

复杂雷达信号环境的建模与仿真

王 隼, 许海龙, 周水楼

(海军装备研究院, 北京 100161)

摘要: 复杂雷达信号环境的仿真研究对更好地评估雷达侦察系统的性能是十分必要的。阐述了复杂雷达信号环境仿真的关键技术: 单部雷达全脉冲数据的建模、单部全脉冲数据生成方法、多部雷达全脉冲数据融合和工作模式快速转换。为研制出高密度、高精度、复杂的雷达信号环境仿真系统提供了一种解决方案。

关键词: 雷达信号; 模型; 仿真

中图分类号: TN955.1

文献标识码: A

文章编号: CN 32-1413(2009)03-0060-05

Modeling and Simulation of The Complicated Radar Signal Environment

WANG Jun, XU Hai-long, ZHOU Shui-lou

(Naval Academy of Armament, Beijing 100161, China)

Abstract: It is very necessary to research into the simulation of complicated radar signal environment for evaluating the performance of radar reconnaissance system effectively. This paper expatiates the key technologies of complicated radar signal environment simulation; full pulse data modeling of single radar, full pulse data generating methods of single radar, multi-radar full pulse data fusion and fast conversion of operating modes, which provides a kind of solution for the high density, high accuracy and complicated radar signal environment simulation system.

Key words: radar signal; model; simulation

0 引言

电磁环境可以概括为作战双方在特定区域内, 由使用各种电磁能的电子系统构成的信号特性和信号密度的总和。电子战场在空间上从天空(如卫星)到地面(包括海面或海下), 形成了复杂的电磁环境。现代电子作战电磁环境的特点就是密集、复杂、交错和多变: 辐射源数量多, 信号密度大; 辐射源体制多, 波形复杂; 辐射源的工作频段增宽, 频段上重叠; 电磁频谱范围广, 几乎占据整个电磁频谱, 包括从极低频到微波、毫米波、红外、激光等波段; 电磁辐射信号传播在空域上交错, 电磁辐射行为在时域上集中, 电磁辐射信号载频在频域上的重叠, 电磁辐射强度在能量域上起伏。这就要求雷达侦察系统必须快速、不间断、高可靠地进行信号处理和识别。

以前雷达侦察系统的研制、试验和鉴定主要依靠外场试验方法, 即布设大量真实和模拟的电子信

息系统来构建所需的电磁信号环境。在现代越来越复杂的电磁环境下, 一方面不可能堆积如此多的实物设备形成与实战近似的电磁环境; 另一方面, 野外靶场试验周期长、试验费用高、受气候和环境等因素影响大。基于上述原因, 采用计算机仿真技术模拟产生用于雷达侦察设备处理算法研究和效能评估的复杂电磁信号环境是一种简便、灵活、高效、廉价的方法。通过合理的作战想定设置和精确度较高的数学模型计算, 动态产生出复杂、逼真、动态的雷达信号环境, 以便更好地评估雷达侦察系统的战术、技术指标, 改进和提高雷达信号分选识别能力。

1 复杂雷达信号环境仿真系统构成

在进行复杂雷达信号环境功能仿真时, 并不输出真实的射频和视频信号, 它是利用数学模型在计算机上进行计算, 产生用脉冲描述字描述的脉冲流。其特点是灵活、效费比高、试验结果处理实时性强,

能获得比较全面的数据, 其逼真度取决于数学模型建立的准确性和仿真系统设计的合理性。应用于复杂雷达信号环境仿真系统的模型应具有逼真性、先进性、科学性与客观性以及可扩展性等特点。仿真系统的体系结构如图 1 所示。

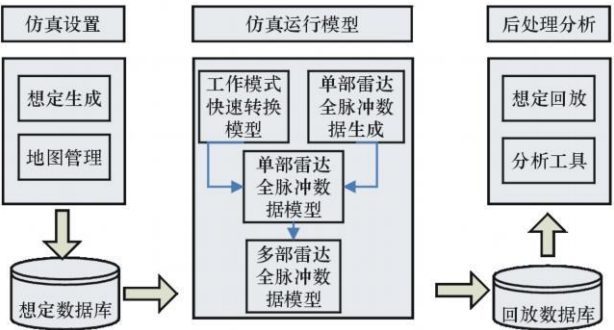


图 1 仿真系统构成

2 复杂雷达信号环境仿真关键模型

2.1 单部雷达全脉冲数据的模型

雷达信号环境是全体辐射信号的集合, 组成该集合的基本元素是某一时刻来自某一雷达的射频脉冲。目前采用的雷达脉冲描述特征参数主要有以下 5 项: 脉冲前沿的到达时间(TOA)、脉冲波前的到达角(DOA)、脉冲载频(RF)、脉冲宽度(PW)、脉冲幅

度(PA), 总称为脉冲描述字(PDW)。雷达侦察系统所面临的典型的雷达信号环境将是由许多雷达辐射的脉冲序列随机交迭而成的密集的脉冲流。雷达侦察设备在雷达信号环境所感知到的是随时间不断变化的电磁环境场景。决定复杂雷达信号环境仿真的主要因素有: 辐射源天线的扫描方式, 辐射源平台位置及运动特性, 辐射源与侦察系统的相对空间位置关系, 雷达发射波形设计, 雷达工作状态和工作模式的快速变化。

复杂雷达信号环境仿真不需要再现这些因素所决定的实际情景, 只需再现这些因素对电子侦察设备截获到的脉冲特性的影响, 比如脉冲的到达角、幅度、脉宽、载频和脉内调制等, 以形成电子侦察设备截获到的逼真的交错脉冲信息流。另外, 还应该考虑特殊体制雷达信号的产生, 如脉冲信号重复周期变化、频率捷变、脉冲抖动、脉冲跳变、参差脉冲列、边扫描边跟踪和脉内调制等。

2.1.1 RF 模型

现代新体制雷达的射频特征越来越复杂, 比较典型的有射频固定、线形调频、射频脉间捷变、射频脉组捷变、射频随机抖动、射频正弦抖动等。RF 计算模型如图 2 所示。

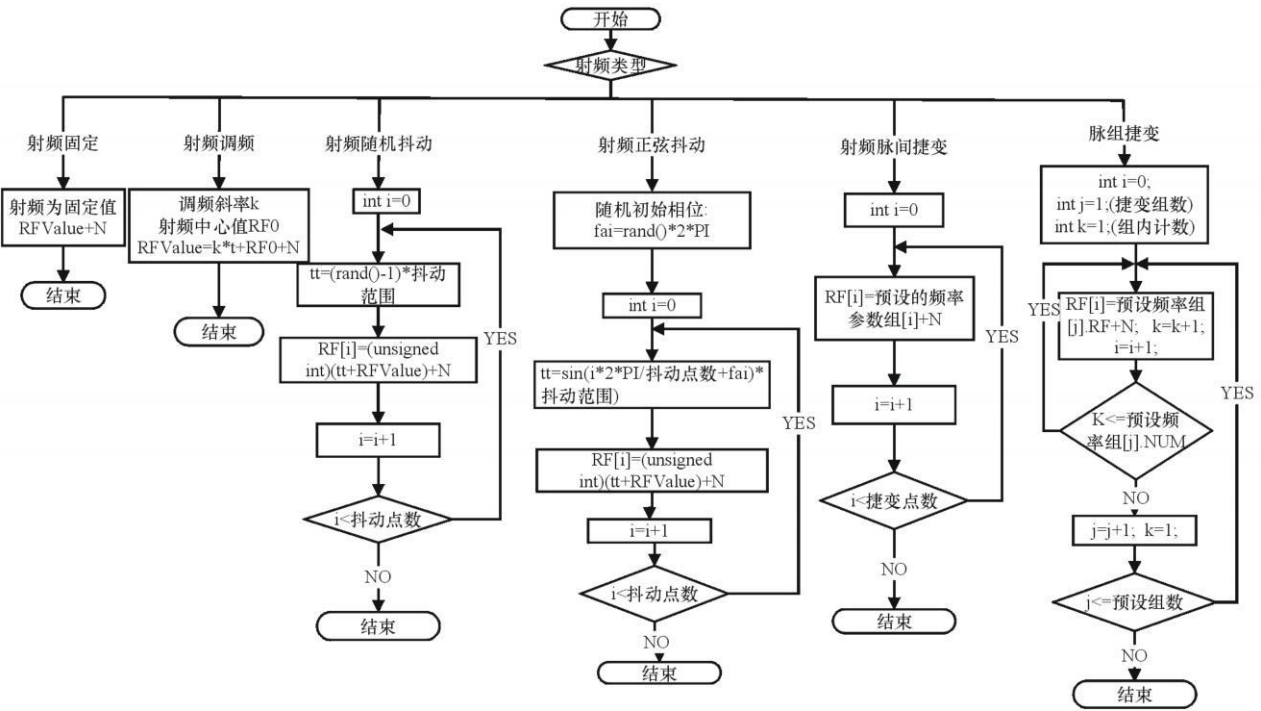


图 2 RF 计算流程图

2.1.2 TOA 模型

脉冲前沿到达时间主要和该脉冲发射时间及其传播时间有关,而脉冲发射时间与雷达的脉冲重复周期(PRI)有关,传播时间与传播距离及传播速度等因素有关。

(1) 脉冲发射时间

假设上个脉冲的发射时间为 $t(n-1)$, 则影响当前脉冲发射时间 $t(n)$ 的主要因素为雷达的当前脉冲重复周期 T 。现代新体制雷达的 PRI 特征非常复杂,比较典型的有重频固定、重频分组、重频随机抖动、重频正弦抖动、重频滑动、重频参差、重频捷变、重频编码。PRI 计算模型如图 3 所示。

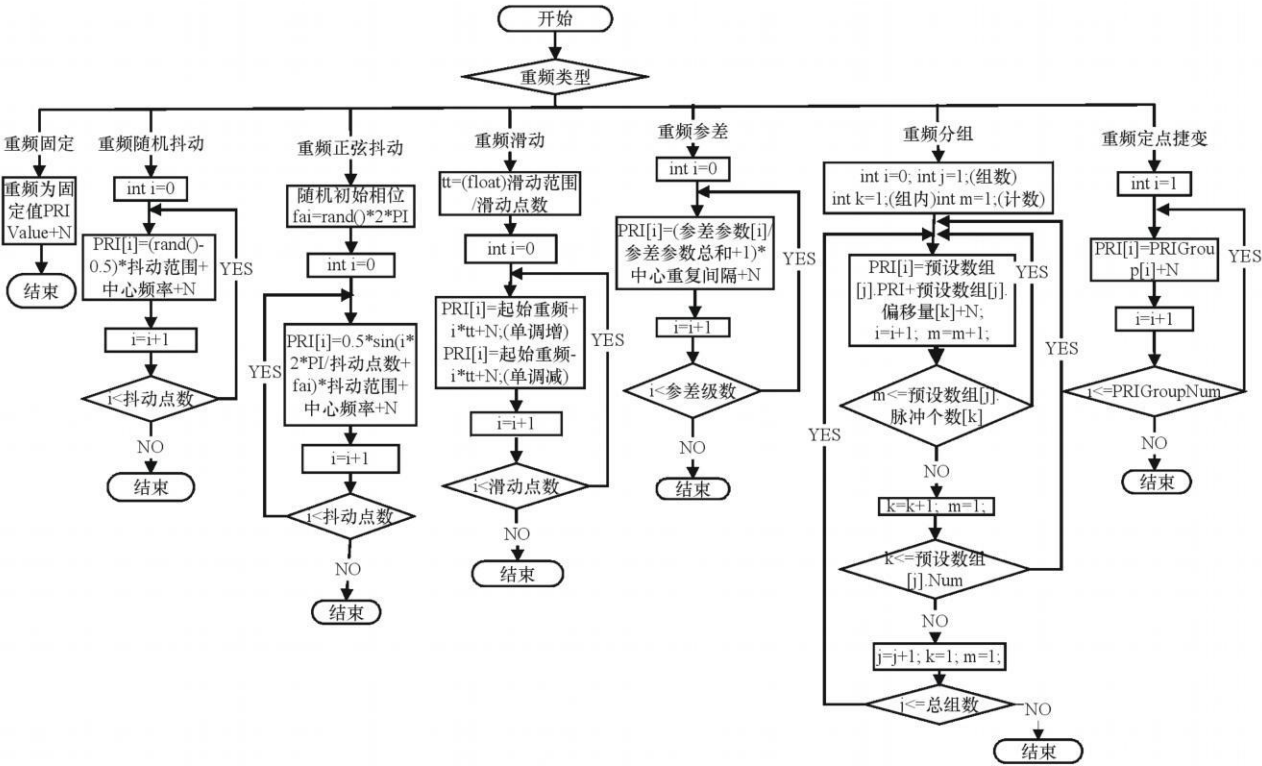


图 3 PRI 计算流程图

当得到当前脉冲重复周期 T 后,就可求得当前脉冲的发射时间 $t(n)$:

$$t(n) = t(n-1) + T \tag{1}$$

(2) 脉冲传播时间

传播时间就是雷达脉冲信号在传播环境中的路径时延,它与传播距离及传播速度有关。传播距离就是脉冲发射时刻雷达与侦察站之间的距离,它与雷达初始位置及运动特性有关。计算本时刻雷达的位置与侦察站之间的距离 R 。假设传播媒质为均匀介质,电磁波传播速度为 c ,若不考虑地形引起的多路径效应,则脉冲传播时间为:

$$\Delta t = R/c \tag{2}$$

(3) 脉冲到达时间 t_{TOA}

根据脉冲发射时间以及脉冲传播时间,就可求得脉冲前沿到达时间 t_{TOA} 为:

$$t_{TOA} = t(n) + \Delta t + N \tag{3}$$

式中, N 为计算产生的高斯噪声。

2.1.3 脉冲到达角模型

DOA 实际上就是雷达所发射的电磁波到达侦察机平台处的方位。由于电磁波是直线传播的,因此,DOA 也就是该脉冲发射时刻雷达平台相对侦察机平台的方位。

2.1.4 脉冲宽度模型

雷达的脉冲宽度类型主要有脉宽固定、脉宽可选择雷达等。

(1) 对于脉宽固定雷达,脉冲宽度模型为:

$$\tau_{PW} = (\tau_{PW})_0 + N.$$

(2) 对于脉宽可选择雷达,假设可选择脉宽数为 K 个,若当前工作脉宽为 $\tau_{PW}(i)$,该脉宽的连续工作脉冲数为 $Q(i)$, $i = 1, 2, \dots, K$,则脉宽模型为:

$$\tau_{PW} = \tau_{PW}(i) + N.$$

2.1.5 脉冲幅度及大气传输衰减模型

雷达信号脉冲幅度主要与雷达信号功率、信号传播距离以及雷达波束形状、天线扫描特性等因素

有关。

设雷达信号功率为 P_t , 天线增益为 G_t , 侦察机与雷达之间的距离为 R , 电波大气传播损耗为 L , 若脉冲幅度用到达侦察系统处信号功率密度的对数来表示, 并考虑大气传输衰减, 则有:

$$A_P = 10\lg \frac{P_t G_t F(\theta) e^{-\alpha R}}{4\pi R^2 L} \tag{4}$$

式中: $F(\theta)$ 为归一化的天线方向图函数。

对处于跟踪状态下的雷达, $F(\theta)=1$; 而对处于搜索状态下的雷达, $F(\theta)$ 受雷达波束形状和扫描方式的影响。典型的天线扫描类型有圆周扫描、扇形扫描。天线方向图有余弦函数近似方向图、高斯函数近似方向图、辛克函数近似方向图、矩形方向图。计算脉幅时, 天线方向图采用单向函数。

(1) 余弦函数的有输出的角度范围是 $[-0.98\theta_{0.5}, 0.98\theta_{0.5}]$, 余弦函数近似方向图的数学表达式为:

$$F(\theta) = \cos\left(\frac{\pi\theta}{2\theta_{0.5}}\right) \tag{5}$$

式中: $\theta_{0.5}$ 为雷达主瓣 3 dB 波束宽度。

(2) 高斯函数的有输出角度范围是 $[-1.6\theta_{0.5}, 1.6\theta_{0.5}]$, 高斯函数近似方向图的数学表达式为:

$$F(\theta) = \exp\left[1.4\left(\frac{\theta}{\theta_{0.5}}\right)^2\right] \tag{6}$$

(3) 辛克函数的有输出角度范围是 $[-6\times 2.5\theta_{0.5}, 6\times 2.5\theta_{0.5}]$, 辛克函数近似方向图的数学表达式为:

$$F(\theta) = \left| \frac{\sin\left(\frac{2\pi\theta}{2.5\theta_{0.5}}\right)}{\frac{2\pi\theta}{2.5\theta_{0.5}}} \right| \tag{7}$$

(4) 矩形方向图的数学表达式为:

$$F(\theta) = 1 \tag{8}$$

脉冲幅度计算模型如图 4 所示。

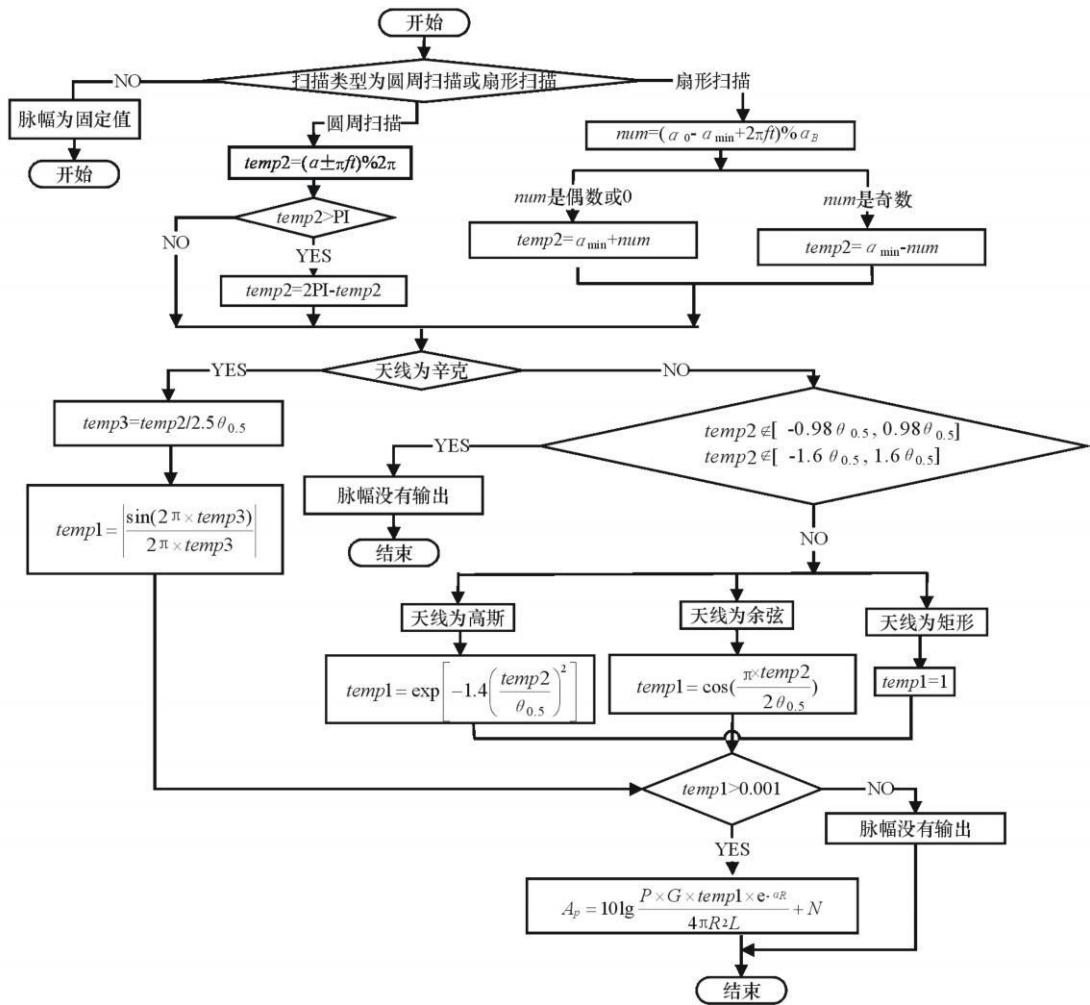


图 4 PA 计算流程

图 4 中: α_0 为天线扫描初始角; $\alpha_B = \alpha_{\max} - \alpha_{\min}$; f 为天线扫描频率; P 为雷达信号功率; G 为天线增益; R 为雷达与侦察机间距离; L 为电波大气传播损耗, $L = 5 \text{ dB}$; α 为衰减系数, 根据 RF 值查表得出。

2.2 单部雷达全脉冲数据生成方法

雷达脉冲信号进入侦察接收机的必要条件是:

- (1) 接收机必须在频率上、方向上对准雷达;
- (2) 雷达信号强度要足够大, 也就是雷达信号强度要大于接收机灵敏度;
- (3) 两者的工作时间要有一定的重合。

当上述条件满足后, 雷达脉冲信号才有可能被接收机有效接收, 这时的雷达射频脉冲才是有效的全脉冲数据。根据单部雷达脉冲描述字(PDW)计算模型, 就可以得到每个射频脉冲的 PDW。根据 PDW, 就可以产生出雷达全脉冲数据。

单部雷达全脉冲数据产生的主要依据是作战想定中设定的雷达平台工作参数、雷达平台运动参数、雷达的工作参数、雷达的工作模式变换参数和雷达的运动参数。具体产生步骤如下:

- (1) 读取作战想定中的平台数据和雷达数据。
- (2) 按照想定顺序产生雷达每一工作状态下的脉冲数据。脉冲参数计算包括: 脉冲到达方位、脉冲到达时间、脉幅、载频以及脉宽的计算。
- (3) 将产生的脉冲数据, 写入内存数据库。
- (4) 判断该想定的雷达工作时间是否已到, 若未到, 则转到(2), 以产生下一个脉冲数据; 若时间到, 则结束。

2.3 多部雷达全脉冲数据融合模型

假定雷达与雷达之间的脉冲发射是独立过程, 侦察系统接收机是按时间顺序接收脉冲而不管是哪部雷达发射的。因此, 复杂雷达信号环境仿真时, 只需将单部雷达的 PDW 数据按照多部雷达 PDW 数据融合算法计算, 就可生成由多部雷达同时发射后交织在一起的脉冲信号。由于电磁环境的密集和复杂, 同一时间可能有多个信号出现, 表现在 PDW 上就是将有多个 t_{TOA} 相同或相近的脉冲出现, 由于接收机恢复时间的限制, 接收机在有多个同时到达脉冲存在时会发生脉冲丢失。简化的解决方法是将相邻的 t_{TOA} 进行比较, 若 $t_{TOA i+1} \leq t_{TOA i} + t_c$ (t_c 为接收机恢复时间, 默认值为 $2 \mu s$), 即相邻脉冲到达时间相差足够小, 则认为其在时间上是重叠的, 将 $t_{TOA i+1}$ 这个脉冲去掉, $t_{TOA i}$ 脉冲的参数为所有该时刻到达脉冲中脉宽最大的那个脉冲的参数。

2.4 工作模式快速转换模型

目前的多功能雷达普遍具有多个工作模式, 每个工作模式又包含有多个信号样式的快速变化, 在某个信号样式的驻留时间可以小到几十毫秒。不仅信号参数发生变化, 而且频域、时域参数同时掺杂着多模式的变化。针对这种新型的综合体制雷达, 在数据库设计时也要突破传统的格式, 在雷达数据表中增加工作状态编号字段, 并以此为主键增加 8 个子表, 通过子表来存储工作状态和工作模式的快速变化数据。数据库各表关系图见图 5。

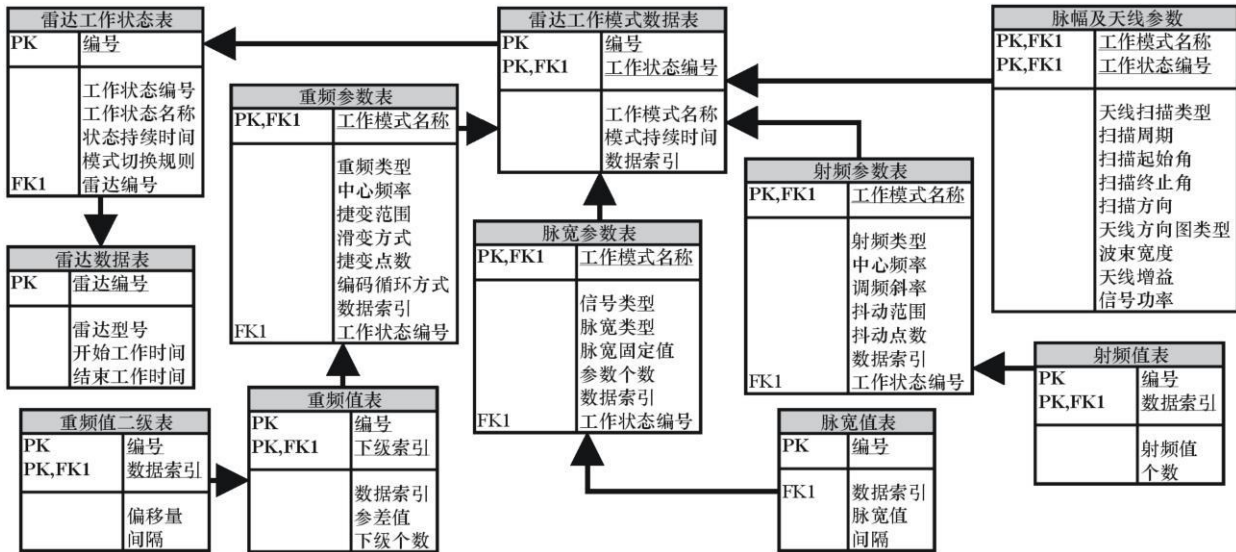


图 5 数据库关系设计

(下转第 89 页)

根据权重的计算方法 $W_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{a_{ij}}{\sum_{k=1}^n a_{kj}}$, 得到权重 $A_{11} = (0.112\ 8, 0.116\ 1, 0.225\ 2, 0.337\ 6, 0.208\ 3)$, 最大特征值 $\lambda = 5.138\ 4$ 。利用一致性指标检验此矩阵的合理性, $C_l = (\lambda - n) / (n - 1)$, 得 $C_l = 0.034\ 6$, 通过计算 $R_l = 0.92$, 一致性指数为 $C_r = C_l / R_l = 0.037\ 6 < 0.1$, 可认为判断矩阵具有满意的一致性。同理, 可得到其他指标的权重分配。

(3) 一级评判。
以 U_{11} 、 U_{12} 、 U_{13} 为例, 评判模型中的模糊变换中合成算子“ \circ ”采用主因素突出型的 $M(\circ, +)$ 合成算子。则可得:

$$B_{11} = A_{11} \circ R_{11} = (0.562\ 5, 0.160\ 6, 0.108\ 1, 0.094\ 4, 0.074\ 5)$$
$$B_{12} = A_{12} \circ R_{12} = (0.513\ 3, 0.174\ 7, 0.149\ 7, 0.067\ 4, 0.052\ 5)$$

$$B_{13} = A_{13} \circ R_{13} = (0.623\ 3, 0.178\ 9, 0.105\ 7, 0.059\ 8, 0.032\ 5)$$

(4) 二级评判。

根据 $U_1 = \{U_{11}, U_{12}, U_{13}\}$, 可得二级模糊关系矩阵 R_1 , 根据 $U_1 = \{U_{11}, U_{12}, U_{13}\}$ 的因素的权重分配为 $A_1 = (0.402\ 5, 0.281\ 5, 0.316\ 0)$, 可得 B_1 , 同理可知 B_2 和 B_3 。

$$B_1 = A_1 \circ R_1 = (0.567\ 9, 0.170\ 4, 0.119\ 1, 0.075\ 9, 0.055\ 0)$$
$$B_2 = A_2 \circ R_2 = (0.533\ 4, 0.186\ 8, 0.132\ 1, 0.099\ 8, 0.065\ 0)$$
$$B_3 = A_3 \circ R_3 = (0.588\ 7, 0.192\ 1, 0.120\ 7, 0.065\ 9, 0.037\ 8)$$

(5) 三级评判。
由 $U = \{U_1, U_2, U_3\}$, 可得三级模糊关系矩阵

R , 根据 $U = \{U_1, U_2, U_3\}$ 的因素的权重分配为 $A = (0.372\ 5, 0.286\ 1, 0.341\ 4)$, 可得 $B = A \circ R = (0.565\ 1, 0.182\ 5, 0.123\ 4, 0.079\ 3, 0.052\ 0)$ 。其中 b_j ($j = 1, 2, 3, 4, 5$) 表示了复杂电磁环境下炮兵指挥信息系统效能评估为“极好、较好、好、一般、差”各占的百分比。为了更好地进行等级评判, 将评判等级与分数相对应, 如效能评估为“极好”的分数为 90, “较好”的为 80, “好”的为 70, “一般”和“差”的分别为 60 和 50, 则总评分由公式 $D = \sum_{j=1}^m \frac{b_j}{\sum_{j=1}^m b_j} C_j$, 得总

评分 $D = 81.288\ 8$, 因此, 本例炮兵指挥信息系统效能判定等级为较好。

4 结束语

采用模糊综合评价方法进行系统效能评估可以解决评价中的非精确性问题。评价结果采用模糊概念, 即可以从总体的角度得出评价的结果, 又可以从复杂电磁环境对炮兵指挥信息系统效能影响的各个因素的角度逐一分析其影响的程度。该评估方法对复杂电磁环境下炮兵指挥信息系统的效能评估具有一定的参考价值。

参考文献

[1] 任富兴, 刘树海. 指挥信息系统[M]. 北京: 解放军出版社, 2008.

[2] 王雪琴. 兵种数理战术学[M]. 合肥: 解放军炮兵学院, 2001.

[3] 陈之宁. 模糊数学及其军事应用[M]. 北京: 海潮出版社, 2003.

[4] 王汝群. 战场电磁环境[M]. 北京: 解放军出版社, 2006.

(上接第 64 页)

3 结束语

本文通过对单部雷达全脉冲数据的建模、单部全脉冲数据生成方法、多部雷达全脉冲数据融合模型和工作模式快速转换模型等几个关键技术进行的详细阐述, 为研制复杂雷达信号环境仿真系统提供了一种可行的解决方案。采用上述模型可以计算产生出具有工作模式快速变换、信号形式复杂多变、参

数相关捷变等特点的雷达信号, 更真实地反映了现代电磁环境密集、复杂、交错和多变的特点。

参考文献

[1] 王国玉, 汪连栋. 雷达电子战系统数学仿真与评估[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.

[2] 林春应. 电子对抗侦察情报分析(上册)[M]. 合肥: 电子工程学院, 2002.

[3] David L. Adamy. 电子战建模与仿真导论[M]. 吴汉平译. 北京: 电子工业出版社, 2004.