

GAHP 的机载雷达射频隐身性能评估

王经商¹, 吴 华¹, 程嗣怡¹, 汪 峰²

(1.空军工程大学航空航天工程学院,西安,710038;2.空装驻上海军代局,上海,200231)

摘要 无源探测系统、电子干扰等威胁使得射频隐身性能成为制约机载雷达效能发挥的关键,对于机载雷达射频隐身性能评估也变得愈发重要。针对施里海尔截获因子评估机载雷达射频隐身性能的不足,从雷达辐射信号层面的隐身性能和辐射策略的隐身性能 2 个方面,详细分析了影响雷达射频隐身性能的 8 个因素,构造出评估机载雷达射频隐身性能的指标体系。针对部分指标存在不确定性和模糊性的问题,采用灰色层次分析法对指标体系进行综合量化评估,并对 3 种类型机载雷达的射频隐身性能进行评估,实验结果表明该方法能够有效的评估机载雷达射频隐身性能。

关键词 无源探测系统;射频隐身;辐射策略;灰色层次分析法

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2016.02.008

中图分类号 TN97 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2016)02-0037-05

An Evaluation on the RF Stealth Performance of Airborne Radars Based on GAHP

WANG Jingshang¹, WU Hua¹, CHENG Siyi¹, WANG Feng²

(Aeronautics and Astronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;
2.Shanghai Militang Representative of Air Force Equipment Department, Shanghai, 200231)

Abstract: Aimed at the shortcomings of the airborne radar's stealth performance evaluation from the Schlicher interception factor, this paper, in two aspects of the stealth performances of radar radiation signals and radiation strategies, analyzes in detail eight factors which affect the radar RF stealth performance, and constructs an evaluation index system of the RF stealth performance of airborne radars. In the light of the problems of uncertainty and ambiguity existing in some indexes, the index system is comprehensively and quantitatively assessed by using a gray analytic hierarchy process (GAHP) method, and the stealth performances of three types of airborne radars are evaluated. The simulation results show that the method can evaluate the RF stealth performance of airborne radars effectively.

Key words: passive detective system; RF stealth; radiation strategy; gray analytic hierarchy process

随着无源探测系统对有源辐射源探测能力的显著提高,作为有源辐射源的机载雷达很容易被敌方截获和随之而来的干扰甚至是攻击,使战机的生存

受到严重的威胁^[1-3]。因此,如何在复杂的电子对抗环境中保持自身的低被截获概率成为雷达作战效能发挥的关键。只有对机载雷达射频隐身性能做出合

收稿日期:2015-07-20

基金项目:航空科学基金(20152096019)

作者简介:王经商(1990—),男,江苏连云港人,硕士生,主要从事电子对抗理论与技术研究.E-mail:jsh_wang2652@163.com

引用格式:王经商,吴华,程嗣怡,等. GAHP 的机载雷达射频隐身性能评估[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2016,17(2):37-41. WANG Jingshang, WU Hua, CHENG Siyi, et al. An Evaluation on the RF Stealth Performance of Airborne Radars Based on GAHP[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2016, 17(2): 37-41.

理的评估,才能更好地发挥战机作战效能。

目前,对于机载雷达射频隐身性能评估还没有形成统一的评估指标体系^[4]。传统的抗截获性能评估方法是在1985年由Self和Smith^[5]提出的,该方法在常规雷达抗截获性能评估方面得到广泛认同而且在实际应用中也非常有效^[6]。但随着相控阵以及MIMO等新体制雷达的出现,常规施里海尔评价方法有了明显不足,文献^[7]指出施里海尔截获因子评价飞机射频隐身的不足,提出用信号截获率来表征飞机的射频隐身特性;文献^[8]鉴于截获因子评估射频隐身性能的不足,提出基于整体对抗特性,采用联合截获概率评估射频隐身性能的新方法。

综上所述,已知文献对于射频隐身性能评估都是基于施里海尔截获因子或其改进型进行的,需要考虑敌方截获接收机的情况,但在现代战争中,对于敌方截获接收机的数量、位置、灵敏度、反射截面积等众多因素我们往往是未知的。鉴于此,本文提出一种新的评估机载雷达射频隐身性能的方法,从机载雷达辐射信号的隐身性能^[8]和辐射策略的隐身性能^[9]2个方面来综合评价雷达固有的射频隐身性能(“固有”是指不依赖外界环境,机载雷达本身具有的能力)。由于影响雷达固有射频隐身性能的因素很多,而且部分因素存在不确定性和模糊性,兼具灰色评估法和层次分析法优点的灰色层次分析法^[10](Gray Analytic Hierarchy Process, GAHP)能够将定性的问题定量化处理,能对指标做出客观准确的评估。所以,本文通过灰色层次分析法评价机载雷达射频隐身评估体系,为机载雷达射频隐身性能提供了一种很好的定量评估方法。

1 建立射频隐身性能评估体系

1.1 机载雷达辐射信号层面的射频隐身性能

1) 天线增益:截获接收机通常是截获雷达信号的副瓣,所以机载雷达要想实现低截获概率,就需要具有低的旁瓣电平,对于雷达天线来说,具有低的旁瓣增益,能够降低截获接收机探测旁瓣辐射的射频信号机率。所以将天线增益作为评估指标之一。

2) 长时间相干积累技术:雷达要实现低截获概率,一般采用降低雷达发射信号功率的方法,但是发射功率的减小将影响雷达的作用距离,为了补偿此损失,采用长时间相干积累技术,以增加实际利用的信号能量。由于雷达的发射信号参数对于雷达接收机是已知的而对于截获接收机是未知的,所以采用相干积累技术可以使信噪比改善,提高雷达的射频隐身性能。

3) 脉冲压缩调制样式:大多数的机载雷达采用周期调制的连续波信号,可以得到大的带宽和小的分辨单元,采用脉冲压缩、宽带宽的信号会使信号的截获变得困难,所以调制样式的不同,信号的射频隐身性能不同。

4) 波形复杂度:评价雷达信号波形的复杂度,主要采用文献^[11]的评价标准,雷达信号的波形越复杂,抗分选识别的性能就越强,被敌方截获接收机分选识别出来的概率就越小,射频隐身性能也越好。

1.2 机载雷达辐射策略的射频隐身性能

雷达根据工作模式(如搜索、跟踪模式)、执行的任务或者作战任务阶段的不同,可以采用不同的射频隐身策略。

1) 时间维度——天线扫描驻留时间:当截获接收机采用高灵敏度时,天线增益较高。高增益天线体积质量大,瞬时覆盖空域小,空间扫描时间长^[9],从而可以通过灵活的控制驻留时间,使得雷达达到射频隐身的目的。

2) 空间维度——天线极化方式:辐射波形的极化是描述电磁场矢量时变方向和相对幅度的波束特性。辐射极化可以是线性的、圆的或者椭圆的,极化调制方式的不同也会导致被截获概率不同。因此,将天线极化方式作为评价的参数之一。

3) 频率维度——载波频率:应用位于大气吸收区内高工作频段的载波会使截获接收机截获信号变得困难,为了实现低截获,可以选择部分频点使射频频率的衰减最大,以此来掩蔽发射信号。所以有策略的选择载波频率可以实现信号的射频隐身。

4) 功率维度——功率管理能力:根据不同的工作模式,不同的敌我态势,雷达自适应的调整控制发射功率^[12]的大小,在完成既定探测目标的同时不仅可以避免资源的浪费,还可以降低被敌方截获的概率,达到良好的射频隐身性能。是否具有良好的自适应功率管理能力对于射频隐身性能评估起着重要作用。

2 运用 GAHP 对机载雷达射频隐身性能评估

2.1 利用层次分析法确定指标的权重

将评价对象分解成若干层次,每一层次又由若干要素组成。以同一层次的元素作为准则,它对下一层次元素起支配作用,同时又受到上一层次元素的支配。设 U 代表一级评价指标组成的集合,且 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_i\}$, ($i = 1, 2, \dots, m$)。其中, u_i 是二

级指标 u_{ij} 组成的集合,即 $u_i = \{u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{ij}\}$ 。

采用层次分析法确定指标权重的具体步骤为:

1)建立权重判断矩阵。本文主要按照“1-9 标度法”^[13]来评定,对于同一层次各元素关于上一层次的某一准则的重要性进行两两比较,构造出判断矩阵 $A = (a_{ij})_{n \times n}$ 。

2)计算权重向量。计算最大特征值和特征向量的方法主要有平方根法、继承法、求和法、幂法等,本文采用平方根法来计算每一个判断矩阵的最大特征根 λ_{max} 及对应的特征向量 $w = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}^T$ 。

3)一致性检验。为了保证判断矩阵的合理性,就必须对判断矩阵进行一致性检验。首先计算一致性指标:

$$C_I = (\lambda_{max} - n) / (n - 1) \quad (1)$$

式中: n 为判断矩阵的阶数,当 n 较大时,需要引入随机一致性指标 (R_I) 对 C_I 进行修正,得到相对一致性指标 $C_R = C_I / R_I$;当 $C_R \leq 0.10$ 时,认为矩阵 A 满足一致性要求;否则,则必须对矩阵进行调整,并重新进行一致性检验,直至 A 满足要求为止。 R_I 的具体值见表 1。

表 1 随机一致性指标 RI 值

Tab.1 Random consistency index R_I values

矩阵阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R_I 值	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

2.2 确定评分矩阵

为了实现对于机载雷达的射频隐身性能的评估,需要对各个评价指标进行评分,这里设定评分的标准(其中 f 为评分值),见表 2。

表 2 分值评定标准

Tab.2 Score determination criterion

分值	$8 \leq f < 10$	$6 \leq f < 8$	$4 \leq f < 6$	$f < 4$
等级	好	较好	一般	差

设有 $p(p = 1, 2, \dots, k)$ 个专家对所有的评价指标按照规定的等级评分标准进行评分,得到评价样本矩阵为:

$$D = \begin{bmatrix} d_{111} & d_{112} & \dots & d_{11k} \\ d_{121} & d_{122} & \dots & d_{12k} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ d_{ij1} & d_{ij2} & \dots & d_{ijk} \end{bmatrix}$$

2.3 确定评估灰类

确定评估灰类就是要确定灰类的等级数、灰数以及白化权函数,本文采用 4 个评价灰类($e = 1, 2, 3, 4$),分别代表好、较好、一般、差 4 种标准,相应的灰数以及白化权函数如下:

第 1 灰类“好”($e = 1$),灰数 $\oplus \in [0, 8, +\infty)$,白化权函数 f_1 的表达式为:

$$f_1(d_{ijp}) = \begin{cases} d_{ijp}/8 & d_{ijp} \in [0, 8] \\ 1 & d_{ijp} \in (8, +\infty) \\ 0 & d_{ijp} \notin [0, +\infty) \end{cases} \quad (2)$$

第 2 灰类“较好”($e = 2$),灰数 $\oplus \in [0, 8, 16]$,白化权函数 f_2 的表达式为:

$$f_2(d_{ijp}) = \begin{cases} d_{ijp}/8 & d_{ijp} \in [0, 8] \\ 2 - d_{ijp}/8 & d_{ijp} \in (8, 16] \\ 0 & d_{ijp} \notin [0, 16] \end{cases} \quad (3)$$

第 3 灰类“一般”($e = 3$),灰数 $\oplus \in [0, 4, 8]$,白化权函数 f_3 的表达式为:

$$f_3(d_{ijp}) = \begin{cases} d_{ijp}/4 & d_{ijp} \in [0, 4] \\ 2 - d_{ijp}/4 & d_{ijp} \in (4, 8] \\ 0 & d_{ijp} \notin [0, 4] \end{cases} \quad (4)$$

第 4 灰类“差”($e = 4$),灰数 $\oplus \in [0, 2, 4]$,白化权函数 f_4 的表达式为:

$$f_4(d_{ijp}) = \begin{cases} 1 & d_{ijp} \in [0, 2] \\ 2 - d_{ijp}/2 & d_{ijp} \in (2, 4] \\ 0 & d_{ijp} \notin [0, 4] \end{cases} \quad (5)$$

2.4 计算灰色评价矩阵

计算专家就评价指标 u_{ij} 属于第 e 个灰类的灰色评价权重得到:

$$r_{ije} = x_{ije} / \sum_{e=1}^g x_{ije}; x_{ije} = \sum_{p=1}^k f_e(d_{ijp}) \quad (6)$$

所以 u_i 所属指标 u_{ij} 对于各个评价灰类的评价矩阵为:

$$R_i = \begin{bmatrix} r_{i1} \\ r_{i2} \\ \vdots \\ r_{ij} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{i11} & r_{i12} & \dots & r_{i1g} \\ r_{i21} & r_{i22} & \dots & r_{i2g} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{ij1} & r_{ij2} & \dots & r_{ijg} \end{bmatrix} \quad (7)$$

2.5 灰色综合评价

对于一二级指标分别做综合评判,结果为:

一级综合评判: $B_i = w_i \times R_i$,其中 w_i 为 u_i 中各指标的权重;

二级综合评判: $B = w \times R$,其中 w 为 U 的各指标权重,其中 $R = (B_1, B_2, \dots, B_m)$ 。

对各灰类等级按“灰水平”赋值,得到各评价灰类等级值化向量 $D = (d_1, d_2, \dots, d_g)$,于是综合评价值为 $W = B \times D^T$ 。

3 算例分析

为了验证本文构建的机载雷达射频隐身性能评估模型的有效性,现对某型常规脉冲雷达、某型机载连续波 pilot 雷达和某型先进机载相控阵雷达这 3

种类型雷达的固有射频隐身性能进行评估。根据建立的评估指标体系,通过对各个层次中指标的权重通过两两比较来确定,并且设第1层的判断矩阵为 A ,第2层的判断矩阵分别为 A_1 、 A_2 从而构造出判断矩阵为:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 3 \\ 1/3 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1/3 & 1/5 \\ 1/2 & 1 & 1/4 & 1/5 \\ 3 & 4 & 1 & 1/3 \\ 5 & 5 & 3 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 1/3 \\ 1/2 & 1 & 2 & 1/4 \\ 1/3 & 1/2 & 1 & 1/5 \\ 3 & 4 & 5 & 1 \end{bmatrix}$$

表3 专家对于3种类型雷达的评分结果

Tab.3 Scoring results to three types of radars from experts

指标	某常规脉冲雷达					某机载连续波 pilot 雷达					某先进的机载相控阵雷达				
①	3	5	3	4	5	8	7	8	6	10	10	9	10	10	8
②	4	5	6	3	5	7	9	10	7	8	9	10	9	9	10
③	5	4	5	3	4	10	8	8	9	7	9	9	8	10	9
④	4	3	4	5	3	9	7	8	9	10	10	10	10	9	10
⑤	4	5	5	4	3	9	8	10	7	8	10	9	10	10	9
⑥	3	5	6	5	4	6	8	9	9	7	10	10	9	8	9
⑦	5	3	4	5	5	7	8	10	6	9	9	10	9	10	10
⑧	3	4	3	5	4	10	9	7	8	10	10	10	10	9	10

注:表中“①,②,...,⑧”对应的指标依次为“天线增益”“长时间相干积累技术”“脉冲压缩调制样式”“波形复杂度”“天线扫描驻留时间”“天线极化方式”“载波频率选择”“功率管理能力”。

这里,主要给出评估某型机载连续波 pilot 雷达的固有射频隐身性能的计算过程。

查表3可知机载连续波 pilot 雷达的评分样本矩阵,并且记为 D_1 、 D_2 ,即有:

$$D_1 = \begin{bmatrix} 8 & 7 & 8 & 6 & 10 \\ 7 & 9 & 10 & 7 & 8 \\ 10 & 8 & 8 & 9 & 7 \\ 9 & 7 & 8 & 9 & 10 \end{bmatrix}, D_2 = \begin{bmatrix} 9 & 8 & 10 & 7 & 8 \\ 6 & 8 & 9 & 9 & 7 \\ 7 & 8 & 10 & 6 & 9 \\ 10 & 9 & 7 & 8 & 10 \end{bmatrix}$$

按2.4节计算方法, D_1 的灰色评价矩阵为:

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0.474 & 4 & 0.448 & 7 & 0.076 & 9 & 0 \\ 0.493 & 5 & 0.454 & 5 & 0.051 & 9 & 0 \\ 0.493 & 7 & 0.455 & 7 & 0.050 & 6 & 0 \\ 0.500 & 0 & 0.448 & 7 & 0.051 & 3 & 0 \end{bmatrix}$$

所以,得到灰色判断矩阵为: $B_1 = w_1 R_1 = [0.495 \ 0, 0.451 \ 0, 0.054 \ 0, 0]$

同理,可以得到 D_2 的灰色评价矩阵为:

$$R_2 = \begin{bmatrix} 0.493 & 7 & 0.455 & 7 & 0.050 & 6 & 0 \\ 0.474 & 4 & 0.448 & 7 & 0.076 & 9 & 0 \\ 0.480 & 5 & 0.441 & 6 & 0.077 & 9 & 0 \\ 0.520 & 0 & 0.453 & 3 & 0.026 & 7 & 0 \end{bmatrix}$$

从而计算出 B_2 :

$$B_2 = w_2 R_2 = [0.504 \ 3, 0.452 \ 3, 0.043 \ 5, 0],$$

通过平方根法求得 A 的权重向量为 $w = \{0.75, 0.25\}$,同理,得到 A_1 、 A_2 的权重向量分别为: $w_1 = \{0.112 \ 8, 0.074 \ 2, 0.263 \ 9, 0.549 \ 1\}$; $w_2 = \{0.232 \ 9, 0.138 \ 5, 0.083 \ 7, 0.545 \ 0\}$ 。

经过一致性检验得到 $C_{R1} = 0.038 \ 5 < 0.1$,满足一致性要求;同理, $C_{R2} = 0.017 \ 7 < 0.1$,所以 A_1 、 A_2 均满足一致性要求。

邀请5位专家按照文中规定的评分标准来对3种类型雷达各指标进行打分,得到的评分样本见表3。

$$R = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix},$$

所以得到:

$$B = wR = [0.4973, 0.4513, 0.0514, 0]。$$

取 $D = \{9, 7, 5, 3\}$,最终计算得到,该型机载连续波 pilot 雷达的固有射频隐身性能的灰色综合评估值为:

$$W = BD^T = 7.891 \ 8。$$

评价结果为“较好”。

同理,计算出某型先进机载相控阵雷达的灰色综合评估值为 8.107 8,评价结果为“好”;对于某型常规脉冲雷达的灰色综合评估值为 5.624 0,评价结果为“一般”。

综上所述,本文建立的机载雷达射频隐身性能评估指标体系能够很好的评价机载雷达固有射频隐身性能,并且评价结果与实际情况相一致。

4 结语

针对传统的施里海尔截获因子或其改进型评估机载雷达射频隐身性能的不足,本文提出一种新的评估机载雷达射频隐身性能的方法,主要从机载雷达辐射信号的隐身性能和辐射策略的隐身性能2个

方面入手,通过分析影响机载雷达射频隐身性能的因素构建出评估指标体系。采用灰色层次分析法对指标体系进行评估,很好地解决了部分影响因素存在不确定性和模糊性的问题。最后用该方法对3种类型的机载雷达射频隐身性能进行了评估,实验结果表明,该评价方法能够很好地评估机载雷达固有射频隐身性能。

参考文献(References):

- [1] DAVID L J. Introduction to RF Stealth[M]. North Carolina: Science Technology Publishing Inc, 2004.
- [2] 张贞凯,周建江,汪飞,等.机载相控阵雷达射频隐身时最优搜索性能研究[J].宇航学报,2011,32(9):2021-2028.
ZHANG Zhenkai, ZHOU Jianjiang, WANG Fei, et al. Research on Optimal Search Performance of Airborne Phased Array Radar for Radio Frequency Stealth[J]. Journal of Astronautics, 2011, 32(9):2021-2028. (in Chinese)
- [3] SCHLER D C. LPI Radar :Fact or Fiction [J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2006, 21(5):3-6.
- [4] 陈钦,赵玉辉,杜军.改进灰色关联分析法在雷达低截获性能评估中的应用[J].火控雷达技术,2012,41(2):13-16.
CHEN Qin, ZHAO Yuhui, DU Jun. Application of the Improved Grey Correlation Analysis on Evaluating Radar Low Probability of Interception Performance[J]. Fire Control Radar Technology, 2012, 41(2):13-16. (in Chinese)
- [5] SELF A G, SMITH B G. Intercept Time and Its Prediction [J]. IEEE Proceedings of Communications, Radar and Signal Processing, 1985, 132(4):215-220.
- [6] 蔡茂鑫,舒其建,李勇华,等. MIMO 雷达射频隐身性能的评估[J].雷达科学与技术,2013,11(3):267-270.
CAI Maixin, SHU Qijian, LI Yonghua, et al. Evaluation of RF Stealth Performance of MIMO Radar[J]. Radar Science And Technology, 2013, 11(3):267-270. (in Chinese)
- [7] 杨红兵,周建江,汪飞.飞机射频隐身表征参量及其影响因素分析[J].航空学报,2010,31(10):2040-2045.
YANG Hongbing, ZHOU Jianjiang, WANG Fei. Characterization Parameters of Warplane RF Stealth and Analysis of Its Affecting Factors[J]. Acta Aeronautica & Astronautica Sinica, 2010, 31(10):2040-2045. (in Chinese)
- [8] 李寰宇,柏鹏,王谦喆.天线波束对飞机射频隐身性能的影响分析[J].现代防御技术,2012,40(4):128-133.
LI Huanyu, BAI Peng, WANG Qianzhe. Influence of Antenna Beam on Radio Frequency Stealth[J]. Modern Defence Technology, 2012, 40(4):128-133. (in Chinese)
- [9] 廖俊,于雷,俞利新,等.基于LPI的相控阵雷达辐射控制方法[J].系统工程与电子技术,2011,33(12):2638-2643.
LIAO Jun, YU Lei, YU Lixin, et al. Method of Radiation Control for Phased Array Radar Based on LPI [J]. Systems Engineering and Electronics, 2011, 33(12):2638-2643. (in Chinese)
- [10] 轩永波,黄长强,王勇.基于灰色层次分析法的空间武器作战效能评估[J].空军工程大学学报:自然科学版,2011,12(2):32-37.
XUAN Yongbo, HUANG Changqiang, WANG Yong. Effectiveness Evaluation of Space Weapon System Based on Gray Hierarchy Method[J]. Journal of Air Force Engineering University : Natural Science Edition, 2011, 12(2):32-37. (in Chinese)
- [11] 侯小林,羊彦,高健健,等.雷达低截获概率信号及验证方法[J].西安电子科技大学学报,2012,39(4):184-190.
HOU Xiaolin, YANG Yan, GAO Jianjian, et al. Methods for Testing the Low Probability of Interception Performance of Radar Signals[J]. Journal of Xidian University, 2012, 39(4):184-190. (in Chinese)
- [12] 张贞凯,周建江,汪飞,等.基于射频隐身的相控阵雷达功率控制算法[J].系统工程与电子技术,2012,34(11):2244-2248.
ZHANG Zhenkai, ZHOU Jianjiang, WANG Fei, et al. Novel Algorithm of Power Control Based on Radio Frequency Stealth[J]. Systems Engineering and Electronics, 2011, 34(11):2244-2248. (in Chinese)
- [13] 杨宏宇,谢丽霞,朱丹,等.漏洞严重性的灰色层次分析评估模型[J].电子科技大学学报,2010,39(5):778-782.
YANG Hongyu, XIE Lixia, ZHU Dan, et al. A Vulnerability Severity Grey Hierarchy Analytic Evaluation Model[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2010, 39(5):778-782. (in Chinese)

(编辑:姚树峰)