

doi: 10.7690/bgzdh.2019.10.012

雷达抗干扰辅助训练软件

杨立永

(中国人民解放军 91336 部队, 河北 秦皇岛 066326)

摘要: 为充分将理论知识运用到实装抗干扰操作, 提高训练效益, 设计并实现一种基于 DirectX 显示技术雷达抗干扰辅助训练软件。研究雷达目标、海浪、噪声干扰、假目标等视频回波模拟方法, 建立相关计算模型, 分析雷达干扰和抗干扰技术机理, 以窄带瞄准式噪声干扰样式为例进行软件实现。结果表明: 该设计能较好地解决雷达训练组织中理论教学和装备操作之间衔接的问题, 满足操作手抗干扰训练需求。

关键词: 雷达; 干扰; 辅助训练; DirectX

中图分类号: TN972 **文献标志码:** A

Radar Anti-jamming Assistant Training Software

Yang Liyong

(No. 91336 Unit of PLA, Qinhuangdao 066326, China)

Abstract: In order to fully apply theoretical knowledge to practical anti-jamming operation and improve training efficiency, a radar anti-jamming auxiliary training software based on DirectX display technology is designed and implemented. The video echo simulation methods such as radar target, sea wave, noise interference, and false target are studied, the correlation calculation model is established, the mechanism of radar interference and anti-jamming technology are analyzed, and the narrow-band aiming noise interference pattern is taken as an example for software implementation. The results show that the design can better solve the problem of connection between theoretical teaching and equipment operation in radar training organization, and meet the anti-jamming training needs of operators.

Keywords: radar; interference; assistant training; DirectX

0 引言

美国是开展军事模拟训练较早的国家。我国经过 50 多年的努力, 在分布式交互仿真、虚拟现实技术等方面获得了发展, 模拟训练在军事各方面均体现出了独特的优势。目前, 雷达装备的干扰环境构设难度大, 且实装在采取变频抗干扰措施时存在严重泄密的危害性, 开展仿真模拟训练也就成为训练雷达操作人员抗干扰能力的重要手段。训练流程主要为理论授课、装备实操和训练评估。装备操作人员从理论学习到装备实操, 存在理论知识还未消化吸收, 难以与实装操作结合起来的问题, 不能充分将理论知识运用到实装抗干扰操作, 降低了训练效益。笔者设计的抗干扰辅助训练软件, 可实时调整干扰机的干扰功率、天线增益、波束指向, 为干扰机平台设计不同高度、不同掩护方式等战术行动, 也可显示不同的干扰战术对雷达干扰效果的影响, 为雷达操作手开展复杂环境下抗干扰训练提供辅助工具。

1 系统结构设计

如图 1 所示, 雷达抗干扰辅助训练软件主要由训练控制软件和雷达显示模拟软件组成。训练控制软件可以用态势编辑显示模块编辑现场训练态势, 也可以用态势导调控制模块调用已有训练态势, 并进行态势解算生成态势数据流, 通过网络发送到雷达显示模拟软件。雷达显示模拟软件接收到态势数据后, 通过初始化数据生成模块, 解算态势数据中雷达参数、目标参数、海图背景参数、气象水文参数和干扰机参数, 控制目标回波模拟模块、杂波回波模拟模块、干扰回波模拟模块产生目标回波信号、杂波回波信号、干扰信号, 并将计算的目标探测信息送至态势编辑显示模块, 用于显示雷达对目标的探测信息。信号模拟模块将产生的信号合成后送抗干扰处理模块进行相应的回波信号强度调制处理, 将处理后的回波信号送图形显示模块进行图像显示。显示控制与处理模块对职手的操作响应进行处理, 并将输出的控制信息, 送至抗干扰模块处理干

收稿日期: 2019-07-09; 修回日期: 2019-07-23

作者简介: 杨立永(1985—), 男, 天津人, 硕士, 工程师, 从事雷达仿真研究。E-mail: Liyong_yang@126.com。

扰信号, 送至数据处理模块处理目标航迹信息, 送至初始化数据生成模块更改雷达与干扰机相对位置, 最终反映在雷达显示终端的变化。

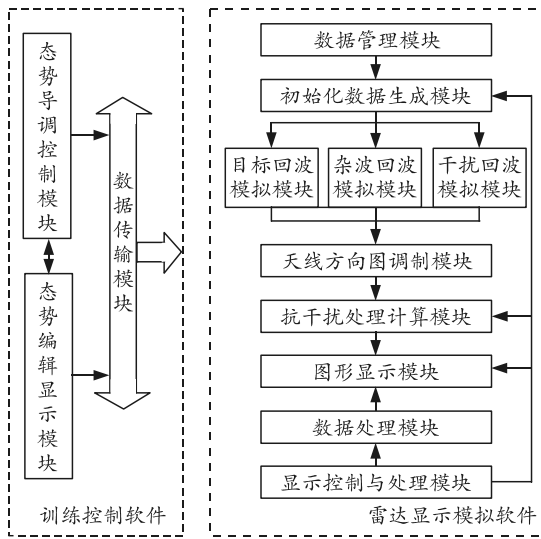


图 1 软件结构组成

2 雷达回波模拟原理

2.1 目标回波模拟

利用采集的雷达视频回波信号, 对回波数据进行反推演绎, 首先对目标回波进行分类处理, 从而得出此型雷达的目标回波特性, 其中包括目标起伏特性和幅度调制特性, 并建立目标特性模型。再通过设置雷达不同工作参数以及目标位置和属性参数调整显示回波的幅度信息, 主要涉及参数包括雷达的发射峰值功率 P_t 、雷达波长 λ 、雷达单程天线增益 G 、目标偏离雷达主波束中心轴线的方向夹角 Φ 、目标的雷达反射截面积 σ 、径向距离 R 、传播与系统损耗因子等参数, 得出输出目标回波信号功率 P 。

$$P = \left[\frac{P_t G(\Phi)^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4 L} \times 50 \right]^2 \quad (1)$$

2.2 海杂波模型

海杂波的强度与雷达信号的波长、信号入射角、雷达天线极化方式等参数关系密切, 同时还受到不同海况的影响。海杂波的强弱对舰载雷达职手发现目标, 尤其是低快小目标影响较大。为模拟产生出更为接近真实的海杂波, 笔者利用实验中采集得到的海杂波数据, 按照不同气象条件分级处理。

训练中需要模拟出各种海况下的海杂波信号, 以实际采集海杂波信号为基础信号, 以风向的改变为依据对海杂波数据做偏转运算, 根据风速和海浪

高度以及雷达特征参数, 计算每个雷达分辨单元海杂波功率值, 用以调制海杂波的幅度信息, 具体计算方法如下:

$$P_{avi} = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma_{avi}}{(4\pi)^3 R^4} \quad (2)$$

式中: v_{wind} 为风速; φ_{wind} 为风向; σ_{avi} 为雷达分辨单元内海杂波平均 RCS。假设雷达天线为水平极化方式时, σ_{avi} 可以按照如下经验公式^[2-3] 求出:

$$\sigma_{avi} = 10 \ln(3.9 \times 10^{-6} \lambda \Psi^{0.4} A_i A_u A_w) \quad (3)$$

式中: Ψ 为波束擦地角; A_i 为海浪干涉因子; A_u 为风向因子; A_w 为风速因子。

海浪干涉因子计算方法如下:

$$A_i = \frac{\sigma_\phi^4}{1 + \sigma_\phi^4} \quad (4)$$

式中 σ_ϕ 为粗糙度因子, 计算方法如下:

$$\sigma_\phi = \frac{(14.4\lambda + 5.5)\Psi h_{avi}}{(\lambda + 0.02)} \quad (5)$$

式中 h_{avi} 为平均浪高, 计算方法如下:

$$h_{avi} = \left(\frac{v_{wind}}{8.67} \right)^{2.5} \quad (6)$$

风向因子 A_u 计算方法如下:

$$A_u = \exp[0.2 \cos \phi (1 - 2.8\Psi)(\lambda + 0.02)^{-0.4}] \quad (7)$$

式中 ϕ 为雷达天线轴与逆风向间的夹角。

风速因子 A_w 计算方法如下:

$$A_w = \left(\frac{1.942 5v_{wind}}{1 + v_{wind}/15} \right)^{1.1(\lambda + 0.02)^{-0.4}} \quad (8)$$

2.3 有源干扰的模拟

1) 有源压制干扰。

噪声干扰主要由随机噪声程序产生高斯白噪声, 经过干扰功率计算模型对干扰的幅度进行调制产生, 干扰功率模型主要由干扰方程计算到达雷达天线口面的干扰幅度:

$$P_{ij} = \sqrt{\frac{P_j \lambda^2}{(4\pi)^2 L_j L L_s R_j^2} \cdot \frac{B_r}{B_j} g_j(\theta) G_r} \quad (9)$$

其中: P_j 为干扰信号发射功率; R_j 为干扰设备当前距离; L_j 为干扰设备综合损耗; $g_j(\theta)$ 为干扰发射方向图; B_j 为干扰带宽; G_r 为雷达接收天线最大增益; B_r 为接收机带宽; L_s 为被干扰雷达接收综合损耗,

包括传播综合损耗和接收综合损耗。

2) 有源欺骗干扰。

有源欺骗干扰机通过接收、复制雷达的发射波形,产生多个信号并发射至受干扰雷达天线处,受干扰雷达的显示器上,在同一方位会产生多个虚假目标或者产生一个角度不在干扰机角度处的目标。对于搜索雷达实施假目标欺骗主要使雷达的接收机处于饱和状态,起到迷惑雷达操作手的作用。对跟踪和火控雷达实施假目标欺骗干扰主要为扰乱跟踪雷达或制导雷达的角度测量装置,使其跟踪假目标方向^[11]。

在对搜索雷达实施有源欺骗干扰时,为有效地干扰雷达并不被发现干扰意图,应避免在干扰机方位上产生可识别的假目标。这就要求干扰机能够在对准雷达副瓣天线时产生多个假目标,同时要求转发干扰机输出欺骗回波信号的功率必须大到足以在雷达天线副瓣中产生可检测回波信号。假目标的回波模拟与实际目标回波模拟方法一致,但在功率的计算上,需要计算雷达所接收的干扰机发射回波信号功率,用以调制目标回波强度。欺骗干扰回波信号功率计算方法如下:

$$J = \frac{P_j G_j G_m \lambda^2 F_{p_j}^2 F_j^2}{(4\pi)^2 R_j^2 L_{mj} L_{\alpha_j}} \quad (10)$$

式中: G_m 为干扰机实施干扰时雷达天线增益; $F_{p_j}^2$ 为干扰的极化因子; F_j^2 为干扰信号进入雷达天线的单程方向图-传播因子; R_j 为干扰机距离; L_{mj} 为干扰机复制所接收雷达波形的不完整性而引起的损耗因子; L_{α_j} 为单程大气衰减因子。

2.4 计算

搜索雷达天线方向图形状,较多地采用针状天线波束和余割平方赋形,其中针状天线波束方向图的方位维波束和俯仰维波束具有同样的形状,通常采用辛克函数或高斯平方。辛克函数的单方向电压增益函数通常为

$$f(\theta) = \frac{\sin\left(2.7831 \frac{\theta}{\theta_{0.5}}\right)}{2.7831 \frac{\theta}{\theta_{0.5}}} \quad (11)$$

高斯的单方向电压增益函数通常为

$$f(\theta) = \exp\left(-1.3863 \frac{\theta^2}{\theta_{0.5}^2}\right) \quad (12)$$

其中 $\theta_{0.5}$ 为半功率波束宽度。通常天线增益采用功

率值进行计算,单方向电压增益函数与功率增益函数的关系是:

$$G(\theta) = (f(\theta))^2 \quad (13)$$

在软件设计过程中,通过赋值不同波束宽度,采用辛克函数作为雷达和干扰机的方位天线方向图。

2.5 约束性条件

雷达在进行目标探测时,会受到地球曲率、电波折射等条件的影响,笔者主要选取地球曲率作为约束性条件。雷达受地球曲率影响的直视距离为

$$R_s = 4.12 \left(\sqrt{H_a} + \sqrt{H_t} \right) \quad (14)$$

式中: R_s 为直视距离, km; H_a 为雷达天线架高, m; H_t 为目标高度, m。

3 软件实现

随着雷达干扰技术的发展,雷达抗干扰技术也在发展,尤其现代新体制雷达均可采用多种抗干扰措施。典型雷达采用以下抗干扰措施:频率分集、自适应脉间频率捷变、脉组频率捷变、低旁瓣天线、旁瓣匿影、副瓣对消、伪随机脉冲重复频率编码、干扰源测向、恒虚警、三脉冲对消等技术。

以窄带瞄准式噪声干扰样式为例,窄带瞄准式干扰要求瞄准误差足够小,保证干扰频率覆盖雷达工作频段,需要对干扰信号进行精确引导,这就对干扰方的电子支援手段(ESM)提出了高要求。瞄准式干扰的功率利用率高,能够保证足够的干扰能量进入雷达接收机,是压制干扰中采用最多的一种位方式。

当雷达采用固定频率工作方式时,受到窄带瞄准式干扰效果如图 2 所示。假设雷达每个重复周期发射信号频率均为 f_1 ,干扰机实施干扰初期需要测得雷达发射信号频率,对准频率实施干扰,窄带瞄准式干扰需侦察机实时提供干扰引导信息,在其他干扰条件满足的情况下,雷达显示画面持续受到干扰。

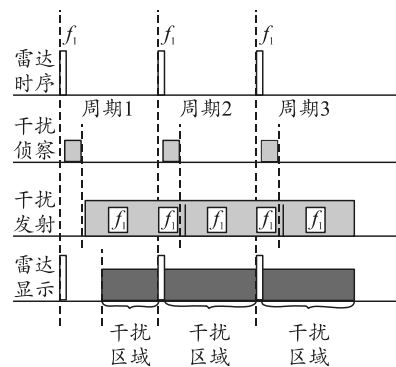


图 2 窄带瞄准干扰显示效果分析

当雷达采用频率捷变工作方式时，窄带瞄准式干扰效果如图 3—5 所示。雷达初始频率为 f_1 ，干扰机测到雷达工作频率，对准频率实施干扰。第二重复周期频率变为 f_7 ，侦察机实时侦测频率提供干扰引导信息，此时干扰发射信号频率仍为 f_1 ，干扰频率与雷达工作频率未对准，雷达未受到干扰，测得雷达频率后引导干扰机对准频率 f_7 实施干扰，对雷达干扰有效。第三重复周期频率变为 f_6 ，侦察机实时侦测频率提供干扰引导信息，此时干扰发射信号频率仍为 f_7 。由于窄带瞄准干扰存在一定干扰带宽，能够覆盖部分雷达频率，虽然干扰有效，但进入雷达接收机干扰信号能量有限，干扰变弱，侦察机侦测频率后对准 f_6 实施干扰，干扰有效。示意图指的

是在脉间频率捷变没有规避临近频点或是没有跳频间隔要求的情况。

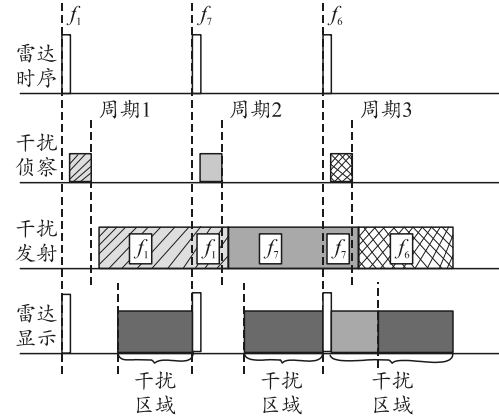


图 3 采用频率捷变抗干扰效果分析

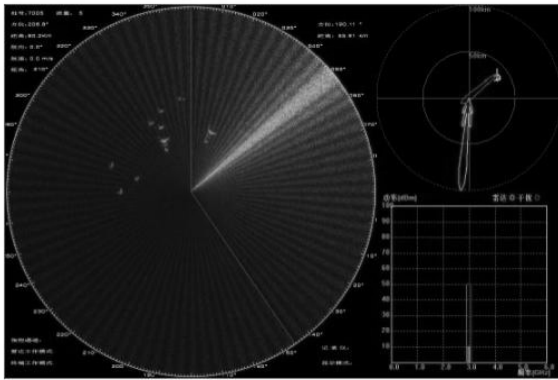


图 4 窄带瞄准式干扰效果

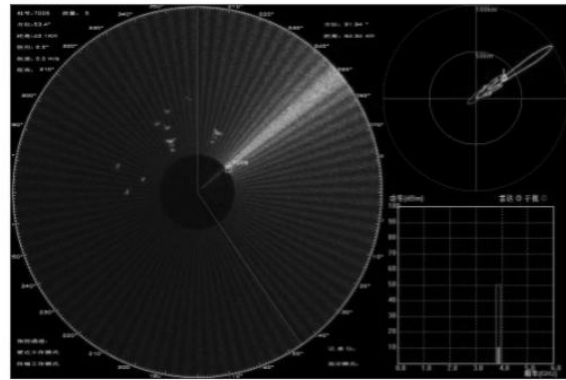


图 5 采取频率捷变抗干扰效果

4 结束语

笔者根据雷达仿真训练需求，设计了雷达抗干扰辅助训练软件。基于数据采集和数学建模功率调制的方法对目标、杂波、干扰信号进行仿真，实现目标回波、海杂波和干扰信号的逼真模拟，重点根据压制和欺骗干扰样式的产生机理，实现干扰信号的模拟，并实现空域抗干扰和频域抗干扰的图形显示。软件采用 VC 编程技术和 Direct3D 技术实现雷达界面和图像的实时逼真模拟，较好地解决了雷达仿真训练理论教学和装备操作之间衔接的问题。通过雷达操作手的多人次试用与完善可知，软件设计满足操作手抗干扰训练需求。操作手普遍反映该软件体现的干扰机与雷达相对位置、雷达工作频率变化、干扰机功率等对抗要素对熟知和掌握抗干扰机理具有较强的实际效用。

参考文献：

[1] 刘永辉, 林平. 嵌入式仿真技术及其军事应用研究[J]. 军事运筹与系统工程, 2010, 24(4): 29-34.

[2] 夏栋, 察豪, 秦华, 等. 基于实采数据的海杂波与气象杂波模拟[J]. 现代雷达, 2012, 34(5): 77-80.

[3] 丁鹭飞, 耿富录. 雷达原理[M]. 3 版. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2005: 125-138.

[4] MAHAFFZA B R. Radar system analysis and design using MATLAB[M]. 2nd ed. London: Chapman and Hall/CRC, 2005: 261-274.

[5] SKOLNIK M I. Radar handbook[M]. 2nd ed. New York: McGraw-Hall Companies, 1990: 20-35.

[6] 盛寰, 陶君, 宗竹林, 等. 一种地基雷达回波模拟器设计与 FPGA 实现[J]. 火控雷达技术, 2012, 41(1): 15-16.

[7] 樊世友, 朱元昌. 嵌入式仿真研究[J]. 计算机仿真, 2005, 22(12): 10-12.

[8] 樊世友, 朱元昌, 全厚德. C4I 系统嵌入式仿真研究[J]. 火力与指挥控制, 2006, 31(12): 68-70.

[9] 李如年, 王新鹏, 倪国旗. 雷达模拟器中地物回波的模拟实现[J]. 火力与指挥控制, 2008, 33(9): 119-121.

[10] 李丹, 刘晓光. 基于仿真的现代雷达抗干扰效能[J]. 指挥信息系统与技术, 2011, 2(6): 69-71.

[11] 南京电子技术研究所, 译. 雷达系统分析与建模[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012: 261-267.