

doi: 10.7690/bgzd.2015.08.023

全数字雷达仿真系统中恒虚警率建模方法探索

宁 伟, 杨泽山, 黄云洋

(北京蓝天航空科技有限责任公司研发中心, 北京 100085)

摘要: 由于雷达仿真系统设计时常存在参数设计未知和替代模型合理性验证的问题, 为解决此类仿真过程存在问题, 以恒虚警率 (constant false alarm rate, CFAR) 建模为例, 提出一种全数字雷达仿真系统中恒虚警率建模解决方法。将雷达模型中未知参数的推演及估算和复杂模型的替代模型结合, 进行参数分析及设计思路。通过模型边设计边验证的过程, 分析并确认设计模型是否能够达到已知的关键性能指标要求, 进而反向调整并确定设计的合理性。应用结果证明: 这种将模型建立和模型验证同步进行的设计方法, 应用于某型号反潜直升机飞行模拟器的全数字多普勒搜索雷达的仿真实现。经验证, 该设计方法能具较强实用性及合理性。

关键词: 仿真; CFAR; RCS

中图分类号: TP391.9 **文献标志码:** A

CFAR Modeling Method in Digital Radar Simulation System

Ning Wei, Yang Zeshan, Huang Yunyang

(Development Center, Beijing Bluesky Aviation Technology Co., Ltd, Beijing 100085, China)

Abstract: Because the problems of unknown parameter design and replacement model rationality test. For solving these problems in simulation process, taking constant false alarm rate (CFAR) modeling as example, put forwards CFAR modeling method in digital radar simulation system. Combine unknown parameter reasoning and evaluation of radar model with complex model replacement model, carry out parameter analysis and idea design. Through model designing and verifying, analyze and determine whether design model meets the key performance parameter requirements or not, then carry out negative setting and determine design rationality. The application results show that: the design method, which put the model designing and model verifying at the same time, can be used in digital Doppler searching radar simulation of certain type anti-submarine helicopter flight simulator. Through verification, it is proved that the design of radar simulation method has good practicability and rationality.

Keywords: simulation; CFAR; RCS

0 引言

现代战斗机中火控雷达的对空、对地进行目标攻击训练是当前部队作战训练的重点训练科目内容之一, 而实装训练成本高、效率低, 受空域和天气等环境因素的制约, 实施难度大, 借助雷达仿真器的模拟训练是当前形势下的迫切需求^[1]。

而雷达作为航电系统的核心设备, 在数字雷达仿真系统建模时存在 2 个问题: 1) 其设计资料被设计部门严格把控而无法获取, 对于这种仅有部分参数可知, 雷达部分实际性能特性和细节未知的情况下, 无法支撑雷达的信号级仿真及建模任务; 2) 对于雷达的环境输入模型, 例如, 干扰、目标及杂波等环境数据的客观模型建立都是国际上极具挑战性的课题。为完成雷达系统的仿真任务, 这些模型通常只能通过近似模型或统计特性建模。为解决上述未知参数设计和模型合理性验证问题, 笔者在此提出设计和验证并行的模型参数分析及设计的思想。

1 背景介绍

1.1 系统功能

雷达仿真系统以某反潜直升机的某型多普勒搜索雷达为模拟对象。它作为该反潜直升机飞行训练模拟器中的一个子系统, 要求能够完成目标回波信号接收及处理, 得到目标距离、方位, 并将目标及其距离、方位在综合显示器上显示。同时, 为反潜提供近海和远海搜索, 在战术显示器上显示空间态势及视频显示, 可对其中目标进行跟踪。

模型参数分析及设计是通过对全数字雷达仿真模型设计中的未知参数和选择的替代模型进行闭环反复实验, 不断调整参数达到期望输出为设计思想, 以此确认选择的未知参数和替代模型的适用性。该办法主要针对雷达系统这一特殊仿真任务进行。过程中对未知雷达参数的推演及估算和难以建模的替代模型进行验证, 经过验模后确定是否能够达到已

收稿日期: 2015-04-28; 修回日期: 2015-06-03

作者简介: 宁 伟(1980—), 女, 山东人, 硕士, 工程师, 从事多机型的航空电子设备仿真、航电分系统仿真及战术联网级系统交互建模及验模研究。

知的关键性能指标要求。将仿真任务立足于达到模型建立和模型验证同步进行。

1.2 数据交互

该全数字雷达仿真软件在反潜直升机飞行模拟器实现及验证过程如图 1。它独立运行于 1 台雷达仿真计算机中，通过 UDP 协议与模拟器主仿真计算机通信，系统的仿真交联关系如下：首先，用户可通过配置文件进行雷达属性参数设置和自动读取；其次，设备端(座舱操作通过硬件接口采集获取)接收工作模式切换和操作信息；然后，教员台对雷达进行故障设置；最后，通过模拟器主控计算机与飞行模拟器的运动、动力、CNI(导航、通信、敌我识别)、飞行控制、电源、燃油、液压、显示控制等系统仿真软件交联获取载机信息。同时，接收环境仿真分系统的目标、DEM、电磁等数据信息作为雷达仿真系统输入源。

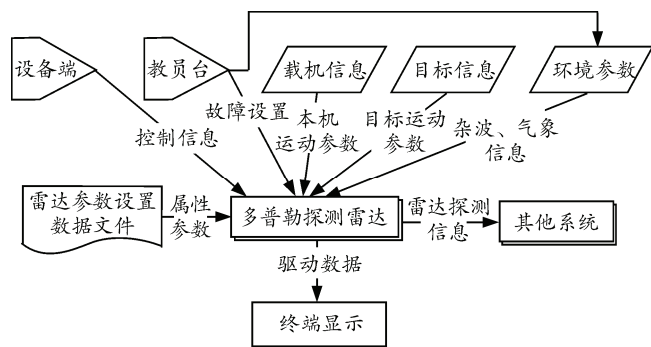


图 1 仿真雷达与飞行模拟训练系统中的交互关系

雷达仿真软件将会根据载机信息、目标信息、环境参数、控制信息，经过雷达系统的信号处理过程，计算得雷达有效探测信息，并通过数据驱动模块将这些探测信息显示在终端的战术显示器上。

2 恒虚警率处理器参数化设计方法

2.1 前提说明

一般雷达系统设计资料中自适应门限恒虚警率(CFAR)设计过程要求假设干扰的分布是既定已知的^[2]，而实际雷达仿真中 CFAR 处理的都是未知分布的干扰。这些未知干扰对于火控雷达或搜索雷达的影响对于建立恒虚警率处理器变得困难。同时，对于雷达方程中涉及的参数数据从设计资料中无法获取，在脉冲累积状态下，单个脉冲的 SNR 用 $(SNR)_1$ 表示，它的参考距离信息，依据雷达设计资料搭建了雷达的性能参数模型，对于部分性能选择的标准参考信息还需进行估算和设计，来达到吻合该雷达已知指标的性能参数。

2.2 理论基础

假设该雷达已知属性参数和已知性能指标参数分别如表 1、表 2 所示。

表 1 假设该雷达已知属性参数

属性参数	属性数据
雷达 PRF/Hz	850
天线波速宽度/(°)	3.1
天线扫描速率/(°/s)	72

表 2 假设该雷达已知性能指标参数

性能参数	指标数据
雷达单扫检测概率	0.5
单扫虚警率	10^{-6}

在此，CFAR 的设计过程，验证参数设计和模型合理性包含 2 个问题。

首先，雷达仿真模型中目标辨识算法是否合理的验证。在虚拟场景中包含飞机、舰船、导弹驱逐舰、商船及潜水艇等目标信息，建立这些目标的三维模型，并赋予运动特性。作为雷达目标探测的数据源，根据起伏特性建立该目标的雷达散射截面积(RCS)。目标的起伏特性会降低检测概率，采用一种普遍的近似的 RCS 预测方法，将雷达截面积的变化用随机过程来统计建模。在任何给定时刻，RCS 随机过程的数值定义了该时刻的一个随机变量。即具有不同自由度的统计特性 Swerling 模型，包含 Swerling I、Swerling II、Swerling III、Swerling IV 4 种类型^[2]。设计依据如下：

具有 $2N$ 个自由度的 χ^2 概率密度函数(pdf)^[3]可以写成：

$$f(\sigma) = \frac{N}{\Gamma(N)\sigma} \left(\frac{N\sigma}{\bar{\sigma}}\right)^{N-1} \exp\left(-\frac{N\sigma}{\bar{\sigma}}\right) \quad \sigma \geq 0 \quad (1)$$

其中： $\bar{\sigma}$ 为 RCS 的平均值， $\Gamma(N)$ 是变量为 N 的 γ 函数。 $\bar{\sigma}$ 需要根据本机雷达观察角范围及目标运动轨迹特征进行一个 4π 立体弧上平均值(数值平均值)的估计。 N 值越大，起伏越小，即起伏受更强的约束， $N \rightarrow \infty$ 的极限对应非起伏目标。

通过上述理论，希望在给定的检测概率、虚警概率和脉冲累积数下，对每种 Swerling 应用检测统计理论算出要求的每脉冲的 SNR，以此判断对起伏损失影响，来验证统计模型合理性。

其次，搜集设计资料中雷达在典型环境数据下的探测能力(如表 3)，并依据上述对特定目标建模出的合理 RCS 统计特性模型，为达到预定的探测概率，需要估算出对应多少的 SNR，才能达到对应的探测距离。在估算和验证过程中遵循资料中雷达探测性能指标及要求。设计依据如下：

当 n_p 个脉冲非相干积累时, 将给定的 P_{fa} 获得规定的 P_d 所要求的 SNR, 用 $(SNR)_{NCL}$ 标志, 单个脉冲的 SNR 用 $(SNR)_1$ 表示, 有如下式

$$(SNR)_{NCL} = (SNR)_1 \times I(n_p) \quad (2)$$

其中 $I(n_p)$ 为积累改善因子, 根据文献[3]查的改善因子的经验推导公式:

$$[I(n_p)]_{dB} = 6.79(1 + 0.235P_d)(1 + \frac{\log(1/P_{fa})}{46.6}) \log(n_p) \cdot (1 - 0.14 \log(n_p) + 0.01831(\log(n_p))^2) \quad (3)$$

公式 (3) 解决雷达在非相干积累作用下, 根据雷达信噪特性与积累脉冲数的变化趋势, 积累脉冲数的增加可以降低对雷达灵敏度的要求, 提高检测概率。指导后续参数调节。

表 3 该雷达典型环境数据下探测能力

目标反射截面积/m ²	海情	雷达探测距离/km
10	3	30
10	5	30
1 000	3	95
1 000	5	75
3 000	3	120
3 000	5	93

2.3 实现过程

1) 估算输入1。

在仿真过程中, 假设仿真对象要求获得满足已知单扫检测概率 $p_d = 0.5$, 在目标特性位置的情况下, 先建模不同运动特性目标将影响着 RCS 的建模要求。

模型设计输入如表 4。

表 4 验证起伏损失和脉冲累积时的输入说明

描述	状态	仿真数值
期望的检测概率	输入	0.5
虚警概率	输入	1e-6
积累脉冲数	输入	1:1:60
对于不同雷达的 Swerling 模型编号 1~4	输入	分别输入
起伏损失/dB	输出	—
选定 Swerling 类型下检测概率	输出	—

2) 估算输入2。

仿真雷达的探测能力如表 3。

假设对于检测 RCS 为 10 m² 的目标, 达到雷达单扫检测概率 $p_d = 0.5$ 性能指标时, 在此, 设该目标在第一帧距离雷达不模糊距离 $2R_0$ 处进入雷达的检测, 而在 $R=28$ km 时想保持给定的虚警值, 可依据式 (3) 推算检测累积改善因子(需要的 $I(n_p)=11$), 所以依据公式 (2) 有非相干积累下的不同检测距离下

需要改善的 SNR 解算结果为(转换为 dB 单位):

$$(SNR)_{\sigma=10} = I(n_p) \times 11.5 = 12 \quad (4)$$

由此需要开发基于保持表 1 期望虚警概率、对应工作模式下的单帧非相干累积脉冲数、期望实现该检测概率的距离、既定目标起伏类型上述几个输入, 来计算出对应的改善后的 SNR、检测概率、起伏损失和检测累积概率, 如图 2。

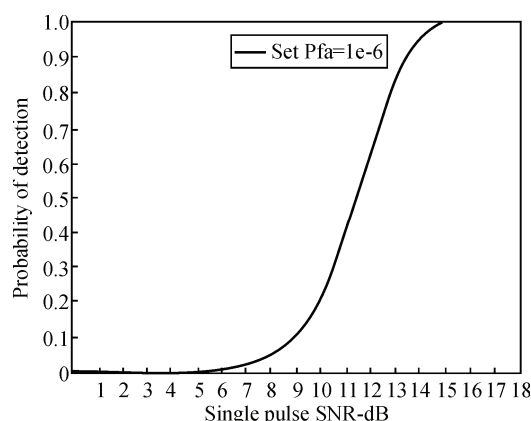


图 2 在指定恒虚警下雷达的 SNR 和探测概率关系

3) 估算步骤。

步骤 1: 键入期望的输入值作为初始化数据, 假设选择 Swerling IV 起伏模型, 使用

$$\frac{SNR}{(SNR)_{R_0}} = (\frac{R_0}{R})^4 \Rightarrow (SNR)_{dB} = 40 \log(\frac{R_0}{R}) \quad (5)$$

式中将表 3 中探测距离 R_0 其作为参考距离, 而 $2R_0$ 及雷达不模糊距离。对应 R_0 可计算对应任意探测位置 R 处的 SNR。

其中参考 SNR 的值设置为 11.5 dB; (该值设置依据图 2 单脉冲下 SNR 与检测概率关系曲线, 在单扫检测概率 0.5 及恒虚警率 10^{-6} 条件下映射该型雷达表 2 中的性能要求指标下)。

步骤 2: 根据步骤 1 中开发的模型, 计算 Swerling IV 起伏模型对应的 P_D 和由于起伏损失而需要增补的额外的 SNR。

步骤 3: 根据起伏类型计算每帧的检测概率 P_{D_i} , 设在第 i 帧的检测概率是 P_{D_i} 。

步骤 4: 最后根据下式

$$P_{c_n} = 1 - \prod_{i=1}^n P_{D_n} \quad (6)$$

完成检测累积概率的计算。

其中, 随着目标更接近雷达, SNR 值增大, 同时检测概率也随之增加。假设在第 n 帧的检测概率

是 P_{D_n} ，那么在第 n 帧至少检测目标一次的，累积检测概率为步骤 4 中的式 (6)，该意义在于可以通过雷达在某一已知距离上的检测概率和恒虚警率，获知 SNR 值后，通过推算其他探测距离下的 SNR 值，能获得雷达在距离上的检测概率。

2.4 设计验证

如图 3 为起伏损失随脉冲累积数变化关系图，图中给出了一系列脉冲累积数值和同样目标 RCS 运动特性下对起伏损失的影响。

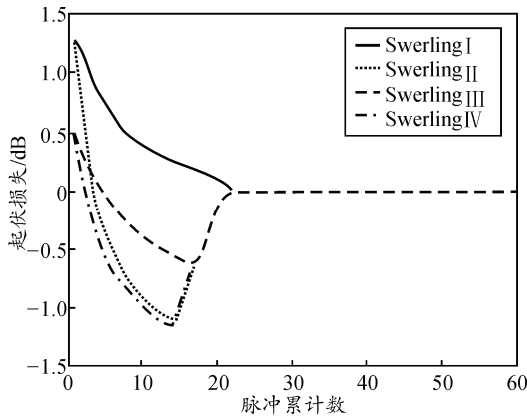


图 3 起伏损失随脉冲累积数变化关系

从仿真结果看到不同的 Swerling 统计模型在随脉冲累积数的变化过程中，起伏损失相对的变化趋势。在该仿真对象中，当累积脉冲数达到 23 后，目标的 RCS 运动特性对起伏损失基本没有影响，而笔者根据表 1 中该型雷达在对应搜索模式下属性参数及文献^[4-6]理论推导及模型验证，推得脉冲累积数都会超过该数值。即该型雷达的设计中，可简化动目标 RCS 建模过程，与固定目标一致。对于其他雷达，该方式同样可用于指导动目标 RCS 的建模，如图 4。

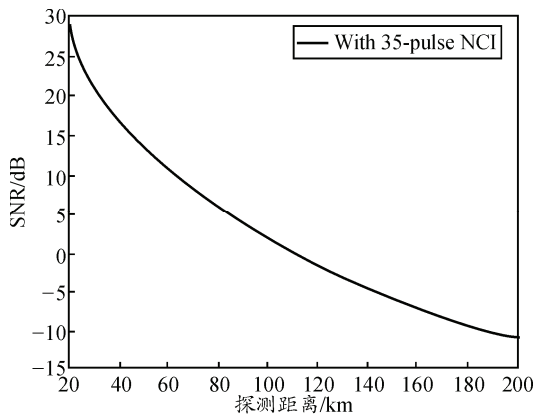


图 4 指定 RCS 下 SNR 和探测距离的关系

在单扫检测概率 $p_d = 0.5$ 指标的要求下，对起伏

损失作出增补后，可根据仿真结果对该仿真雷达要求的探测距离时对应的 SNR 进行估算。

3 应用说明

在项目实施过程，雷达仿真系统选择 VC++和 Matlab 混合编程实现。主要编程语言仍为 VC++。程序中对部分雷达信号处理依赖于 Matlab 的程序进行封装后，进行动态调用。主要原因是：Matlab 本身明显优势在于该软件功能强大，包含的信号处理工具箱和工具函数使得设计者对于雷达信号处理相关的程序设计工作降低。同时，其图形化输出处理过程方便模型的调试或验证。但是，作为多功能大型软件，编程效率高，但执行效率低，在处理大型数据时速度特性差，在测试过程中读取部分数字高程数据 (DEM) 都常出现内存耗尽的提示而无法完成处理。软件以 60 Hz 速率独立运行于雷达仿真计算机中，模拟器主仿真计算机运行周期 100 Hz。

4 结束语

笔者以恒虚警率处理器为建模目标，展开该模型的参数分析和设计的思路。在前提设计输入不足和统计模型合理性未知的情况下，通过将已知数据或分析参数作为设计输入，进行参数估算和推演的流程描述，推算雷达建模中需要的其他设计输入数据，闭环仿真验证的过程。通过这种思路能够继续推进并指导模型中其他的参数化分析和设计过程。对于不同型号仿真对象来说，获取上述输入水准的设计资料相对容易，同时该设计思路能够指导参数化模型分析和设计的任务、方法、流程都需要进行不断的探索和实验。该设计从依据给定指标性能雷达系统设计的角度去解决和处理型号仿真输入资料缺失的问题，对工程实践具有指导意义。

参考文献：

- [1] 王雪松, 肖顺平, 冯德军, 等. 现代雷达电子战系统建模与仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010: 18.
- [2] Merrill I. Skolnik. 雷达系统导论[M]. 3版. 北京: 电子工业出版社, 2006: 32-34.
- [3] Bassem R. Mahafza, Atef Z. Elsherbeni. 雷达系统设计 Matlab 仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009: 60.
- [4] 王玉仑. 机载火控雷达系统建模与仿真[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2007: 40-46.
- [5] 张弓. PD 雷达信号处理若干关键技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2002: 9.
- [6] 苏泽友, 王厚生, 李晓利. 面向对象的机载雷达探测及干扰仿真[J]. 计算机仿真, 2000, 17(3): 30-34.