超定，利用线性最小二乘方法求解具备数据冗余纠偏功能，保证误差极小化。目标飞行轨迹点定位计算流程如图 5 所示。

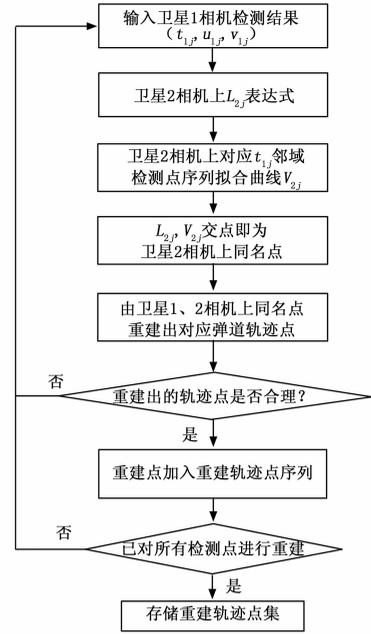


图 5 双波段融合流程图

2.1.4.2 轨迹预报

目标轨迹预报从重建出的轨迹点集得到目标运动轨迹，然而目标运动时受力情况十分复杂，用高阶多项式拟合主动段弹道是一个简单而直观的方法，但是传统的方法往往根据经验确定拟合阶数，本文提出自适应拟合方法，摆脱拟合过程的人为干预。

由于目标在  $X, Y, Z$  三个方向的运动具有无关性，为计算方便，将目标运动轨迹分解为 3 个坐标轴方向分量  $\Delta = f_{\Delta}(t)$  ( $\Delta$  代表  $X, Y$  或  $Z$ )， $\Delta = f_{\Delta}(t)$  的最小二乘法的最优高阶多项式拟合形式如下：

$$f_{\Delta}(t) = \sum_{i=0}^{n_{\Delta}} a_{\Delta,i} t^i \quad (13)$$

其中： $a_{\Delta}$ ， $i$  为多项式系数， $n_{\Delta}$  为阶数。 $f_{\Delta}(t)$  应满足如下约束  $H1$  和  $H2$ 。

$H1: f_{\Delta}'(t) > 0, f_{\Delta}''(t) > 0 (t > 0)$ ，即目标在主动段的运动速度和加速度大于 0；

$H2: (最小二乘拟合准则)$  定义待拟合数据点集：

$$S = \{ (t_i, \Delta_i) \mid i \geq 0, \Delta \text{ 代表 } X, Y \text{ 或 } Z \} \text{ 且 } size(S) = n > 1,$$

令  $F = (f_{\Delta}(t_0), f_{\Delta}(t_1), \dots, f_{\Delta}(t_n)) T, G = (g_{\Delta}(t_0), g_{\Delta}(t_1), \dots, g_{\Delta}(t_n)) T$  ( $g$  为任意高阶多项式)， $P = (\Delta_0, \Delta_1, \dots, \Delta_n) T$ ，则：

$$\|F - P\| = \min_g \|G - P\| \quad (14)$$

考虑约束  $H1$ ，应满足  $n_{\Delta} > 2$  ( $\Delta$  代表  $x, y, z$ )，同时满足

约束  $H2$ ，若上式中  $n_{\Delta} = q$  及  $n_{\Delta} = q + 1$  阶时满足如下条件，则阶数提高无法带来精度显著提高， $n_{\Delta} = q$  即为高阶拟合多项式的阶数。

$$\int_{t_0}^{t_1} \left| \sum_{i=0}^{q+1} a_{v,i} t^i - \sum_{i=0}^q a_{v,i} t^i \right| < \epsilon \quad (15)$$

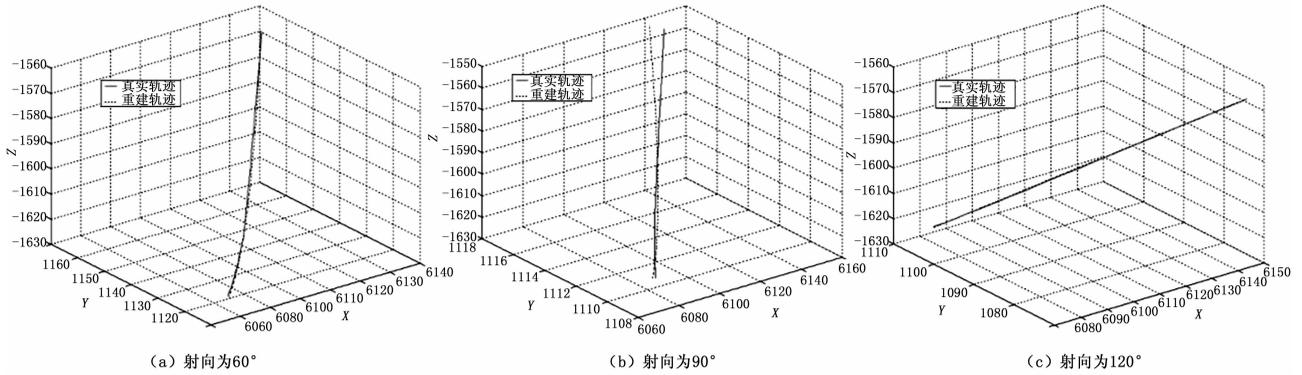


图 6 预报轨迹与真实轨迹对比图

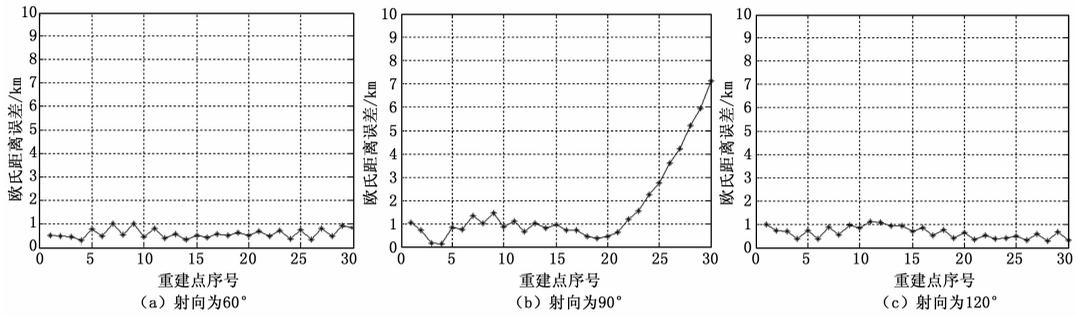


图 7 欧氏距离误差曲线图

其中:  $[t_0, t_1]$  为待拟合数据  $t$  分量的值域,  $\epsilon$  为最小二乘误差限, 依据应用的精度要求设定。

由上述分析, 以  $\epsilon$  作为拟合精度约束,  $n_{\Delta}$  递增 1, 由上式可以自动计算出高阶拟合多项式阶数, 即式中  $n_{\Delta}$ , 按照该方法可以得到目标在  $X, Y, Z$  三个方向分运动轨迹的高阶拟合次数为  $(pw_x, pw_y, pw_z)$ , 则目标运动轨迹方程如下形式:

$$\begin{cases} f_X(t) = \sum_{i=0}^{pw_x} a_{X,i} t^i \\ f_Y(t) = \sum_{i=0}^{pw_y} a_{Y,i} t^i \\ f_Z(t) = \sum_{i=0}^{pw_z} a_{Z,i} t^i \end{cases} \quad (16)$$

### 2.2 模型运行结果与分析

为了验证该模型的有效性, 模拟目标发射点位于东经  $105^\circ$ , 北纬  $10^\circ$ , 射程  $5\,000\text{ km}$ , 发射角分别为  $60^\circ, 90^\circ, 120^\circ$  的三条运动轨迹。运行模型得到的预报轨迹与真实轨迹对比如图 6 所示, 预报轨迹与真实轨迹之间欧氏距离误差曲线如图 7 所示。

分析该探测模型的仿真实验结果, 若  $[t_0, t_1]$  内相机成像面上轨迹点检测误差较小, 则本算法效果好, 预报轨迹与仿真轨迹之间欧氏距离误差曲线峰值在  $1.5\text{ km}$  内, 如图 6 中 (a) 和 (c) 所示; 若  $[t_0, t_1]$  内相机成像面上轨迹点检测误差较大, 则该段时间预报轨迹与仿真轨迹之间欧氏距离误差曲线峰值及均值都随之增加, 如图 7 所示, 当目标发射方向为  $90^\circ$  时,  $[25\text{ s}, 35\text{ s}]$  内多个空间轨迹点在成像面上映射为同

一点, 造成漏警, 降低了数据率, 引起轨迹预报误差增加。另外由于部分噪声点误判为轨迹点造成的虚警, 应用本模型也会引起轨迹预报误差增加。

### 3 系统运行界面

系统软件采用 Visual Studio2008 开发, 运行界面主要包含两部分, 天上信息处理机界面和地面信息处理机界面, 如图 8 和图 9 所示。天上信息处理机界面主要负责显示单星检测目标信息, 地面信息处理机主要负责监控天上信息处理机运行状态和显示估计的目标轨迹。

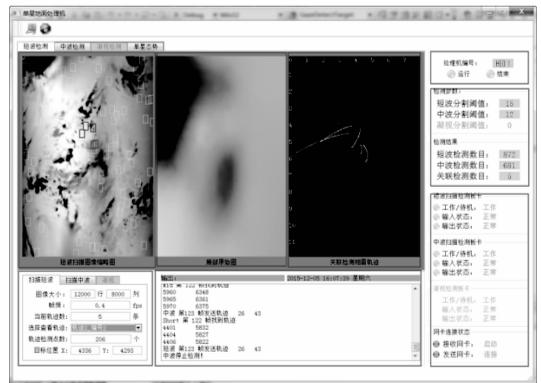


图 8 天上信息处理机主界面

### 4 结论

该系统参考了美国 DSP 预警卫星系统, 根据 DSP 预警卫星的运行模式, 设计了 DSP 预警卫星的红外探测模型, 并搭建仿真系统验证该模型。该仿真系统主要分为天上信息处理机

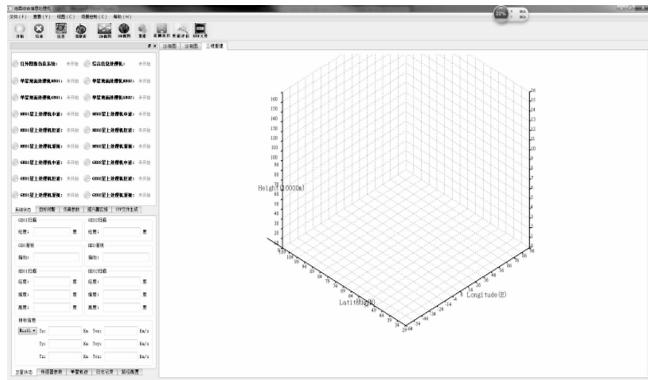


图 9 地面信息处理机的主界面

和地面信息处理机。星上信息处理机主要以嵌入式板卡形式实现，实现了对双波段红外仿真图像的目标检测，而地面信息处理机采用高性能计算机，以应用软件的形式实现，融合各星上信息处理机的检测结果，实现了目标轨迹的预估。通过该系统的运行仿真，模拟卫星预警系统的功能，达到预期结果，能有

(上接第 127 页)

备相关状态的转换，最终通过 TCP 通信实现与显示控制模拟部分的信息交换；显示控制模拟部分只是交联设备的控制器和显示器，主要完成交联设备信息在显示部件（控件）上的信息显示，同时将控制部件（控件）对交联设备的控制通过 TCP 通信发送到交联环境部分，完成对交联设备的控制。

### 4 实验项目设计

实验项目属于应用层，主要针对特定的概念或动作，结合显示控制模拟实验系统规定相应的操作顺序，让操作者观察记录相应的现象，增强对该概念或动作的体验、体会、理解。严格按照操作流程和综合航电系统的分系统组成，有效实现实验项目划分和设置。

显示控制模拟部分提供人机操作界面和显示控制交互功能，提供各种状态下的操作现象；交联环境模拟部分呈现综合航电系统的内部状态，以及状态的设置。通过实验，充分展示各种可能状态下所能看到的现象，促使操作者积累操作经验，完成由可能故障能看到的现象，便于以后看到故障启发可能的故障原因，实现由学习（正向思维）过渡到故障定位（逆向思维）的过程。

### 5 试验结果与分析

经过长达三年多的艰苦努力，搭建了逼真的操作硬件环境，并通过 RS-485 总线和 TCP 通信实现所有显示控制仿真件与显示控制模拟计算机之间的的信息交换，构建了显示控制模拟操作平台；按照操作逻辑实现了综合航电系统的显示控制人机交互功能，交联环境部分实现了所有交联设备的仿真功能，整体构成了综合航电模拟系统。结合综合航电系统的教学内容设计了 46 个实验项目，覆盖了所有知识模块，通过实验操作，一方面学员熟悉了各种正常状态下所能看到的现象，增强了操作体验，积累了操作经验，另一方面，故障模拟功能提供的各种故障现象，启发了学员分析问题和解决问题的思维，有力提高了故障定位的能力。经过多期学员的使用、意见反馈，以及不断修改完善，显示控制模拟实验系统现已完成了规

效的为导弹论证和性能评估提供一种有效手段。

### 参考文献：

[1] 李世令, 孙东平. 美国 DSP 卫星探测能力及对潜射弹道导弹突防产生的影响 [J]. 四川兵工学报, 2012, 33 (7): 10-12.

[2] 钟陪武. 美国“国防支援计划”卫星现状 [J]. 国际太空, 2003: 7-16.

[3] 赵广州, 张天序. 基于 AD14060 的 FPGA+多 DSP 可重构信息处理机设计 [J]. 信号处理, 2005, 21 (1): 87-88.

[4] 李 盾. 空间预警系统对弹道导弹的监视与跟踪 [J]. 系统工程与电子技术, 2002, 24 (3): 52-53.

[5] 许永辉, 赵保军. 深空背景弱小目标实时检测算法研究 [J]. 光学技术, 2008, 34 (5): 675-675.

[6] 张振杰, 郝向阳. 基于 Hough 一维变换的直线检测算法 [J]. 光学学报, 2016, 36 (4): 0412005.

[7] 张 雷. 双波段红外图像目标特性分析及其融合方法研究 [D]. 太原: 中北大学, 2007.

[8] 赵 霞. 基于视觉的目标定位技术的研究进展 [J]. 计算机科学, 2016, 43 (6): 11-13.

### 6 结束语

显示控制模拟实验系统采用半实物仿真技术实现综合航电模拟系统的操作功能，显示控制+交联环境的系统架构既体现了综合航电系统的基本架构，同时也为今后扩展连接其他分系统的模拟设备预留了方便的接口。提供了纯虚拟和硬件两种操作方式，可满足不同使用者的学习需求（纯虚拟操作方式具有方便调试、占用资源少的特点，适用于初学者熟悉系统的操作；硬件操作方式具有环境逼真、操作真实感强的优势，适用于已经熟悉系统操作流程的操作者。），兼顾了装备教学与规模教学需求，有效解决了无实装的教学难题，经济和军事效益明显。所采用的技术可推广应用于其他机型航电模拟训练系统的研制开发。

### 参考文献：

[1] Moir, Seabridge. 军用航空电子系统 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.

[2] 丛 伟, 樊晓光, 南建国. 综合航空电子系统总体技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2015.

[3] 熊华刚, 王中华. 先进航空电子综合技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.

[4] 支超有. 机载数据总线技术及其应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.

[5] 杨建新, 王锡仁. 平显模拟系统的软件设计与实现 [J]. 测控技术, 2002, 21 (5): 60-63.

[6] 杨卫凤. 现代飞机模拟显控系统软件开发 [D]. 南昌: 南昌航空大学, 2011.

[7] 李奔杰, 张文兵, 马 晋, 等. 通道 RS422 通信的综合显示控制处理机内部数据交互的软件设计与实现 [J]. 航空电子技术, 2011, 42 (1): 34-37.

[8] 杨建新, 葛银茂. 多功能显示模拟器的设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2009, 17 (12): 2485-2487.