

doi: 10.7690/bgzdh.2024.07.015

基于插件形式的空空雷达仿真建模方法

王志乐, 孙忠云, 邹刚

(海军航空大学青岛校区, 山东 青岛 266041)

摘要: 针对火控雷达仿真的主要功能结构, 建立雷达多种搜索跟踪仿真模型, 设计模拟训练通用火控雷达目标搜索跟踪算法。基于插件形式以基类对象指针实现继承类对象为参数的系统交互方式, 利用抽象工厂模式架构, 建立雷达交互的数据模型、逻辑模型, 并通过雷达可视化测试环境进行试验分析。实验结果表明: 该方法能实现模拟训练通用火控雷达空空模式仿真模型, 以及模型的复用性和重构性。

关键词: 火控雷达; 仿真模型; 搜索跟踪算法; 模拟训练; 逻辑模型

中图分类号: TN97; V271 **文献标志码:** A

Modeling Method of Air-to-air Radar Simulation Based on Plug-in Form

Wang Zhile, Sun Zhongyun, Zou Gang

(Qingdao Campus, Naval Aviation University, Qingdao 266041, China)

Abstract: According to the main function structure of fire control radar simulation, the multi-search and tracking simulation models of radar are established, and the general target search and tracking algorithm of fire control radar for simulation training is designed. Based on the plug-in form, the system interaction mode is realized by using the base class object pointer and the inheritance class object as the parameter, and the data model and logic model of radar interaction are established by using the abstract factory pattern architecture, and the test analysis is carried out through the radar visual test environment. The experimental results show that the method realizes the air-to-air mode simulation model of simulation training general fire control radar, and realizes the reusability and reconstruction of the model.

Keywords: fire control radar; simulation model; search and track algorithm; simulation training; logic model

0 引言

在现代飞机系统架构下, 雷达系统已经成为综合航电系统的一个重要子系统, 为其他航电系统提供目标信息, 是现代军机预警、探测的主要模块, 也是综合航电系统仿真建模的子系统之一, 其输出的目标数据需要在多功能显示器 (multi-function display, MFD) 上进行可视化显示, 以供飞行训练人员直观地掌握目标的状态^[1-2]。随着计算机仿真技术的发展, 战术模拟训练系统以安全、经济、可控、不受气候条件和场地空间限制, 既能进行常规操作训练, 又能培训处理对于各种事故的应变能力等独特优势, 受到各国军方的高度重视^[3-5]。对战术模拟训练系统而言, 空空火控雷达是重要的核心系统, 其仿真内容包括雷达操作交互使用、目标探测与跟踪、雷达数据可视化显示^[6-8]。在机载综合航电系统框架下, 雷达系统与显示系统交互的数据复杂, 信息量大, 可视化程度也变得很复杂^[9]。

笔者介绍了机载空空火控雷达仿真的主要功能结构, 提出基于插件形式以基类对象指针实现继承类对象为参数的系统交互方式, 利用抽象工厂模式

架构^[10], 建立雷达交互的逻辑模型、数据模型^[11], 实现了雷达搜索、跟踪关键算法^[12-13], 并通过 OpenGL 建立了雷达可视化验证测试环境。实验结果表明, 该方法实现了模拟训练通用火控雷达关键算法和可重构的雷达插件开发技术。

1 雷达的主要功能

如图 1 所示, 空-空拦截主模式下的搜索跟踪主要包括: 边搜索边测距 (ranging while searching, RWS), 边扫描边跟踪 (track while scanning, TWS), 单目标跟踪 (single target tracking, STT), 双目标跟踪 (double target tracking, DTT)^[11-12]。

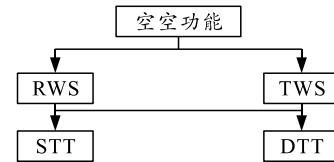


图 1 雷达空空主要功能模式

2 雷达仿真建模

2.1 坐标系

在雷达系统仿真中建立合理的坐标系, 可以有

收稿日期: 2024-03-12; 修回日期: 2024-04-15

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41576011)

第一作者: 王志乐 (1983—), 男, 江苏人, 硕士。

效地简化分析和运算过程^[14]。下面对雷达系统仿真过程中使用的坐标系和相关参数进行定义。

1) 地心坐标系^[15-16]。

地心直角坐标系的原点为地球质心，轴指向赤道与格林威治起始子午面的交点，轴指向地球北极，轴与轴构成右手坐标系。

2) 机体坐标系。

机体坐标系原点在飞机质心，轴平行于机身轴线指向机体为正；轴垂直于飞机对称面指向机体右方为正，轴在飞机对称面内垂直于平面向上为正。

2.2 雷达功能仿真模型

雷达功能仿真模型对雷达工作流程以及边搜索边测距、边扫描边跟踪、单目标跟踪以及双目标功能进行仿真^[17]，如图 2 所示。

如图 3 所示，在 RWS 仿真模型建立的过程中^[11-12]，首先确定目标历程、雷达频道号、距离量程，然后处理高压辐射指令，确定方位扫描宽度

(±30°或±60°)，俯仰扫描行数，方位、俯仰扫描中心以及波门高度，在获得目标在地球坐标系的位置、速度、姿态后，根据目标扫描算法判断是否扫描到目标，经过坐标变换后得到目标相对载机的位置、速度、姿态等参数。

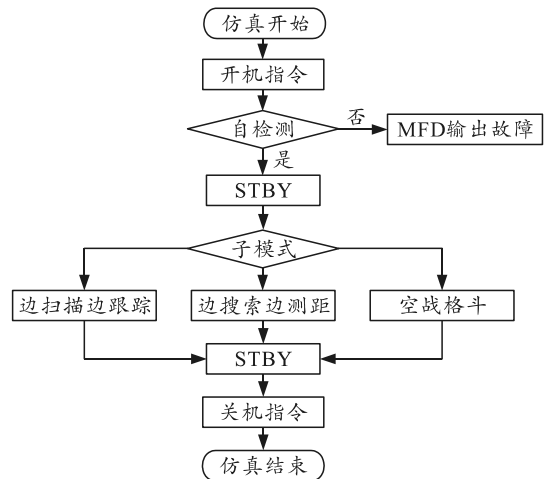


图 2 雷达功能仿真流程

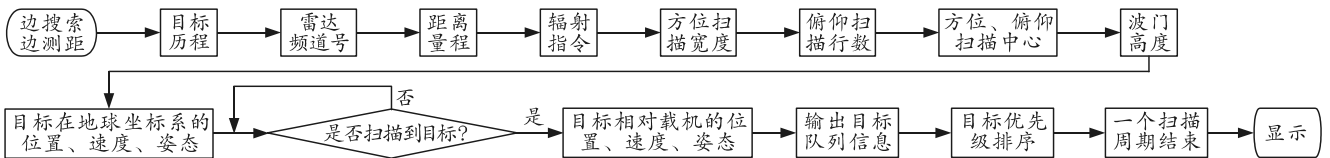


图 3 RWS 仿真流程

如图 4 所示，在 TWS 仿真模型建立的过程中^[11-12]，首先确定目标历程、雷达频道号、距离量程；然后处理高压辐射指令，确定多目标攻击下雷达扫描方案(如方位±22.5°俯仰 2 行)，方位、俯仰扫描中心以及波门高度，在获得目标在地球坐标系

的位置、速度、姿态后，根据目标扫描算法判定是否扫描到目标；最后经过坐标变换后得到目标相对载机的位置、速度、姿态等参数。

2.3 目标扫描算法

目标扫描算法公式如下：

$$\cos \varphi = \cos(\varphi_0), \cos \theta = \cos(\theta_0), \sin \varphi = \sin(\varphi_0); \sin \theta = \sin(\theta_0), \sin \gamma = \sin(\gamma_0), \cos \gamma = \cos(\gamma_0);$$

$$T_0 = \begin{bmatrix} \cos \varphi \cos \theta & \sin \theta & -\sin \varphi \cos \theta \\ \sin \varphi \sin \gamma - \cos \varphi \sin \theta \cos \gamma & \cos \theta \cos \gamma & \cos \varphi \sin \gamma + \sin \varphi \sin \theta \sin \gamma \\ \sin \varphi \cos \gamma + \cos \varphi \sin \theta \sin \gamma & -\cos \varphi \sin \gamma & \cos \varphi \cos \gamma - \sin \varphi \sin \theta \sin \gamma \end{bmatrix}; G_0 = T_0^T.$$

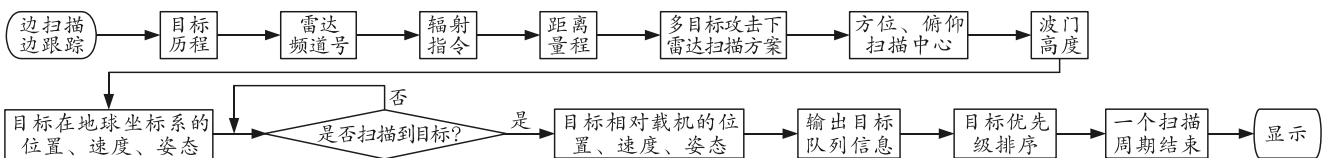


图 4 TWS 仿真流程

目标在地理坐标系下的位置 x_m, y_m, z_m ；本机在地理坐标系下的位置 x, y, z ；目标在飞机坐标系下的相对位置如下：

$$(x_f, y_f, z_f)^T = (x_m - x, y_m - y, z_m - z) \times G_0.$$

目标在地理坐标系下的速度 v_{xm}, v_{ym}, v_{zm} ；本机在地理坐标系下的速度 v_x, v_y, v_z ；目标在飞机坐标系下的相对速度如下：

$$(v_{xf}, v_{yf}, v_{zf})^T = (v_{xm} - v_x, v_{ym} - v_y, v_{zm} - v_z) \times G_0.$$

目标航迹角 t_a 和水平进入角 l_a ：

$$l_a = \arctan(x_m / z_m).$$

目标距离 r ，速度 v ：

$$r = |\sqrt{x_f^2 + y_f^2 + z_f^2}|; v = \sqrt{v_{xf}^2 + v_{yf}^2 + v_{zf}^2}.$$

目标相对载机的方位角 a ：

$$a = \tan^{-1}(z_f/x_f)。$$

目标相对载机的俯仰角 e ：

$$e = \tan^{-1}(y_f / \sqrt{x_f^2 + z_f^2})。$$

当 $|a|$ 小于天线方位角， $|e|$ 小于天线俯仰角，

且 r 小于距离分辨率，则目标被发现，否则未发现目标。

2.4 目标跟踪仿真模型

STT 仿真流程如图 5 所示。

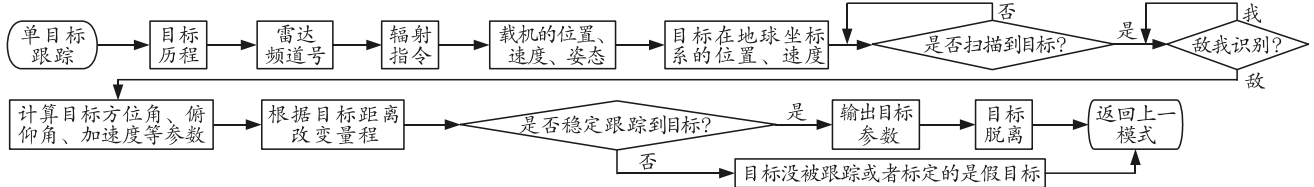


图 5 STT 仿真流程

STT 仿真模型建立时，首先确定目标历程、雷达频道号，然后处理高压辐射指令，获得载机的位置、速度参数以及目标在地心坐标系的位置、速度^[11]，再根据雷达 PDR_PANDING_RR 函数判定是否扫描到目标，如果 $m_YORN=1$ ，则扫描到目标，然后进行敌我识别。确定是敌方目标后计算目标方位角、俯仰角等参数，当目标距离改变时，适当改变距离量程。这时，如果目标没被跟踪或者标定的是假目标，则返回上一模式；如果稳定跟踪到目标，则输出计算目标参数，当目标脱离后，返回上一模

式^[18-19]。参数计算如下：

$r_n = r_n - r_{n-1}$ ，本周与下一周的距离差；

$\Delta r = \text{abs}(r_n / (T \times \Delta t))$ ，距离变化率；

$\Delta V_x = V_x / (T \times \Delta t)$ ，X 方向速度变化率；

$\Delta V_y = V_y / (T \times \Delta t)$ ，Y 方向速度变化率；

$\Delta V_z = V_z / (T \times \Delta t)$ ，Z 方向速度变化率；

$\Delta a = \text{abs}(a_n / (T \times \Delta t))$ ，方位角变化率；

$\Delta e = \text{abs}(e_n / (T \times \Delta t))$ ，俯仰角变化率。

DTT 仿真流程如图 6 所示。

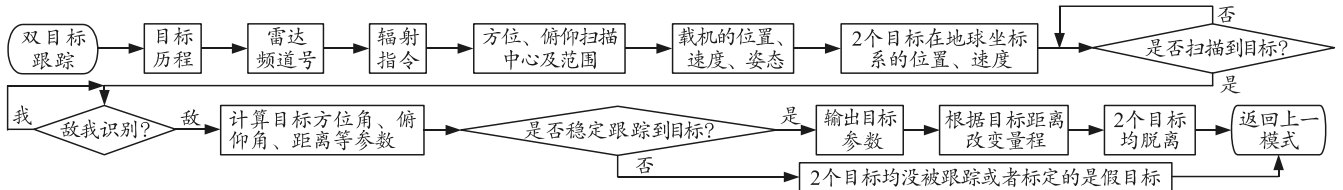


图 6 DTT 仿真流程

在 DTT 仿真模型中，首先确定目标历程、雷达频道号，然后处理高压辐射指令，确定方位、俯仰扫描中心，获得载机的位置、速度参数以及 2 个目标在地球坐标系的位置、速度，再根据 PDR_PANDING_RR 函数判定是否扫描到目标，如果 $m_YORN=1$ ，则扫描到目标，然后进行敌我识别。只要有任一确定是敌方目标后，计算目标方位角、俯仰角等参数。这时，如果目标没被跟踪或者标定的是假目标，则返回上一模式；如果稳定跟踪到目

标，则输出目标参数，当目标距离改变时，适当改变距离量程^[11]。当 2 个目标均脱离后跟踪，返回上一模式。双目标跟踪模式目标参数变化率计算与单目标类似。以位置参数为例计算目标在机体坐标系的位置如下：

设飞机航向角为 ϕ ，俯仰角为 θ ，横滚角为 γ 。目标在地心坐标系中坐标为 (XM, YM, ZM) ，飞机坐标为 (X, Y, Z) 。将坐标从机体坐标变换到地心坐标系的转换矩阵为：

$$T = \begin{bmatrix} \cos \phi \cos \theta & \sin \theta & -\sin \phi \cos \theta \\ \sin \phi \sin \gamma - \cos \phi \sin \theta \cos \gamma & \cos \theta \cos \gamma & \cos \phi \sin \gamma + \sin \phi \sin \theta \sin \gamma \\ \sin \phi \cos \gamma + \cos \phi \sin \theta \sin \gamma & -\cos \theta \sin \gamma & \cos \phi \cos \gamma - \sin \phi \sin \theta \sin \gamma \end{bmatrix}。$$

得到目标在机体坐标系中的相对位置为：

$$\begin{bmatrix} XF \\ YF \\ ZF \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} XM - X \\ YM - Y \\ ZM - Z \end{bmatrix} \times T^T。$$

3 建立仿真插件

首先利用 VS2012 新建工程，利用抽象工厂模

式建立航电系统通用模板库 (AvionicsAppDLL 模板)，利用该模板建立 ModelPDR 雷达插件，完成模型类的创建^[20-23]，雷达仿真模型和算法是类函数的主体。此时，平台自动建立了基本的.H 文件和.CPP 文件，利用属性页完成引用路径的设置、输出路径的设置、链接库路径的设置等^[20]。其次在

ModelPDR.CPP 文件中实现外部调用函数，如图 7 所示。

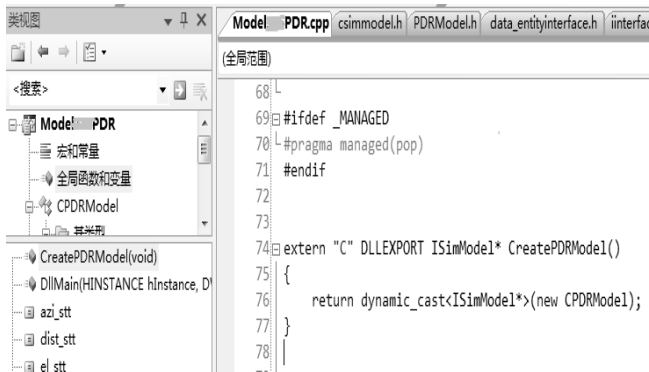


图 7 接口类外部调用方式

利用仿真平台提供的抽象模型开发库建立模型仿真类。PDR 仿真类的部分接口，在类里增加内部逻辑模型处理函数和雷达数据模型处理函数，在该函数内完成雷达仿真模型和算法模型。

CGLImageDraw 类模型定义：

```
#include "AvionicsApp_Interface.h";
#include "CSimModel.h";
class CPDRModel : public CSimModel;
{public:
    CPDRModel(void);
    virtual ~CPDRModel(void);
    //设置本模型输入(的其他模型)数据信息;
    virtual void SetInputExtData(constIData
Interface *pData);
    virtual void Init(IInterface* pInit); //初始化;
    virtual void Start();
    virtual void Step(); //单步运行本模型;
    virtual void Stop(); //停止本模型的运行;
};
```

其中在构造函数 CPDRModel 中要创建本模型的控制接口和数据接口^[24]，这些接口在平台层实现模型之间的交互。

CPDRModel 函数创建模型接口代码：

```
m_pPDR->SetName("IPDRInterface");
m_pPDRControl->SetName("IPDRControlInterf
ace");
m_pData=dynamic_cast<IDataInterface*>(m_pP
DR);
m_pControl=dynamic_cast<IControlInterface*>(
m_pPDRControl)。
```

在 SetInputExtData(pData)函数中读取其他航电系统模型的数据，其具体函数代码如下，读取显控

系统模型、飞控系统模型数据。

CPDRModel 函数创建模型接口代码：

```
m_pDCMS=dynamic_cast<constIDCMSInterfac
e*>(pData);
m_pFLY=dynamic_cast<constIFLYInterface
*>(pData)。
```

在 Init 函数中主要实现雷达仿真模型相关数据的初始化，Start 是开始仿真调用的函数。Step 表示仿真周期执行的函数，仿真模型中所有的逻辑处理函数、雷达数据计算函数都在此函数中，Stop 表示暂停雷达仿真模型解算。

采用 C++语言和平台提供的基础接口^[20]，进行派生。

平台控制接口代码：

```
class IControlInterface : public IInterface
{
public:
    virtual void SetName(char*
strName){m_strName=strName;};
    //设置本控制接口名称
    //设置源控制模型名称
    virtual void SetSourceModelName(char*
strName)
    {m_strSourceModelName=strName;};
    virtual conststd::string GetName() const
    {return std::string(m_strName);};
    virtual conststd::string GetSourceModel
Name() const
    {return std::string(m_strSourceModelName);};
protected:
    char* m_strName;
    char* m_strSourceModelName;
};
```

平台数据接口代码：

```
class IDataInterface : public IInterface
{
public:
    virtual void SetName(char* strName)
    {m_InterfaceName = strName;};
    virtual conststd::string GetName() const
    {return m_InterfaceName;};
protected:
    std::string m_InterfaceName;
};
```

4 仿真应用分析

在某型机战术模拟训练系统案例雷达仿真系统

建设过程中,加载了飞控系统仿真、大气系统仿真、惯导系统仿真、雷达系统仿真、显控系统仿真和模拟目标等模型^[6,25-26],验证了火控雷达搜索目标、截获目标的功能,主要与显控、飞控、惯导仿真模型进行状态和数据的交互。通过完成系统的上电,打开显控,将模式开关切换到格斗^[27-28],进入单目标跟踪状态后,雷达截获了目标,系统显示的效果如图8和9所示。

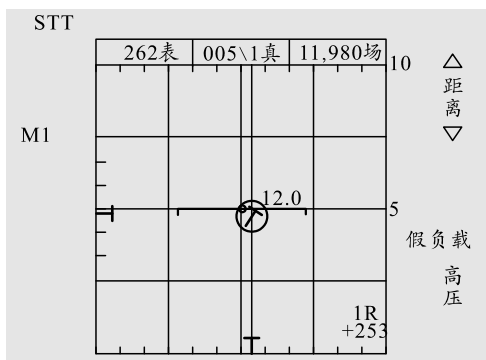


图8 单目标跟踪模式 MFD 截获目标

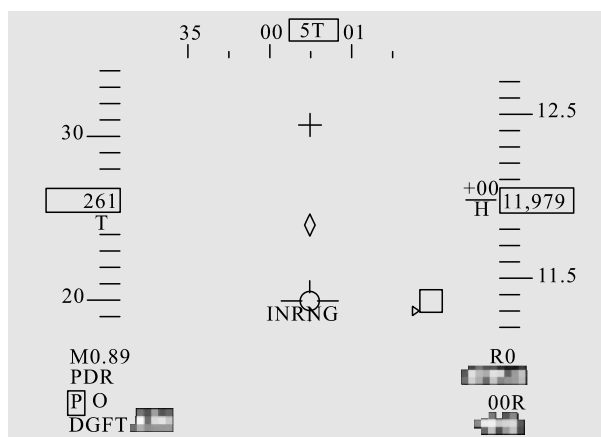


图9 单目标跟踪模式平显(HUD)显示

在综合控制板雷达截获开关处于自动截获情况下,目标在雷达扫描范围内能够及时的截获,随着飞机的飞行,目标越来越近,飞机保持平飞,最终目标脱离雷达跟踪,系统性能良好。

5 结论

笔者面向模拟训练系统建设需求,建立了常用的机载空空火控雷达搜索跟踪仿真模型,并设计了模拟训练通用火控雷达目标搜索跟踪算法。基于抽象工厂模式架构建立了雷达交互仿真模型插件,该插件具有很好的通用性和扩展性。将该雷达插件集成到某型机战术仿真训练系统中进行测试证明,该方法实现了模拟训练通用火控雷达空空模式仿真模型,以及模型的复用性和重构性。

参考文献:

- [1] 丛伟,樊晓光,于宏坤. 基于有向图的综合航电系统结构设计及优化方法[J]. 光电与控制, 2014, 21(1): 11-14.
- [2] 杨立亮,董海涛. 航电系统作战飞行程序仿真运行环境研究[J]. 航空电子技术, 2011, 42(4): 24-98.
- [3] 张建仓. 机载火控雷达的仿真实现[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(27): 7145-7148.
- [4] SONG J, HOU C, XUE G, et al. Study of Constellation Design of Pseudolites Based on Improved Adaptive Genetic Algorithm[J]. Journal of Communications, 2016, 11(9): 879-885.
- [5] 杨东华,王志祥. 国产化雷达显控终端设计与实现[J]. 现代雷达, 2019, 41(5): 82-85.
- [6] 李如年,倪国旗,方中江. 某型火控雷达仿真系统的设计与实现[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(3): 7030-7033.
- [7] 王琳,张大锋,刘锋,等. 直升机载火控雷达模拟训练仿真系统设计[J]. 火控雷达技术, 2017, 46(4): 7030-7033.
- [8] MERCURI M, LIU Y H, LORATO I, et al. A Direct Phase-Tracking Doppler Radar Using Wavelet Independent Component Analysis for Non-Contact Respiratory and Heart Rate Monitoring[J]. IEEE transactions on biomedical circuits and systems, 2018, 12(3): 632-643.
- [9] ZHANG X, LIU G, YANG C, et al. Research on Air Combat Maneuver Decision-Making Method Based on Reinforcement Learning[J]. Electronics, 2018, 7(11): 279-284.
- [10] 李华君,高清. 基于设计模式的雷达终端软件实现[J]. 雷达与对抗, 2012, 32(2): 62-66.
- [11] 唐玉文,何明浩,韩俊,等. 机载火控雷达典型空-空工作模式浅析[J]. 现代防御技术, 2018, 46(6): 87-93.
- [12] 杜科. 机载火控雷达仿真系统设计与实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2007.
- [13] 尚朝轩,赵杨,韩壮志,等. 信号级单脉冲跟踪雷达仿真系统设计与实现[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(3): 895-905.
- [14] 杨淑心,沃维丰,朱莹. 投影法在多雷达坐标变换中的应用[J]. 现代雷达, 2016, 38(6): 50-53.
- [15] 施一民,朱紫阳,范业明. 坐标参数为长度量的一种新型的大地坐标系[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2005, 33(11): 1537-1540.
- [16] 金宏斌,徐毓,董峰. 雷达信息处理系统中的坐标变换问题研究[J]. 空军雷达学院学报, 2003, 17(3): 54-56.
- [17] 蒙广元,程丰,殷彬. 雷达目标跟踪模拟系统设计实现[J]. 计算机仿真, 2018, 35(3): 5-8.