

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2014.02.002

引用格式:师俊朋,胡国平,王馨.基于灰色关联算法的雷达反隐身性能评估[J].电讯技术,2014,54(2):121-125.[SHI Jun-peng,HU Guo-ping,WANG Xin.Performance Evaluation of Radar Anti-stealth Based on Grey Correlation Algorithm[J].Telecommunication Engineering,2014,54(2):121-125.]

基于灰色关联算法的雷达反隐身性能评估*

师俊朋**,胡国平,王馨

(空军工程大学 防空反导学院,西安 710051)

摘要:雷达反隐身的性能评估对现代空防战争具有重要意义。在深入分析雷达反隐身技术及相关基础理论上建立了雷达反隐身性能指标体系,提出了采用基于自适应熵权的灰色关联算法来进行雷达反隐身性能评估,解决了评价权重模糊问题,并结合经典最小二乘法和拉格朗日函数建立了优化评估模型,最后通过算例分析给出了该算法模型的应用过程,分析结果表明该算法能有效实现对雷达反隐身性能的排序和优选。

关键词:雷达反隐身;灰色关联;权重模糊;优化评估

中图分类号:TN951 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2014)02-0121-05

Performance Evaluation of Radar Anti-stealth Based on Grey Correlation Algorithm

SHI Jun-peng, HU Guo-ping, WANG Xin

(Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: It is important to conduct radar anti-stealth performance evaluation for modern air defense war. This paper establishes radar anti-stealth performance indicators by analyzing the radar anti-stealth technology and related basic theory. Adaptive entropy based on gray correlation algorithm is proposed to solve the fuzzy of weight evaluation. And according to classical least squares method and the Lagrangian function, the optimization assessment model is established. Finally, an example is provided to describe the application of the model. The result shows that the algorithm can realize the sorting and preferred selection of radar anti-stealth capability.

Key words: radar anti-stealth; gray correlation; fuzzy of weight evaluation; optimization assessment

1 引言

从海湾战争到科索沃战争,再到伊拉克战争,隐身飞机 F-117A 和 B-2A 的出色表现引起了世界各国的高度重视。隐身飞机的出现彻底打破了原有的攻防平衡,使许多国家的防空领域出现了重大漏洞,而加强雷达反隐身性能研究也迅速成为了现代空防战争的主题。对雷达反隐身的效能评估,能为雷达的快速发展、系统优化、装备布局及作战应用提供参考和依据。但由于雷达的技术性、系统性和战场的

复杂性、多变性,其性能指标综合评估势必是一个复杂的过程。目前,针对性能指标综合评估的方法主要有聚类分析法、主成分分析法、模糊物元分析法、层次分析法和相关系数法等。其中,主成分分析法虽解决了评估权重客观确定的问题,但会导致部分信息丢失;其余方法均采用主观方法确定权重,会使评价结果因人为因素而出现偏差。为保证定性分析的科学性和定量分析的准确性,本文结合隐身目标的隐身机理及空域、频域、极化域等反隐身技术原理

* 收稿日期:2013-11-01;修回日期:2013-12-19 Received date:2013-11-01;Revised date:2013-12-19
** 通讯作者:1065698473@qq.com Corresponding author:1065698473@qq.com

建立了雷达性能评估指标体系,并基于常见的灰色关联算法依据信息熵理论实时计算了该算法的权重值,最后根据 0-1 规划模型实现了对雷达反隐身性能的优化评估。

2 雷达反隐身性能指标

隐身目标是通过降低目标的雷达散射截面积 (RCS) 实现隐身的。RCS 不仅与目标表面导电特性、结构、材料、形体有关,还与雷达的工作频段、极化方式、目标相对雷达的空间姿态角等密不可分。雷达反隐身技术正是通过降低或弥补目标 RCS 的定向缩减实现的,目前该技术主要从频域、空域和极化域 3 个角度实现^[1]。

频域反隐身是基于隐身目标对 VHF/UHF 和 HF 频段的雷达隐身效果较差的弱点实现的。目前隐身飞行器采用的 RAM 图层,尚不能够覆盖 VHF/UHF 及其以下频段,且其工作频率局限于 1 ~ 20 GHz 微波频段,远高于 HF(5 ~ 30 MHz) 频段。空域反隐身利用了隐身目标 RCS 只能在特定方位上降低明显的特性,雷达只要避开隐身目标 RCS 明显减缩的方向,从其他角度对隐身飞行器进行照射,就能保持原有作用距离上对隐身目标探测的能力。极化域反隐身是通过改变雷达发射极化方向使隐身目标的 RCS 达到最大值实现的。目前该技术通常与频域、空域反隐身技术结合使用,进一步增强了雷达反隐身能力。

同时,根据雷达最大作用距离方程和脉冲压缩体制雷达特点可知增大发射功率、提高天线增益、降低噪声系数、增加目标驻留时间和脉冲宽度均能弥补目标的 RCS 减缩效应,进而增强雷达的反隐身能力。结合上述分析,建立雷达反隐身性能评估指标体系见图 1。

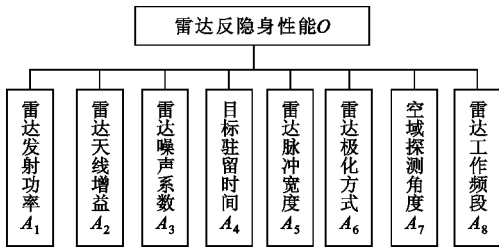


图 1 雷达反隐身性能评估指标

Fig. 1 Radar anti-stealth performance indicators

对于指标 $A_1 \sim A_5$ 可通过查询雷达具体参数获得,对于指标 $A_6 \sim A_8$ 可依据以下公式计算^[2]:

$$x_{s6} = \begin{cases} 1, & \text{水平极化} \\ 2, & \text{垂直极化} \\ 3, & \text{多极化} \end{cases}$$
$$x_{s7} = \begin{cases} 1, & \text{不是空基雷达} \\ 3, & \text{气球载空基雷达} \\ 5, & \text{机载空基雷达} \end{cases}$$
$$x_{s8} = \begin{cases} 1, & \text{雷达频段} \\ 2, & \text{米波段或毫米波段} \\ 3, & \text{多频段} \end{cases}$$

式中, $x_{si}(i=1,2,\cdots,8)$ 表示第 s 部雷达系统的第 A_i 个指标的度量值。

3 雷达反隐身性能评估模型

灰色关联法是根据因素之间发展趋势的相似或相异程度,亦即“灰色关联度”,作为衡量因素间关联程度的一种方法。为定量分析不同雷达的反隐身性能,本文建立了基于灰色关联度的分析评估模型,见图 2,图中 Y 表示归一化处理后的属性矩阵,通过关联度分析,得到其关于权向量 W 的实际关联度,经相关计算、排序即可得到评估结果 U 。

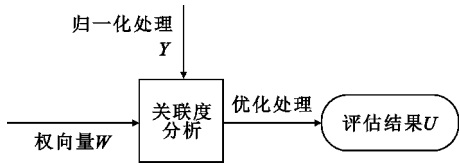


图 2 基于灰色关联度的评估模型

Fig. 2 Assessment model based on gray correlation algorithm

3.1 求取归一化矩阵 Y

设评估对象为 m 部雷达系统 n 个评估指标,原始数据矩阵表示为 $X=(x_{si})_{m \times n}$ 。为消除量纲的不一致性和增大数据的可比性,结合指标特性(A_3 为低优指标,其余均为高优指标),采用相对隶属度公式对 X 进行归一化处理可得属性矩阵 $Y=(y_{si})_{m \times n}, 0 \leq y_{si} \leq 1$ 。则 y_{si} 越大,表示第 s 部雷达系统的第 A_i 个指标评价越优; y_{si} 越小,表示第 s 部雷达系统的第 A_i 个指标评价越差。

$$y_{si} = \begin{cases} \frac{x_{si} - \min_s x_{si}}{\max_s x_{si} - \min_s x_{si}}, & \text{高优指标} \\ \frac{\max_s x_{si} - x_{si}}{\max_s x_{si} - \min_s x_{si}}, & \text{低优指标} \end{cases} \quad (1)$$

3.2 确定指标权向量 $W^{[3]}$

熵是衡量事物不确定程度的概念,熵值越大系

统的不确定性就越大,反之就越小。根据熵的定义,第 s 部雷达的熵为

$$E_s = - \frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n p_{si} \ln p_{si} \tag{2}$$

式中, p_{si} 是第 s 部雷达的第 i 个指标归一化后的权值概率。为反映不同参考向量时的权值变化,以比较序列与参考序列的差值定义相对概率。设参考序列为 $y^0 = (c_1, c_2, \dots, c_8)$, 则有

$$p_{si} = |y_{si} - c_i| / \sum_{i=1}^n |y_{si} - c_i| \tag{3}$$

第 s 部雷达的熵权计算公式为

$$w_s = \frac{1 - E_s}{m - \sum_{s=1}^m E_s} \tag{4}$$

记熵权向量为 $W = (w_1, w_2, \dots, w_m)$ 。

3.3 求取灰色关联度

灰色关联度是对各指标的灰色关联系数加权求和得到的。根据归一化后的属性矩阵 $Y = (y_{si})_{m \times n}$ 分别定义系统优参考序列和次参考序列:

$$\begin{cases} y_{\max}^0 = (a_1, a_2, \dots, a_8) = (\max_s y_{s1}, \max_s y_{s2}, \dots, \max_s y_{s8}) \\ y_{\min}^0 = (b_1, b_2, \dots, b_8) = (\min_s y_{s1}, \min_s y_{s2}, \dots, \min_s y_{s8}) \end{cases} \tag{5}$$

对于比较序列 $y_s = (y_{s1}, y_{s2}, \dots, y_{si})$, 分别求取其与优、次参考序列的灰色关联系数为^[4]

$$\begin{cases} \xi_{si}^{\max} = \frac{\min_i \min_s |y_{si} - a_i| + \rho \max_i \max_s |y_{si} - a_i|}{|y_{si} - a_i| + \rho \max_i \max_s |y_{si} - a_i|} \\ \xi_{si}^{\min} = \frac{\min_i \min_s |y_{si} - b_i| + \rho \max_i \max_s |y_{si} - b_i|}{|y_{si} - b_i| + \rho \max_i \max_s |y_{si} - b_i|} \end{cases} \tag{6}$$

式中, ρ 为分辨系数, 一般取 0.5。则第 s 个雷达系统的指标序列与优、次参考序列的关联度分别为 (记为优、次关联度)

$$\begin{cases} \gamma_s^{\max} = \sum_{i=1}^8 w_{sa} \xi_{si}^{\max} \\ \gamma_s^{\min} = \sum_{i=1}^8 w_{sb} \xi_{si}^{\min} \end{cases} \tag{7}$$

式中, w_{sa} 、 w_{sb} 分别为优、次参考序列下的自适应熵权值。

3.4 建立优化评估模型

根据上述分析, $\gamma_s^{\max}$ 越大, 雷达系统的性能指标集与优指标序列越接近, 其性能越优; $\gamma_s^{\min}$ 越大, 雷

达系统的性能指标集与次指标序列越接近, 其性能越差。所以, 要提高雷达系统的性能, 必须使 $\gamma_s^{\max}$ 尽可能大, $\gamma_s^{\min}$ 尽可能小。为便于建模分析, 根据式 (1) 将其进行归一化得

$$\begin{cases} d_s^{\max} = \frac{\gamma_s^{\max} - \min_s \gamma_s^{\max}}{\max_s \gamma_s^{\max} - \min_s \gamma_s^{\max}} \\ d_s^{\min} = \frac{\max_s \gamma_s^{\min} - \gamma_s^{\min}}{\max_s \gamma_s^{\min} - \min_s \gamma_s^{\min}} \end{cases} \tag{8}$$

以 λ_1 、 λ_2 表示 $d_s^{\max}$ 、 $d_s^{\min}$ 的实际权重值, 建立 0-1 规划模型:

$$u_s = \lambda_1 d_s^{\max} + \lambda_2 d_s^{\min} \tag{9}$$

式中, $\lambda_1 + \lambda_2 = 1, 0 \leq \lambda_1, \lambda_2 \leq 1$, u_s 为第 s 个雷达系统的最优评估值, 记评估结果向量为 $U = (u_1, u_2, \dots, u_s)$ 。

为求解最佳权重值 λ_1 和 λ_2 , 由经典最小二乘法, 建立目标函数

$$F(\lambda_1, \lambda_2) = \sum_s [(\lambda_1 d_s^{\max})^2 + (\lambda_2 d_s^{\min})^2]$$

根据拉格朗日乘数法建立拉格朗日函数

$$L(\lambda_1, \lambda_2) = \sum_{s=1}^m [(\lambda_1 d_s^{\max})^2 + (\lambda_2 d_s^{\min})^2] + \lambda (\lambda_1 + \lambda_2 - 1)$$

分别对 λ_1 、 λ_2 、 λ 求取一阶偏导数, 并使之等于 0, 由此可得

$$\begin{cases} \lambda + 2\lambda_1 \sum_{s=1}^m (d_s^{\max})^2 = 0 \\ \lambda_1 + \lambda_2 = 1 \\ \lambda + 2\lambda_2 \sum_{s=1}^m (d_s^{\min})^2 = 0 \end{cases}$$

由上式求解可得最优权重值为

$$\begin{cases} \lambda_1 = \frac{\sum_{s=1}^m (d_s^{\min})^2}{[\sum_{s=1}^m (d_s^{\min})^2 + \sum_{s=1}^m (d_s^{\max})^2]} \\ \lambda_2 = \frac{\sum_{s=1}^m (d_s^{\max})^2}{[\sum_{s=1}^m (d_s^{\min})^2 + \sum_{s=1}^m (d_s^{\max})^2]} \end{cases} \tag{10}$$

4 算例分析

应用上述建立的灰色关联度评估模型, 对不同雷达的反隐身性能进行定量评估, 各雷达具体指标数据见表 1^[5]。

表 1 雷达各指标参数值

Table1 The indicator parameters of radar

雷达	功率 /kW	天线 增益 /dB	噪声 系数 /dB	驻留 时间 /s	脉冲 宽度 /μs	极化 方式	探测 角度	工作 频段
雷达 1	270	22.0	3.0	0.536	13	1	3	2
雷达 2	800	22.2	4.5	1.028	10	2	1	1
雷达 3	40	30.5	2.5	0.114	500	2	1	3
雷达 4	20	25.0	3.0	0.472	430	1	5	1
雷达 5	400	35.0	3.0	0.061	4	3	3	2
雷达 6	700	38.0	2.0	0.039	46	3	5	3

根据公式(2)对各指标进行归一化处理,得归一化属性矩阵,见表 2。

表 2 评价指标的归一化数据

Table 2 The normalized data of evaluation indexes

s	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆	A ₇	A ₈
1	0.32	0.00	0.6	0.50	0.02	0.0	0.5	0.5
2	1.00	0.01	0.0	1.00	0.01	0.5	0.0	0.0
3	0.03	0.53	0.8	0.08	1.00	0.5	0.0	1.0
4	0.00	0.19	0.6	0.44	0.86	0.0	1.0	0.0
5	0.49	0.81	0.6	0.02	0.00	1.0	0.5	0.5
6	0.87	1.00	1.0	0.00	0.08	1.0	1.0	1.0

以求解优关联度为例。由式(6)求取归一化序列 $y_s=(y_{s1},y_{s2},\cdots,y_{si})$ 与优参考序列的灰关联系数矩阵,见表 3。

表 3 灰色关联系数

Table 3 Grey relational coefficients

$\xi_{si}^{\max}$	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0.42	0.33	0.56	0.50	0.34	0.33	0.50	0.50
2	1.00	0.34	0.33	1.00	0.34	0.50	0.33	0.33
3	0.34	0.51	0.71	0.35	1.00	0.50	0.33	1.00
4	0.33	0.38	0.56	0.47	0.78	0.33	1.00	0.33
5	0.50	0.72	0.56	0.34	0.33	1.00	0.50	0.50
6	0.79	1.00	1.00	0.33	0.35	1.00	1.00	1.00

结合表 3 可得各部雷达的指标序列与优参考序列的优关联度为

$$\xi^{\max}=(\xi_1^{\max},\xi_2^{\max},\cdots,\xi_m^{\max})=$$
$$(3.48,4.17,4.74,4.18,4.45,6.47)$$

其中, $\xi_s^{\max}=\sum_{i=1}^8 \xi_{si}^{\max}$ 。又由式(2)~(4)求得优关联度的熵权向量为

$$W_a=(0.033,0.138,0.154,0.105,0.098,0.472)$$

根据式(7)将该熵权值分别与优关联度的各项对应相乘可得各部雷达的熵权关联度向量

$$\gamma^{\max}=(w_{sa}\cdot \xi_s^{\max})_s=$$
$$(0.115,0.575,0.73,0.439,0.436,3.054)$$

同理可得次关联度向量为

$$\gamma^{\min}=(w_{sb}\cdot \xi_s^{\min})_s=$$
$$(0.672,1.94,0.652,1.22,0.371,0.295)$$

根据式(8)将优、次关联度向量进行归一化得

$$D^{\max}=(d_s^{\max})_s=(0,0.157,0.209,0.11,0.109,1),$$
$$D^{\min}=(d_s^{\min})_s=(0.771,0,0.783,0.438,0.954,1)。$$

随后结合式(10)可得最优权重值为 $\lambda_1=0.246,\lambda_2=0.754$ 。最后由式(9)可得最终评价结果向量为

$$U=(u_1,u_2,\cdots,u_s)=$$
$$(0.581,0.039,0.642,0.357,0.746,1)$$

根据综合评估结果可知,各雷达的反隐身能力: 雷达 6>雷达 5>雷达 3>雷达 1>雷达 4>雷达 2。由实际数据可知,雷达 6 由于噪声系数小、发射功率高、垂直极化、探测视角广等使其反隐身性能较高; 雷达 2 由于噪声系数高、探测视角小、脉宽较窄等原因使其性能相对较差。同理,对雷达 1、3、4、5 的数据进行定性分析发现其性能优劣与模型的评估结果基本一致,由此说明了该结论的合理、可靠、真实。

5 结束语

雷达作为有效的目标反隐身措施,越来越受到世界各国军事科技界的重视。本文给出了一种基于灰色关联度的优化评估算法,算法可以根据指标中比较序列值和参考序列值之间的关联程度自适应调整实际权值,克服了凭经验确定指标权重的主观随意性。通过对不同雷达的反隐身性能进行测试和比较说明,该算法能定量的衡量各指标的重要程度及各雷达的性能优劣。但本文的研究工作主要集中在可行性分析及理论仿真等方面,缺乏必要的工程实践和科学引导。要实现雷达反隐身性能评估的实际应用,结合工程实际、作战应用和理论创新的系统研究应是下一阶段的主要工作。为此,相关专家要努力工作,通力合作,积极开展雷达反隐身性能评估方面的研究、试验以及理论完善工作,力求为我国雷达反隐身技术的跨越发展做出贡献。

参考文献:

[1] 李杰,付连庆. 雷达反隐身技术研究[J]. 中国雷达, 2011(2):1-7.

- LI Jie, FU Lian-qing. Research of Radar Anti-stealth Technologies[J]. China Radar, 2011(2):1-7. (in Chinese)
- [2] 陈永光,李修和,沈阳. 组网雷达作战能力分析与评估[M]. 北京:国防工业出版社,2006.
- CHEN Yong-guang, LI Xiu-he, SHEN Yang. Radar Network Analysis and Evaluation of Operational Capability[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006. (in Chinese)
- [3] 林云,司锡才. 改进灰色关联算法在辐射源识别中的应用[J]. 通信学报,2010(8):166-171.
- LIN Yun, SI Xi-cai. Application of Improved Grey Correlation Algorithm on Radiation Source Recognition[J]. Journal on Communications, 2010(8):166-171. (in Chinese)
- [4] 赵晶英,陈英俊,项顺伯. 物流企业遴选业务项目的熵权灰色关联算法设计[J]. 浙江大学学报,2012(7):484-488.
- ZHAO Jing-ying, CHEN Ying-jun, XIANG Shun-bo. Algorithm Design of Entropy Grey Relation for Logistics Enterprise Business Project Selection[J]. Journal of Zhejiang University (Science Edition), 2012(7):484-488. (in Chinese)
- [5] 赵春峰,徐子闻. 定量分析雷达网反隐身能力的方法[J]. 空军雷达学院学报,2003(3):45-47.
- ZHAO Chun-feng, XU Zi-wen. An Approach to the Quantitative Analysis for Anti-stealth Capability of Radar Net[J]. Journal of Air Force Radar Academy, 2003(3):45-47. (in Chinese)
- [6] 陈韬伟,金炜东,陈振兴,等. 基于灰关联分析的雷达辐射源信号盲分类[J]. 计算机工程与设计,2009(2):4686-4689.
- CHEN Tao-wei, JIN Wei-dong, CHEN Zhen-xing, et al. Blind Classification of Radar Emitter Signals Based on Grey Relational Analysis[J]. Computer Engineering and Design, 2009(2):4686-4689. (in Chinese)
- [7] 王嵩华,朱建军,方志耕. 基于灰色关联度的多阶段语言评价信息集结方法[J]. 控制与决策,2013(1):109-114.
- WANG Yi-hua, ZHU Jian-jun, FANG Zhi-geng. Aggregation of Multi-stage Linguistic Evaluation Information based on Grey Incidence Degree[J]. Control and Decision, 2013(1):109-114. (in Chinese)
- [8] 朱银川. 飞行器射频隐身技术内涵及性能度量研究[J]. 电讯技术,2013,53(1):6-12.
- ZHU Yin-chuan. Implication and Performance Metric Research of RF Stealth for Aircrafts[J]. Telecommunication Engineering, 2013,53(1):6-12. (in Chinese)

作者简介:



师俊朋(1988—),男,河南许昌人,2012年于空军工程大学获学士学位,现为空军工程大学硕士研究生,主要研究方向为雷达反隐身的性能评估;

SHI Jun-peng was born in Xuchang, Henan Province, in 1988. He received the B. S. degree from Air Force Engineering University in 2012. He is now a graduate student. His research concerns performance evaluation of radar anti-stealth.

Email:1065698473@qq.com

胡国平(1964—),男,陕西西安人,空军工程大学教授、博士生导师,主要研究方向为通信与信息系统;

HU Guo-ping was born in Xi'an, Shaanxi Province, in 1964. He is now a professor and also the Ph. D. supervisor. His research concerns communication and information systems.

王馨(1990—),女,山东潍坊人,空军工程大学硕士研究生,主要研究方向为雷达反隐身的性能评估。

WANG Xin was born in Weifang, Shandong Province, in 1990. She is now a graduate student. Her research concerns performance evaluation of radar anti-stealth.