

# 雷达作战复杂电磁环境模拟

王春雨 齐兴龙 周一鹏

(空军航空大学, 吉林 长春 130022)

**摘要** 鉴于现代空战中雷达的重要作用, 需要在模拟的电磁环境中加强雷达的仿真训练, 有必要建立雷达作战的复杂电磁环境。本文利用数学模型建立雷达作战时的复杂电磁环境, 模拟复杂电磁环境下雷达的工作特点, 并能够确保雷达的最大工作效能, 旨在为部队训练提供有效的训练手段和训练平台, 从而有效地解决制约部队战斗力成长的问题。

**关键词** 航线规划 环境仿真 面反射仿真 目标回波模拟

中图分类号: TN973

文献标识码: A

文章编号: 1007-0745(2022)09-0112-03

现代科技的进步推动了军事电子装备的快速发展, 使得作战空间的电磁环境日趋复杂。D.V.Giri 对人为电磁威胁环境构成要素进行了系统分类<sup>[1]</sup>。李云刚完成了电子侦察雷达脉冲流的建模<sup>[2]</sup>。H.G.Kang 提出了干扰信号的综合建模方法。<sup>[3]</sup>P.R.Boord 分析了目标相干视频回波模型<sup>[4]</sup>。雷达是现代空战重要的电子设备, 对雷达工作的复杂电磁环境进行有效仿真成为加强雷达作战应用训练的重要一环<sup>[5]</sup>。

本文利用三维数字地理数据系统提供典型区域, 通过仿真系统可对该区域的材质及作战目标进行设置, 实现作战环境的仿真。系统利用数学模型驱动, 通过信号电平仿真, 系统具有高保真度, 并通过良好的人机交互功能, 使系统易于操作。系统能够对机载轰炸、火控雷达的空海、空地、辅助导航等工作环境进行有效的模拟。

## 1 系统结构设计

系统包括控制部分、训练终端部分和网络通信三部分。主控制部分由控制计算机和终端显示器构成。主要完成航线规划、目标设置、训练参数的设置、战场环境数据处理等。训练终端由终端计算机、终端显示器等部分构成。终端计算机通过采集终端控制台的操作数据, 完成训练过程, 主要包括雷达状态模拟、雷达数据生成、人机交互等内容并模拟真实雷达显示器及操控部件。

## 2 航线规划仿真实现

### 2.1 载机姿态生成

载机模块主要用于在仿真过程中生成飞机的预设航迹和实时解算飞行位置。载机的飞行姿态和飞行航迹可以很好地表示载机在空中的飞行情况。机体坐标系包括方位角、俯仰角和滚转角。航迹是指飞行器的测量时间序列, 它是反映目标飞行航线、航速, 以及飞行目的的重要参数<sup>[6]</sup>。在仿真系统中, 对飞机的运动做了简化, 不考虑风速对于飞机速度的影响, 确定了地面坐标系、机体坐标系与雷达坐标系的相对位置关系如公式(1)。

其中,  $\theta$  为俯仰角, 是飞机纵轴与水平面之间的夹角;  $\psi$  为偏航角, 是飞机纵轴在水平面上的投影与地轴之间的夹角;  $\gamma$  为滚转角, 是飞机对称面与包含轴的铅垂面之间的夹角。

### 2.2 航线生成

在仿真系统中, 航迹生成是根据操作者仿真准备时的设置来生成飞机在仿真过程中的飞行轨迹。如果操作者在仿真中没有对飞行器进行飞行控制, 系统将按照预先设定的飞行方式进行飞行; 如果操作者在仿真中控制飞机, 预设的飞行方向将发生改变, 系统将根据调整后的轨迹进行仿真。航迹在仿真初始时进行设置, 通过地图拾取功能可以直接在地图上进行航迹点设置, 同时可以在航迹参数编辑界面对航迹点的经纬度及飞行高度进行修改。

$$B_D^T = \begin{bmatrix} \cos \gamma \cos \psi - \sin \gamma \sin \theta \sin \psi & \cos \gamma \sin \psi + \sin \gamma \sin \theta \sin \psi & -\sin \gamma \cos \theta \\ -\cos \theta \sin \psi & \cos \theta \sin \psi & \sin \theta \\ \sin \gamma \cos \psi + \cos \gamma \sin \theta \sin \psi & \sin \gamma \sin \psi - \cos \gamma \sin \theta \cos \psi & \cos \gamma \sin \theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

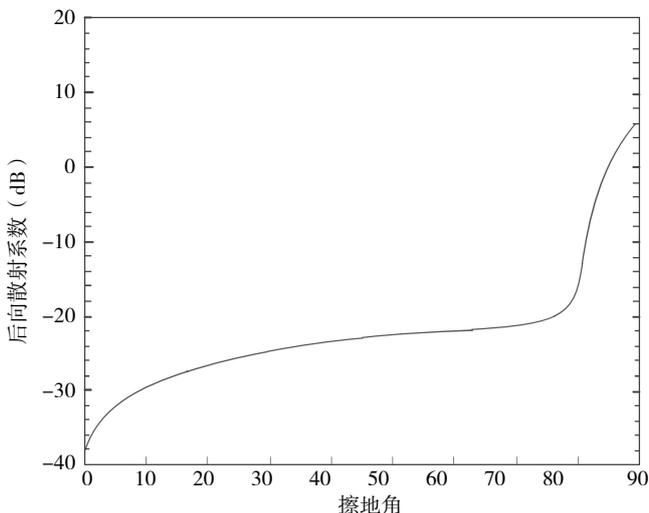


图1 后向散射系数与擦地角的关系图

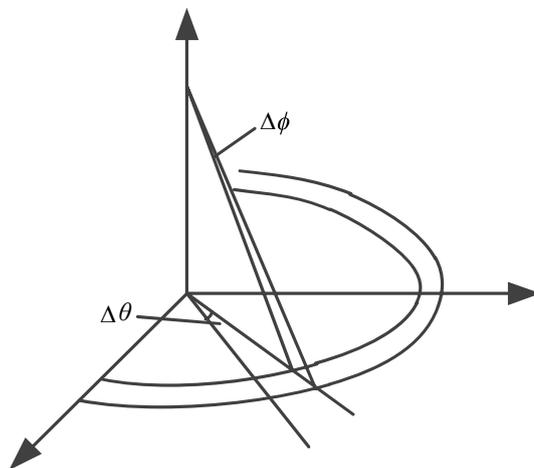


图2 散射单元划分

### 3 环境仿真实现

为降低数据处理量,提高针对性,首先以纬度范围方式选取处理区域。自动预处理根据高程数据、地图数据。自动识别地物,包括树木林地、城市村庄、河流湖泊和道路桥梁,并计算标准单位下的目标回波数据。处理完成后将预处理数据入库。

仿真推演训练开始前,应在雷达客户端和仿真客户端之间进行数据同步。主程序采用Ribbon界面设计,界面工具栏根据功能需求划分为主页、地物、任务、3D视图、工具等。

主页工具栏主要实现任务文件的编辑和2D地图的操作;地物工具栏用于实现目标信息预处理的人机交互操作;任务工具栏用于实现仿真态势的部署和仿真推演控制;3D视图工具栏用于3D地图交互;工具栏主要提供界面交互所需的工具及系统设置等。

主程序界面实现采用Model-View-ViewModel设计模式实现,其中Model为UI2DComponent和UI3DComponent;View为显示界面;ViewModel将二者有机结合,一方面获取Model中的数据并实现与View的绑定,另一方面响应View的操作,实现与仿真框架的交互。

2D地图平台采用GMap.Net,3D地图采用AGI Insignht3D,并自主实现本地卫星影像数据、高程数据和矢量地图的加载与态势的标绘。

为实现统一的鼠标交互命令响应,界面实现抽象出UI2DCommand和UI3DCommand,用于记录和处理界面尤其是2D和3D平台的人机交互。

## 4 面反射仿真模块

### 4.1 地面散射模型

在反射模拟中,地面反射回波特性分析的一个重

要指标是后向散射系数 $\sigma_0$ 。回波的后向散射系数是指散射体表面反射特性和后向散射特性的乘积按空间范围的归一化系数<sup>[7]</sup>。也可以说,后向散射系数 $\sigma_0$ 是雷达截面积在单位面积上的平均值。由于地杂波的非均匀性,回波模型通常采用统计模型,地杂波后向散射系数服从一定的分布。后向散射系数与雷达照射的入射角之间存在依赖关系,一般情况下,入射余角越接近 $0^\circ$ ,后向散射系数 $\sigma_0$ 越小,入射余角越接近 $90^\circ$ ,后向散射系数 $\sigma_0$ 越大。仿真系统中选用的模型为: $\sigma_0(\varphi)=m\sin\theta+n\exp(-(90-\theta)^2/\theta_0^2)$ ,可得后向散射系数与擦地角之间的关系如图1所示。

### 4.2 划分地面散射单元

地面散射单元的划分应满足每个散射单元的天线增益、距离和入射角恒定。在仿真系统中,假设反射是均匀的,即来自不同散射单元的后向散射信号是统计独立的,空间上没有相干性。在整个雷达探测的区域内,地表面被划分为 $\Delta R \times \Delta \theta$ 的网格单元,其中 $\Delta R$ 为距离环的宽度, $\Delta \theta$ 为方位角间隔,如图2所示。

### 4.3 距离环宽度的确定

如果距离门宽度为 $\tau$ ,则距离分辨率单元为 $c\tau/2$ 。在地面反射时,其距离宽度近似为一个距离分辨率单元,即 $\Delta R=c\tau/2$ 。在一定的距离环内,可以把距离环看成一个平面。在参考坐标系中,俯仰角是固定的,方位角在 $360^\circ$ 内变化。

### 4.4 确定单个散射单元参数

为了确定散射单元的回波信号,首先必须确定散射单元的相关属性,包括参考坐标系下散射单元的方位角、俯仰角、擦除角和雷达截面积。

根据机载雷达与散射单元的相对几何关系,可以

推导出散射单元中心俯仰角:

$$\phi = \sin^{-1} \left[ \frac{H}{R_i} + \frac{R_i^2 - H^2}{2R_i(R_e + H)} \right] \quad (2)$$

其中,  $H$  为载机高度,  $R_i$  为载机到散射单元中心的距离,  $R_e$  是地球平均半径的  $4/3$ 。

散射单元中心的方位角在  $360^\circ$  范围内变化, 每次递增  $\Delta\theta$ , 则某距离环内的第  $k$  散射单元的方位角为:

$$\theta_k = (k - \frac{1}{2})\Delta\theta \quad (3)$$

经过坐标变换, 能够得到机体坐标系中散射单元的方位角  $\theta_0$  和俯仰角  $\varphi_0$ 。散射单元的擦地角为:

$$\beta = \sin^{-1} \left[ \frac{H^2 + 2R_e H - R_i^2}{2R_i R_e} \right] \quad (4)$$

#### 4.5 散射单元的回波信号模型

所有杂波散射元的相干叠加就是地杂波的相干模型, 所以必须先确定一个散射单元的回波信号。根据雷达方程, 在  $(\theta, \varphi)$  处雷达接收到的散射单元回波信号幅度可表示为:

$$A(\theta, \varphi) = \left[ \frac{P_t \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 L} \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{G(\alpha_r, \beta_r)}{R^2} \quad (5)$$

式中,  $P_t$  为雷达发射信号的峰值功率,  $\lambda$  为雷达工作波长,  $\sigma$  为该散射单元的雷达截面积,  $G(\alpha_r, \beta_r)$  为雷达天线增益,  $(\alpha_r, \beta_r)$  为散射单元相对于天线的方位角和俯仰角,  $L$  为雷达综合损耗。

#### 4.6 地面回波模拟仿真

结合地杂波相干信号模型, 地杂波的相干信号仿真过程为: 首先读取雷达参数、地球半径、载机参数和散射系数, 然后计算距离分辨单元  $R_u = ct/2$ , 散射单元数量为  $N = \sqrt{2HR_e}/R_u$ 。

再推算散射单元中心的俯仰角:

$$\varphi = \sin^{-1} \left[ \frac{H}{R_i} + \frac{R_i^2 - H^2}{2R_i(R_e + H)} \right] \quad (6)$$

最后计算散射单元的擦地角:

$$\beta = \sin^{-1} \left[ \frac{H^2 + 2R_e H - R_i^2}{2R_i R_e} \right] \quad (7)$$

当方位角  $\theta=0$  时, 确定  $\phi_N$ , 如果满足制定条件, 调整天线方向图, 计算  $\sigma_m^0$ , 天线面积  $\Delta A = R_i \Delta R \Delta \theta$ , 雷达截面积  $\sigma = \sigma_m^0 \Delta A$ , 产生后向散射系数序列, 并产生下一个单元回波信号, 方位角  $\theta = \theta + \Delta\theta$ , 如果  $\theta > 2\pi$ ,

则  $i=i+1$ , 判断  $i$  是否大于  $N$ , 若  $i$  小于  $N$ , 重新推算散射单元中心的俯仰角:

$$\varphi = \sin^{-1} \left[ \frac{H}{R_i} + \frac{R_i^2 - H^2}{2R_i(R_e + H)} \right] \quad (8)$$

重复上述过程; 若  $i$  大于  $N$ , 直接结束。如果不能满足制定条件, 直接判断  $i$  是否大于  $N$ , 重复后续过程。

#### 5 目标回波模拟设计

在仿真系统中, 通过天线模块实时获取天线指向, 利用目标与载体的相对位置关系来判断目标是否在天线波束内。如果目标不在波束内, 则认为目标不能被雷达探测到, 则不会产生该目标的回波信号; 当目标在波束内时, 根据结合天线增益、目标距离和目标与载体之间的相对位置的回波信号模型对目标回波信号进行仿真。

#### 6 总结

本文提出的仿真系统利用三维数字地球系统作为雷达波束扫描对象, 构建了与实际雷达相同的电磁作战环境, 能够真实地反映雷达的工作状态, 与真实的电磁环境相似度较高, 可用于电子装备在指定电磁环境中的模拟训练, 有助于提高训练效果。

#### 参考文献:

- [1] D V Giri, FM Tesche. Classification of Intentional Electromagnetic Environments(IEME)[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic compatibility(S0018-9375), 2004, 46(03):322-327.
- [2] 李云刚, 张国柱, 吴京, 等. 电子干扰信号环境数字仿真建模与实现 [J]. 航天电子对抗, 2003(01):28-31.
- [3] H G Kang, S E Cho, K S Park, et al. The Modeling of Interference and Correlation Analysis in an Electromagnetic Environment[C]//2001 Asian-Pacific Microwave Conference(AMPC 2001). Taipei Taiwan China. USA: IEEE, 2001:878-881.
- [4] P R Boord, N M Martin. Simulation of an Electromagnetic Environment for Performance Analysis of Radar Receivers[C]//The Fourth International Symposium on Signal Processing and its Applications(ISSPA 1996), Gold Coast, Australia. IEEE, 1996:129-130.
- [5] 李炳伟, 万福, 吴爱民. 复杂电磁环境模型及仿真框架的构建 [J]. 航天电子对抗, 2009(06):40-42.
- [6] 何友, 修建娟, 关欣等. 雷达数据处理及应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2013.
- [7] 丁鹭飞, 耿富录, 陈建春. 雷达原理 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2014.