

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2012.10.012

不确定信息下雷达系统效能评估方法

杨啸天^{1,2}, 冯金富², 钟麟², 冯媛³

(1. 中国人民解放军驻七六九厂军事代表室, 陕西 宝鸡 721006; 2. 空军工程大学工程学院, 西安 710038;
3. 空军工程大学科研部, 西安 710051)

摘要: 为了对雷达系统进行正确的效能评估, 提出一种将偏好规划引入到雷达系统效能评估中的方法。该方法引入偏好规划理论, 采用多层值树进行建模, 将 RICH 法的应用范围拓展到多层值树的求解中, 提出了基于多层值树的权重算法, 并对雷达系统效能评估进行仿真示例验证。仿真结果证明, 该方法有效, 可在不确定信息条件下对雷达的效能优劣进行排序。

关键词: 效能评估; 不确定信息; 偏好规划; 多层值树

中图分类号: TJ03 **文献标志码:** A

Performance Evaluation Method for Radar System Under Uncertainty Information

Yang Xiaotian^{1,2}, Feng Jinfu², Zhong Lin², Feng Yuan³

(1. PLA Military Representative Office in No. 769 Factory, Baoji 721006, China;
2. School of Engineering, Air Force Engineering University of PLA, Xi'an 710038, China;
3. Dept. of Scientific & Research, Air Force Engineering University of PLA, Xi'an 710051, China)

Abstract: In order to correct evaluation of radar system performance, the preference programming is introduced to the radar system performance evaluation. The multi-level value tree model is used to establish model, and the algorithm of RICH is extended to the solution of the multi-level value tree. The weight algorithm based on multi-level value tree is presented. Finally, the method is verified with a simulation example for synthetic performance evaluation of radars with uncertain information. The simulation results show that the method is effective, the radar performance under uncertain information can be ranked by it.

Key words: performance evaluation; uncertain information; preference programming; multi-level value tree

0 引言

在现代国土防空系统中, 雷达起着至关重要的作用。在战时它是国土防空系统的首要屏障, 在和平时期又可为民航交通管制提供信息。因此雷达的研制与发展受到普遍关注。随着高新技术的发展, 雷达的研制费用也急剧增加, 在我国现有的经费条件下, 如何使新型号雷达的研制推广与现有型号雷达生产及技术改造得到科学的权衡, 不仅涉及经济利益, 还影响到国家的安全和战略决策。正确的决策建立在对雷达系统效能的正确评估上, 文献[1]提出了基于层次分析法和灰色理论的预警雷达效能评估模型; 文献[2]提出了基于模糊层次分析法的空管雷达运行性能的评判模型。这些评估模型存在的问题是: 1) 经常无法得到精确权重值, 或者权重的析出代价太大; 2) 不适用于属性指标不确定的情况。

偏好规划(preference programming)是由 Arbel 于 1989 年首先提出的, 以多属性价值树理论为基础, 适合解决多目标决策(multi-criteria decision

making, MCDM)问题。而 RICH(rank inclusion in criteria hierarchies)法不但允许属性子集与属性排名子集对应起来, 而且允许各属性指标用区间形式描述, 这就拓展了多属性决策模型的使用范围。笔者把偏好规划引入到雷达系统效能评估中, 对不确定信息下雷达系统效能进行评估。

1 雷达系统效能评估模型

从多属性评估的角度来说, 影响雷达系统效能的因素就是效能评估所要考虑的属性。不同的效能评估目的和方法所考虑的属性是不同的, 笔者以研制设计新型雷达为目的, 从效能定义的本质(在规定的条件下达到规定使用目标的能力^[3])出发, 并参考了文献[4-5]的效能评价指标, 提出综合效能属性集 A , 它可以表示为:

$$A = \{C, D, B\} \tag{1}$$

其中 C 表示探测能力、 D 表示可靠性和 B 表示生存能力。而探测能力包括探测距离 C_A 、数据率 C_B 、

收稿日期: 2012-05-26; 修回日期: 2012-06-26

基金项目: 国家 863 项目(2010AA8090514C)

作者简介: 杨啸天(1978—), 男, 甘肃人, 博士, 从事信息融合、传感器管理研究。

探测精度 C_C 、分辨率 C_D , 可靠性包括基本可靠性 D_A 和任务可靠性 D_B , 生存能力包括抗摧毁能力 B_A 和抗干扰能力 B_B 与抗侦察能力 B_C , 则综合效能属性集 A 也可以表示为

$$A = \{C_A, C_B, C_C, C_D, D_A, D_B, B_A, B_B, B_C\} \quad (2)$$

属性集 A 的 7 个属性的值分别为 C_A 、 C_B 、 C_C 、 C_D 、 D_A 、 D_B 、 B_A 详细情况见文献[5-6], 这里只给出计算公式:

$$C_A = \left[\frac{P_t G_t \sigma A_r}{(4\pi)^2 L S_{\min}} \right]^{1/4} \quad (3)$$

$$C_B = 1/T = \Omega/360^\circ \quad (4)$$

$$C_C = \frac{1}{\delta R (R_0^2 \delta \theta_\beta \delta \theta_\epsilon) \delta f_d} \quad (5)$$

$$C_D = \frac{T_d}{(c\tau/2) R_0^2 \theta_\beta \theta_\epsilon} \quad (6)$$

$$D_A = \text{MTBF} = T_s / n_s \quad (7)$$

$$D_B = \text{MTBCF} = T_r / n_z \quad (8)$$

$$B_A = (P_t T_0 B_s G) S_i S_a S_n S_j S_c S_p S_m \quad (9)$$

其中: P_t 为雷达发射机的峰值功率; G_t 为雷达发射天线的增益; σ 为目标的有效反射面积; A_r 为雷达接收天线有效面积; L 为损耗因子。 T 、 Ω 分别为监视间隔时间、天线转速。 δR 、 $\delta \theta_\beta$ 、 $\delta \theta_\epsilon$ 、 δf_d 分别为雷达距离、方位角、仰角和频率测量误差, R_0 为参考距离; τ 、 T_d 分别为雷达脉冲宽度和波束在目标方向上的驻留时间; MTBF 、 T_s 、 n_s 分别为平均故障间隔时间、寿命单位总数、故障时间; MTBCF 、 T_r 、 n_z 分别为致命故障间隔的任务时间、任务时间、致命故障总数; $P_t T_0 B_s G$ 为雷达基本抗干扰能力; S_i 为反侦察因子; S_a 为天线副瓣因子; S_n 为 Dicke-fix 电路质量因子; S_j 为重频跳变因子; S_c 为 CFAR 质量因子; S_p 为天线变极化质量因子; S_m 为 MTI 质量因子。抗毁伤能力和抗侦察能力不是文中重点, 故不作叙述。

2 多层值树

当决策者处理属性数目较大, 且一些属性具有

相似性的问题时, 常用多层值树进行建模。若树的构建是从“底部到顶部”, 则可以把属性分解成多个子集, 每个子集中的元素为相同的标准指标^[7]。树可以从最顶层的标准开始构造。例如, 可靠性由基本可靠性和任务可靠性组成。因此, 可靠性属性在它下面直接有 2 个属性。枝层的属性表示为 $A = \{a_1, \dots, a_n\}$, 其它的属性是枝层的属性的并集。这些属性表示为 $\{a_{n+1}, \dots, a_p\} \cup \{a_0\}$, 这里 a_0 为“总目标”。对于总目标, 有 $a_0 = A$ 。既然模型是分层的, 则条件

$$a_i \cap a_j \neq \emptyset \Rightarrow a_i \subset a_j \vee a_j \subset a_i$$

必须满足。枝层的属性集合可以表示为 T , 数学描述为

$$T = \{a_i \mid |a_i| = 1\} \quad (10)$$

a_0 的级别为 $L(a_0) = 0$, 其它属性的级别可以通过递推得到, 则 a_i 的级别为:

$$L(a_i) = \max_{a_j} \{L(a_j) + 1 \mid a_i \subset a_j\}$$

树的级别为属性的最大级别, 即 $L(T) = \max_{a_i \in T} L(a_i)$ 。基于多层值树的雷达综合效能评估模型 ($L(T) = 2$) 见图 1。枝层属性集合为 $T = \{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8, a_9\}$, a_{10} 、 a_{11} 和 a_{12} 的级别为 1, 只有一个属性 a_0 则级别为 0。在这模型中, $a_{10} = \{a_1, a_2, a_3, a_4\}$, $a_{11} = \{a_5, a_6\}$, $a_{12} = \{a_7, a_8, a_9\}$ 。则所有的分支层属性在级别 2 上。

分层值树的权重与非分层值树有所不同。在分层模型中, 具有相同上一层属性的属性通过权重的大小来说明属性的重要程度。定义:

$$A^k = \{a_i \mid L(a_i) = k \vee (a_i \in T \wedge L(a_i) < k)\} \quad (11)$$

表示第 k 层的属性集合, 而属性 a_i 在第 k 层的权重为 $w_i(k): \mathbb{N} \rightarrow [0, 1]$ 。因此, 对于每一 $k = 1, \dots, L(T)$ 有 $\sum_{a_i \in A^k} w_i(k) = 1$ 。对于满足 $L(a_j) + 1 = L(a_i)$ 和 $a_i \subset a_j$ 的属性 $\{a_i\}$, 它在属性 a_j 下的权重可以表示为 w_i^j , 则

$$\sum_{a_i \subset a_j} w_i^j = 1, \text{ when } L(a_j) + 1 = L(a_i)$$

在图 1 中, $w_{10}(1) + w_{11}(1) + w_{12}(1) = 1$ 和 $w_1(2) +$

$w_2(2) + \dots + w_9(2) = 1$, 而且 $w_1^{10} + w_2^{10} + w_3^{10} + w_4^{10} = w_5^{11} + w_6^{11} = w_7^{12} + w_8^{12} + w_9^{12} = 1$ 。属性 $a_i \in A^k$ 的权重可以表示为:

$$w_i(k) = \begin{cases} w_i(k-1), & \text{if } L(a_i) < k \\ w_j(k-1)w_i^j, & \text{if } L(a_j) = k-1, L(a_i) = k, a_i \subset a_j \end{cases} \quad (12)$$

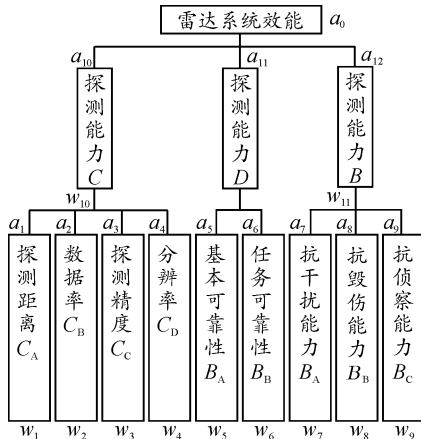


图 1 基于多分层值树的雷达综合效能评估模型

3 RICH 法在多层值树的应用

拓展 RICH 法的应用范围, 将其应用到多层值树建模过程中, 允许决策者在每一子树中提出与普通 RICH 法相似的描述。但是, 仅允许决策者在每一子树属性中进行相互比较。采用多层值树对其进行建模, 具体见图 1。

定义 1 考虑两层 ($L(T) = 2$) 值树, 它具有 k 个级别为 1 的属性, 每一属性又有 $m_i (i = 1, \dots, k)$ 个分枝属性。为了表示方便, 排名设定如下, 对于 $\forall a_b, a_c \subset a_i$, 每当 $b < c$ 和 $L(a_i) + 1 = L(a_b) = L(a_c)$, 有排名满足 $r(a_b) < r(a_c)$, 则相应的权重可行区域可以表示为 $S(m_1, \dots, m_k)$ 。

对于 $L(T) = 2$ 的值树, 定义 1 可以用于表示 RICH 法中任意偏好描述。求解可行区域的极值点很容易, 一种常用、有效的方法是采用线性规划。

根据多层值树的特点, 对 RICH 法进行了改进, 具体步骤如下:

1) 由文献 [8] 产生第一层属性 $\{a_j\} (j = n+1, \dots, n+k)$ 和第二层属性 $\{a_i^j\} (i = 1, \dots, n)$ 权重的极值点, 并用矩阵 $X_1, X_{1,1}, X_{1,2}, \dots, X_{1,k}$ 表示。定义 $X = \emptyset$ 和 $j = 1$;

2) 如果 $j > k$, 跳转到步骤 6)。退出。否则设置 $i_s = 1 (s = 1, \dots, k)$;

3) 令 $X_i^j (i = 1, \dots, k)$ 为一对角矩阵, 对角线上的元素 $x_i^j = X_1(j, i)$, 维数为 $m_i \times m_i$ 。定义一个对角矩阵 X^j , 它由矩阵 X_i^j 构成。 X^j 最顶层的元素为 X_1^j , 底层的元素为 X_k^j 。因此, X^j 的维数为 $n \times n$;

4) 计算权重向量 $W = [X_{1,1}(i_1), X_{1,2}(i_2), \dots, X_{1,k}(i_k)] X^j$ 和 $X = X \cup \{W\}$;

5) 如果对于任一 $b \leq j$ 有 $i_b = m_b$, 则令 $j \leftarrow j + 1$, 跳转到步骤 2)。否则, 对于 $i_b \neq m_b$ 选择最大的 $b \leq j$, 令 $i_b \leftarrow i_b + 1$ 。此外, 对于每一 $a > b$, 令 $i_a = 1$, 跳转到步骤 4);

6) 根据式 (12), 计算第二层属性权重 $\{a_i^j\}$ 的极值点;

7) 数据的无量纲化;

8) 计算极值点的总指标;

9) 备选方案中两两占优性检验;

10) 依据乐观、悲观、中间值和最小损失准则进行评估。

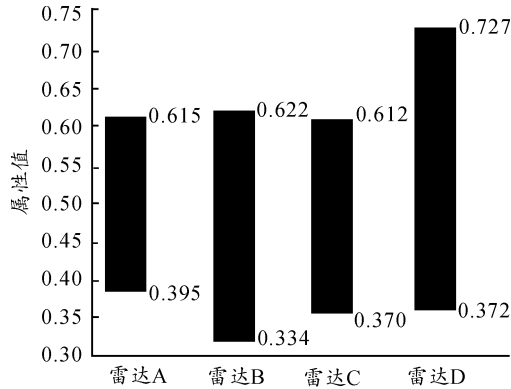
RICH 法步骤的具体计算详见文献[8], 区间估计的四则运算以及各种决策准则应用详见文献[9]。

4 实例仿真

笔者以同一体制的四部远程监视雷达为例^[6], 运用上述提出的方法进行效能评估, 选择出综合效能最高的雷达。在枝属性中, 只有测量精度和分辨率为成本型, 其余的为效益型, 属性值见表 1, 不确定性用区间形式表示, 权重的下界 b 取 $1/27$ 。假设评估者认为在第一层属性中, 最重要是探测能力, 其次是可靠性。在探测能力中, 最重要的是探测距离, 其次是数据率; 在可靠性中, 最重要的是基本可靠性; 在生存能力中, 最重要的是抗干扰能力, 其次是抗毁伤能力。仿真结果见图 2、3 和表 2、3。对于雷达系统综合效能, 各备选方案中无全占优方案, 除了悲观准则认为雷达 A 效能最优外, 其余法则选择雷达 D 为最优。对于探测能力, 除了悲观准则认为雷达 C 探测能力最优外, 其余法则下雷达 D 为最优。决策者可根据具体态度选择不同准则下的评估结果。

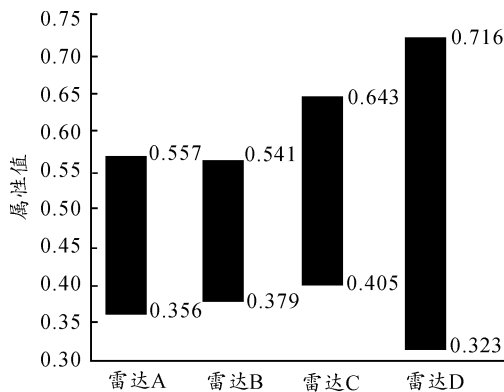
表 1 各部雷达的属性值

雷达	探测距离/km	数据率/(1/s)	测量精度	分辨率	基本可靠性/h
Radar A	[280, 300]	1/7	[0.66,0.75]	[0.24,0.32]	275
Radar B	[290, 310]	1/8	[0.72,0.81]	[0.31,0.39]	285
Radar C	[295, 320]	1/6	[0.87,0.96]	[0.43,0.51]	265
Radar D	[305, 325]	1/8	[0.89,0.98]	[0.49,0.57]	280
雷达	任务可靠性/h	抗干扰能力	抗毁伤能力	抗侦察能力	
Radar A	[330, 335]	[0.56, 0.6]	[0.7, 0.8]	[0.5, 0.6]	
Radar B	[320, 325]	[0.62,0.69]	[0.4, 0.5]	[0.5, 0.6]	
Radar C	[325, 330]	[0.4, 0.45]	[0.3, 0.4]	[0.6, 0.7]	
Radar D	[330, 335]	[0.35,0.41]	[0.6, 0.7]	[0.4, 0.5]	



说明: 雷达 A 的最大后悔值为 0.304; 雷达 B 的最大后悔值为 0.289; 雷达 C 的最大后悔值为 0.344; 雷达 D 的最大后悔值为 0.187。

图 2 各部雷达的综合效能



说明: 雷达 A 的最大后悔值为 0.360; 雷达 B 的最大后悔值为 0.337; 雷达 C 的最大后悔值为 0.281; 雷达 D 的最大后悔值为 0.254。

图 3 各部雷达的探测能力

表 2 雷达综合效能评估结果

方法	悲观法	乐观法	中间值法	最小损失法
效能评估结果	A>D>C>B	D>B>A>C	D>A>C>B	D>B>A>C

表 3 探测能力的评估结果

方法	悲观法	乐观法	中间值法	最小损失法
效能评估结果	C>A>D>B	D>C>A>B	D>C>B>A	D>C>B>A

5 结束语

笔者把偏好规划引入到雷达系统效能评估中, 选定探测能力、可靠性和生存能力作为效能评估的属性集, 根据效能评估的特点利用多层值树 (multi-level value tree) 进行建模, 拓展 RICH 法使用范围, 利用 RICH 法对多层值树进行求解。实例仿真结果验证了模型的正确性, 同时说明笔者提出的方法可为评价雷达系统效能提供合理的依据。

参考文献:

- [1] 陈世国, 沈齐. 基于灰色理论的机载预警雷达效能评估技术[J]. 现代雷达, 2008, 30(7): 28-32.
- [2] 王世锦, 隋东, 郑俊华. 空管雷达保障系统运行性能的模糊综合评[J]. 南京航空航天大学学报, 2008, 40(12): 836-839.
- [3] 花兴来, 刘庆华. 装备管理工程[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 87-96.
- [4] 钱建刚, 戎哲萍, 许弼. 大型相控阵雷达系统效能评估[J]. 兵工自动化, 2007, 26(11): 8-11.
- [5] 尹航, 李少洪, 李良驯. 侦察雷达系统效能模型研究[J]. 系统工程与电子技术, 2004, 26(2): 206-208.
- [6] 王小谟, 张光义, 等. 雷达与探测[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 21-33.
- [7] Kim S H., Han C H. Establishing dominance between alternatives with incomplete information in a hierarchically structured attribute tree[I]. European Journal of Operational Research, 2000, 122: 79-90.
- [8] Salo A, Hamalainen R P. Preference Assessment by Imprecise Ratio Statement[J]. Operations Research, 1992, 40: 1053-1061.
- [9] Salo A, Punkka A. Rank Inclusion in Criteria Hierarchies[J]. European Journal of Operational Research, 2005, 163: 338-356.