

# 模糊评价的雷达射频隐身性能多域联合评估方法

何召阳<sup>1,2</sup>, 王谦喆<sup>1</sup>✉, 宋博文<sup>3</sup>, 李 瑞<sup>1,2</sup>, 任宝祥<sup>1</sup>

(1. 空军工程大学装备发展与运用研究中心,西安,710051;2. 空军工程大学装备管理与安全工程学院,西安,710051;

3. 西安科技大学测绘科学与技术学院,西安,710054)

**摘要** 针对射频隐身性能评估问题,提出了一种不依赖敌方探测设备的雷达射频隐身性能模糊评估方法。通过分析雷达辐射源在极化域、波形域、能量域中影响射频隐身性能的因素,构建极化域、能量域、波形域射频隐身指标,突破传统的“辐射-接收”模型的射频隐身评估方法,建立了基于机载雷达自身辐射信号工作状态和工作参数的射频隐身性能模糊评估方法。最后,对不同机载雷达系统进行仿真对比,结果表明该评估方法能正确反映机载雷达系统的射频隐身性能。

**关键词** 射频隐身;模糊评估;多域联合;机载雷达

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2017.03.007

**中图分类号** TN978 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2017)03-0038-06

## A Multi Domain Joint Fuzzy Evaluation Method for RF Stealth Performance of Airborne Radar System

HE Zhaoyang<sup>1,2</sup>, WANG Qianzhe<sup>1</sup>, SONG Bowen<sup>3</sup>, LI Rui<sup>1,2</sup>, REN Baoxiang<sup>1</sup>

(1. Equipment Development and Application Research Department, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China; 2. Equipment Management and Safety Engineering College, Air Force

Engineering University, Xi'an 710051, China; 3. College of Geomatics, Xi'an University of

Science and Technology, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** In view of the RF stealth performance evaluation problems, this paper presents a method for fuzzy evaluating the RF stealth performance of the airborne radar system. Through analyzing the factors that radar radiation source influences the performance of the airborne radar system in the polarization domain, wave domain and energy domain, the RF stealth index of the waveform domain, polarization domain and the energy domain are constructed, a RF stealth evaluation method of the traditional “radiation reception” model is broken, the fuzzy evaluation method of radio frequency stealth based on the working state and working parameters of airborne radar system is established. Finally, the simulation evaluation of different airborne radar system is carried out. The results show that the method can correctly reflect the RF stealth performance of airborne radar system.

**Key words:** radio frequency stealth; Fuzzy evaluation; multi domain association; airborne radar

**收稿日期:** 2016-12-17

**基金项目:** 国家自然科学基金(61502523);陕西省电子信息系统综合集成重点实验室资助项目(201501A)

**作者简介:** 何召阳(1990—),男,河南洛阳人,硕士生,主要从事射频隐身研究. E-mail: wbbandytt@163.com

**通讯作者:** 王谦喆(1978—),男,陕西西安人,副教授,主要从事通信与信号处理. E-mail: afeu\_wqz@163.com

**引用格式:** 何召阳,王谦喆,宋博文,等. 模糊评价的雷达射频隐身性能多域联合评估方法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2017, 18(3): 38-43. HE Zhaoyang, WANG Qianzhe, SONG Bowen, et al. A Multi Domain Joint Fuzzy Evaluation Method for RF Stealth Performance of Airborne Radar System[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2017, 18(3): 38-43.

航空器的隐身能力包括雷达隐身、红外隐身和射频隐身3个方面<sup>[1-3]</sup>,3种隐身能力的有效实现和平衡,是作战飞机隐身能力重要保证,确保在隐身、反隐身电子对抗中的相对优势。雷达隐身目的是减小飞机在不同方向、不同频段的被动电磁散射特征,降低被敌方雷达探测发现的范围和概率,其实质是一个低可探测性问题,是飞机的一种固有特性,可以用单一参数(RCS)来定量描述。红外隐身目的是减小飞机发动机和机体的主动红外辐射特征,降低被敌方红外传感器探测发现的范围和概率,其实质是一个低可截获性(LPI)问题,也是飞机的一种固有特性,可以用单一参数(红外辐射强度)进行定量描述。与雷达隐身和红外隐身不同,射频隐身是一个具有多元、多维动态特征性的综合性课题。

目前,关于雷达隐身和红外隐身研究,已经有了较为清晰的认识,其技术路线也很明确,研究的基点是采取结构、涂层、降温等技术措施,尽量降低飞机雷达和红外特征,压缩敌方传感器的探测距离,隐身性能评估已有相应指标。而射频隐身性能评估的研究尚处于起步阶段。国内近年来也开展了射频隐身方面的研究,主要从2个方面展开研究工作:文献[4~9]是基于电子对抗的应用场景,建立射频辐射源和截获接收机之间的信号传输链路,采用联合截获概率、信号截获率、截获因子等指标对辐射源的射频隐身性能加以评估;文献[10~14]是从射频辐射源自身辐射信号的结构出发,研究不依赖于截获接收机性能的辐射源射频隐身评估指标。

现有的方法在评估射频辐射源的射频隐身性能时,通常需要设定较多的前提条件,比较依赖敌方截获接收设备的技术性能,缺乏系统性的分析方法,没有通用的射频隐身指标可供参考,评估结果的通用性和实用性有较大的限制。射频隐身性能好坏的界定具有一定的模糊性,标准难以制定,对这类多因素、多层次的模糊性复杂问题,可以运用模糊综合评价进行性能评估。在射频隐身领域对隐身性能进行模糊评估的文献较少。

## 1 计算射频隐身性能评估因子

### 1.1 极化域和能量域射频隐身性能评估因子计算

通过分析辐射源所辐射信号的极化变化态和脉冲能量变化态,给出了极化域和能量域的射频隐身指标的定量计算方法,具体步骤如下:

**步骤1:**设置辐射源工作模式。根据辐射源的作战任务,设置其正常的工作模式,根据辐射源工作机理和发射天线的形式,获得辐射源发射天线向外

辐射信号的极化状态,根据辐射信号的极化状态,确定其极化态随时间的变化函数  $p(t)$ ,提取该函数的周期  $T_p$ ,  $T_p$  的取值范围为  $T_p \geq 0$ ;对于极化态不变的情况,即  $T_p = 0$  时,在极化域该辐射源没有射频隐身能力,则  $\sigma_p = 1$ ;对于极化态随机变化的情况,即  $T_p \rightarrow \infty$  时,在极化域该辐射源的射频隐身能力最好,此时  $\sigma_p = 0$ ;极化态周期变化时,根据实际确定  $T_p$  的取值。计算极化域的射频隐身因子  $\sigma_p$ ,类似于 RCS 指标,0 表示射频隐身能力最好,1 表示最差。辐射源的极化域射频隐身能力为介于 0 和 1 之间的一个数字。满足式(1)的函数都可被用来作为极化域的射频隐身因子  $\sigma_p$ ,如下所示:

$$\begin{cases} \sigma_p = 1, & T_p = 0 \\ \sigma_p = 0, & T_p \rightarrow \infty \\ \sigma_p \text{ 随 } T_p \text{ 单调递减} \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{定义: } \sigma_p = 1 - \frac{2}{\pi} \arctan T_p$$

**步骤2:**根据辐射源工作机理,获得辐射源发射天线向外辐射信号的时域波形,包括各种调制和非调制雷达射频波形,提取该时域波形的周期  $T$ ,计算每个周期的能量值,生成能量序列  $e(n)$ 。计算每个周期的能量值,生成能量序列  $e(n)$ ,  $n$  表示周期数,为大于等于 1 的自然数。定义:

$$e(n) = \int_{(n-1)T}^{nT} |s(t)|^2 dt$$

提取该能量序列  $e(n)$  的周期,记为  $T_e$ ;如能量值每隔一个周期重复,则  $T_e = 2$ ;若辐射源所辐射的脉冲串能量都相同,则  $T_e = 0$ ;若辐射源所辐射的脉冲串能量随机变化,无周期性,则  $T_e \rightarrow \infty$ ,但是,辐射源所辐射的脉冲串能量通常无周期性变化的情况,因此不考虑这种情况。

对于能量周期不变的情况,即  $T_e = 0$  时,在能量域该辐射源没有射频隐身能力,因此  $\sigma_e = 1$ ;对于能量随机变化的情况,敌方接收机无法适应这种随机变化,也就无法进行相干积累,则该辐射源的射频隐身能力在能量域是最优的,此时  $\sigma_e = 0$ ;类似于 RCS 指标,0 表示射频隐身能力最好,1 表示最差。脉冲能量周期变化时,该辐射源的能量域射频隐身能力为介于 0 和 1 之间的一个数字。

满足式 1 的函数都可被用来作为能量域的射频隐身因子  $\sigma_e$ :

$$\sigma_e = 1 - \frac{2}{\pi} \arctan(TT_e) \quad (2)$$

### 1.2 波形域射频隐身性能评估因子计算

通过分析辐射源所辐射信号的周期、占空比和单个周期内脉内信号的瞬时参数,给出波形域射频隐身指标的计算方法,包括以下步骤:

1) 设置辐射源工作模式根据辐射源的作战任务, 设置辐射源工作模式;

2) 根据辐射信号的时域波形的周期  $T$ , 计算波形域中关于周期参数的射频隐身因子  $\sigma_w(T)$ 。

周期  $T$  为辐射源辐射脉冲串的周期。若辐射源发射连续波信号, 则  $T=0$ 。若辐射源发射随机间隔的脉冲串信号, 则认为  $T \rightarrow \infty$ 。 $T$  越大, 则敌方接收机就需要花费更长的时间进行时域的相干检测, 也就说明机载雷达的波形域射频隐身性能越好。类似于 RCS 指标, 0 表示射频隐身能力最好, 1 表示最差。周期参数隐身因子  $\sigma_w(T)$  为介于 0 和 1 之间的数字。可设:

$$\sigma_w(T) = 1 - \frac{2}{\pi} \arctan T \quad (3)$$

3) 生成波形域中占空比的射频隐身因子  $\sigma_\tau$ 。

提取辐射信号的占空比  $\tau/T$  参数,  $\tau$  为辐射信号的脉冲宽度, 占空比越大, 单位时间内积累的脉内信号就越多, 越易被探测到; 占空比越小, 越不易被探测到。波形域中占空比的射频隐身因子可设为

$$\sigma_\tau = \tau/T \quad (4)$$

4) 根据单一周期内的脉内信号参数, 计算脉内信号的射频隐身因子  $\sigma_{in}$ 。

设该脉内信号有  $N$  个周期, 提取每个周期的幅度  $A$ 、频率  $f$  和相位参数  $\phi$ , 分别组成长度为  $N$  的瞬时幅度矢量  $\mathbf{A}$ 、瞬时频率矢量  $\mathbf{F}$  和瞬时相位矢量  $\mathbf{\Phi}$ ; 然后计算各矢量的方差, 得方差  $\sigma_a$ 、 $\sigma_f$  和  $\sigma_\phi$ 。脉内信号的射频隐身因子可设为:

$$\sigma_{in} = \left\{ \frac{1}{3} \left[ \cos(\arctan(\sigma_a)) + \cos(\arctan(\sigma_f)) + \cos(\arctan(\sigma_\phi)) \right] \right\}^{1/N} \quad (5)$$

利用带有指数权值或幅度权值的加权形式计算辐射源辐射信号的波形域射频隐身因子。波形域上分析时, 按照从全局到局部的思路, 分别得到了周期、占空比和脉内信号参数 3 个因子。这 3 个因子中, 只要有任一因子为 0, 就表示敌方的接收机无法对该机载雷达进行有效接收。因此, 在本文中, 总的波形域隐身因子可表示为

$$\sigma_s = \sigma_w \tau \sigma_{in} / T \quad (6)$$

由此计算得到的  $\sigma_s$  介于 0 到 1 之间的一个数字。值越小, 表示波形域的射频隐身能力越好。

## 2 多域联合射频隐身性能模糊综合评估方法

模糊综合评判方法是一种运用模糊数学原理分析和评价具有“模糊性”的事物的系统分析方法。它

是一种以模糊推理为主的定性定量相结合、精确与非精确相统一的分析评价方法。由于这种方法在处理各种难以用精确数学方法描述的复杂系统问题方面所表现出的独特的优越性, 近年来已在许多学科领域中得到了十分广泛的应用。

### 2.1 综合评价指标体系

根据计算出的波形域、极化域、能量域射频隐身评估因子建立综合评估指标体系, 见图 1。

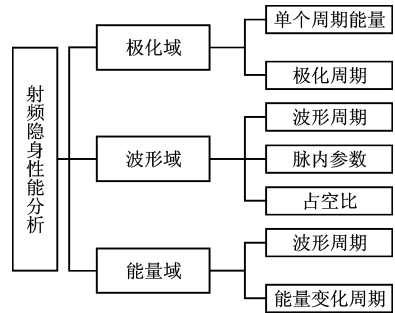


图 1 综合评估指标体系

Fig. 1 The comprehensive evaluation index system

### 2.2 多层次模糊综合评判模型

在复杂大系统中, 需要考虑的因素很多, 而且因素之间还存在着不同的层次。这时, 应用单层次模糊综合评判模型就很难得出正确的评判结果。所以, 在这种情况下, 就需要将评判因素集合按照某种属性分成几类, 先对每一类进行综合评判, 然后再对各类评判结果进行类之间的高层次综合评判。这样, 就产生了多层次模糊综合评判问题。雷达射频隐身性能由许多因素构成, 必须对相关因素做综合考虑, 利用多指标进行系统的评价。多层次模糊综合评判模型的建立, 可按以下步骤进行:

**步骤 1:** 构建指标集合。在射频隐身性能评估体系中, 指标集合  $X = \{X_1, X_2, \dots, X_i\}$ , 其中  $i$  表示一级指标集的个数;  $X_i = \{X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{ij}\}$ , 其中  $j$  表示二级指标集的个数。

**步骤 2:** 分配个指标的权重。假设一级指标对射频隐身性能的权重  $b = (b_1, b_2, \dots, b_i)$ , 式中  $\sum_{k=1}^i b_k = 1$ ; 二级之指标对一级指标的权重  $C_i = (c_{i1}, c_{i2}, \dots, c_{ij})$ , 式中  $\sum_{k=1}^j c_{ik} = 1$ 。

**步骤 3:** 确定模糊评判集。设定雷达射频隐身性能评价等级  $Y = \{Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5\} = \{\text{很好, 较好, 一般, 较差, 很差}\}$ 。

**步骤 4:** 构建模糊评价矩阵。首先考虑二级指标  $X_{ij}$  对评价等级的隶属度  $r_{ijt}$  ( $t=1, 2, 3, 4, 5$ ), 则  $X_{ij}$  的单因素评价矩阵  $r_{ijt} = (r_{ij1}, r_{ij2}, r_{ij3}, r_{ij4}, r_{ij5})$ , 一级指标  $X_i$  由  $j$  个二级指标构成, 构成模糊评价矩

$$\text{阵 } \mathbf{R}_i = \begin{bmatrix} r_{i11} & r_{i12} & r_{i13} & r_{i14} & r_{i15} \\ r_{i21} & r_{i22} & r_{i23} & r_{i24} & r_{i25} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{ij1} & r_{ij2} & r_{ij3} & r_{ij4} & r_{ij5} \end{bmatrix} \text{。由广义模糊合}$$

成运算得到一级指标评价结果  $\mathbf{A}_i = \mathbf{C}_i \times \mathbf{R}_i (i=1, 2, 3)$ 。由此可得雷达射频隐身性能的模糊评价矩阵

$$\mathbf{A} = \mathbf{b} \times [\mathbf{A}_1, \mathbf{A}_2, \mathbf{A}_3]^T$$

然后根据最大隶属度原则得出评价结论。

### 3 仿真计算

#### 3.1 射频隐身指标计算

下面对处于 X 波段的美军 AN/APQ-13 机载导航与轰炸雷达和 AN/APQ-7 机载轰炸瞄准雷达<sup>[13]</sup>为例进行仿真验证本文评估方法,参数见表 1。

表 1 雷达参数

Tab. 1 radar parameters

雷达型号	AN/APQ-13	AN/APQ-7
名称	机载导航与轰炸雷达	机载轰炸瞄准雷达
体制	脉冲	脉冲
工作频率/MHz	9 345~9 405	9 375~9 405
作用距离/kM	0.9~120	1~160
脉冲宽度/us	2.25	2
重复频率脉冲/s	1 300	1 600

AN/APQ-13 仿真见图 2。其辐射信号的时域波形见图 3,从图中可见,在单一周期内部,其瞬时频率是线性变化的。波形周期  $T=7.69 \times 10^{-4}$  占空比  $\sigma_r=0.0029$ ,由式(3)、(4)可得周期参数的射频隐身因子和占空比射频隐身因子:

$$\begin{aligned} \sigma_w(T) &= 1 - \frac{2}{\pi} \arctan T = 0.5827 \\ \sigma_r &= \tau/T = 0.0029 \end{aligned} \quad (8)$$

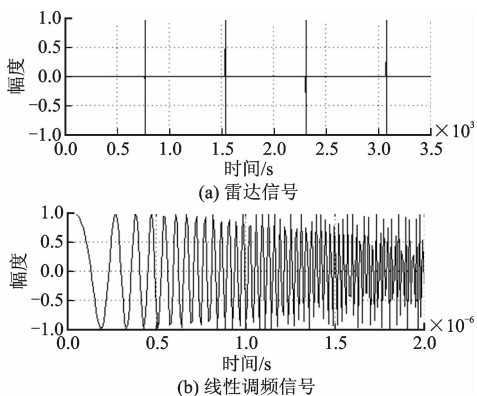


图 2 机载雷达辐射信号的时域波形

Fig. 2 The time domain waveform of airborne radar signal

图 2 给出了单一脉冲内部辐射信号的瞬时参数随时间的变化情况。瞬时参数包括瞬时幅度、瞬时

频率和瞬时相位。从图 3 可求得瞬时参数的方差  $\sigma_a, \sigma_f, \sigma_\phi$ ,由式(5)可得脉内信号射频隐身因子:

$$\sigma_{in} = 0.9959 \quad (9)$$

综上所述,由式(6)可得线性调频信号波形域射频隐身因子:

$$\sigma_s = \sigma_w \tau \sigma_{in} / T = 0.00168 \quad (10)$$

运用相同方法对 AN/APQ-7 雷达进行仿真得到波形域射频隐身因子如下:

$$\sigma_{w1}(T_1) = 1 - \frac{2}{\pi} \arctan T_1 = 0.6444$$

$$\sigma_{r1} = \tau_1 / T_1 = 0.0032$$

$$\sigma_{m1} = 0.9954 \quad (11)$$

$$\sigma_{s1} = \sigma_{w1} \tau_1 \sigma_{m1} / T_1 = 0.0021 \quad (12)$$

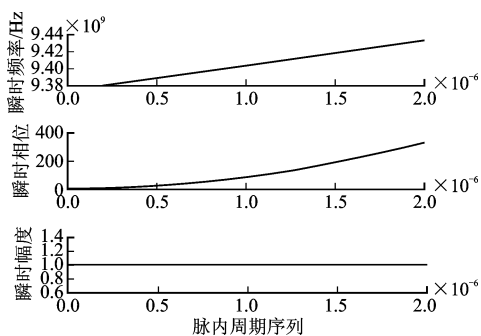


图 3 机载雷达脉内信号的瞬时参数

Fig. 3 The instantaneous parameters of airborne radar signal

下面分别给出辐射源极化域和能量域的射频隐身因子的计算实例。图 4 给出了 2 种辐射源的极化态随时间的变化情况。AN/APQ-13 雷达中,辐射源的极化态呈周期变化,变化周期为 3 s。AN/APQ-7 雷达中,变化周期为 5 s。

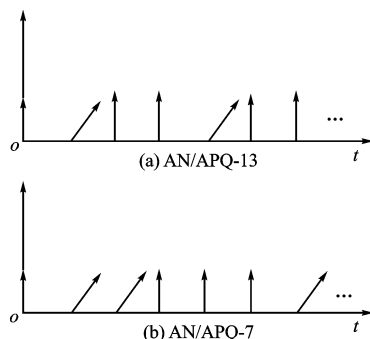


图 4 机载雷达辐射信号的极化态的变化示意图

Fig. 4 The polarization state change of airborne radar signal

按照所提的极化域射频隐身因子计算方法,由式(1)分别计算得到这 2 个辐射源的极化域射频隐身因子为  $\sigma_p=0.2048, \sigma_{1p}=0.1257$ 。

图 5 给出了 2 种雷达辐射源的单一周期能量随时间的变化情况。AN/APQ-3 的辐射源的能量周

期为4;AN/APQ-13的辐射能量周期为3,则有 $T_e=4, T_{1e}=3$ 。由能量域射频隐身因子计算公式(2),则有 $\sigma_e=0.9981, \sigma_e=0.9988$ 。

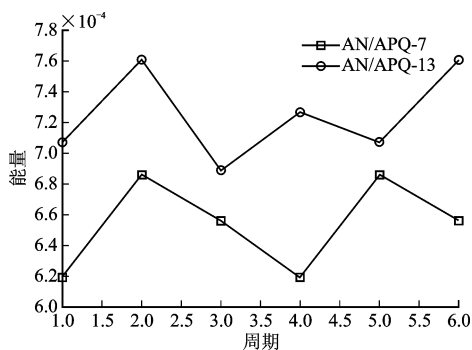


图5 机载雷达的单周期能量随时间变化

Fig. 5 The single period of airborne radar energy change

### 3.2 射频隐身性能模糊综合评估

在模糊评判模型中权重系数的选取和隐身性能好坏的评判采取专家评价打分的方法获取,选取50名专家和相关专业从业人员进行统计计算,其中既有雷达装备实验、教学、训练、使用和管理一线的人员,又有来自科研院所的专家教授以及来自对口基层部队的军事和技术干部。

将调查对象的评价数据综合求均值然后归一化,以AN/APQ-13<sup>[15]</sup>为例将结果进行统计得出权重系数,见表2。

表2 权重系数

Tab. 2 Weight factor

一级指标	权重	二级指标	权重
极化域	0.17	极化周期	0.74
		单个周期能量	0.36
		波形周期	0.25
波形域	0.65	脉内参数	0.43
		占空比	0.32
		波形周期	0.21
能量域	0.18	能量变化周期	0.79

专家团队根据计算出的射频隐身性能评估二级指标大小,采取征询法和调查法对雷达射频隐身能力进行评估,对应的模糊关系矩阵为:

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0.08 & 0.16 & 0.4 & 0.18 & 0.18 \\ 0 & 0.14 & 0.42 & 0.24 & 0.2 \end{bmatrix}$$

$$R_2 = \begin{bmatrix} 0.1 & 0.16 & 0.33 & 0.3 & 0.11 \\ 0.12 & 0.15 & 0.42 & 0.17 & 0.14 \\ 0.08 & 0.17 & 0.41 & 0.24 & 0.1 \end{bmatrix}$$

$$R_3 = \begin{bmatrix} 0.1 & 0.16 & 0.33 & 0.3 & 0.11 \\ 0.08 & 0.11 & 0.42 & 0.34 & 0.05 \end{bmatrix}$$

由评价模型,得出二级指标的评价结果:

$$A_1 = C_1 R_1 =$$

$$[0.0592 \quad 0.1688 \quad 0.4472 \quad 0.2169 \quad 0.2052]$$

$$A_2 = C_2 R_2 =$$

$$[0.1022 \quad 0.1589 \quad 0.3943 \quad 0.2249 \quad 0.1197]$$

$$A_3 = C_3 R_3 =$$

$$[0.0842 \quad 0.1205 \quad 0.4011 \quad 0.3316 \quad 0.0626]$$

最后建立模糊评价矩阵:

$$A = b \times [A_1, A_2, A_3]^T = [0.17 \quad 0.65 \quad 0.18] \cdot$$

$$\begin{bmatrix} 0.0592 & 0.1688 & 0.4472 & 0.2169 & 0.2052 \\ 0.1022 & 0.1589 & 0.3943 & 0.2249 & 0.1197 \\ 0.0842 & 0.1250 & 0.4011 & 0.3316 & 0.0626 \end{bmatrix}$$

将计算结果归一化处理得AN/APQ-13雷达射频隐身性能模糊综合评价结果:

$$A = [0.0901 \quad 0.1519 \quad 0.3976 \quad 0.2385 \quad 0.1219]$$

同理可得,AN/APS-7雷达射频隐身性能模糊综合评价结果:

$$B = [0.2318 \quad 0.3108 \quad 0.3205 \quad 0.1096 \quad 0.0273]$$

由此可得,对AN/APQ-13雷达射频隐身性能认为很好的有9.01%的把握、较好的有15.19%的把握,一般的有39.76%、较差的有23.85%、很差的有12.19%。对AN/APS-7雷达射频隐身性能认为很好的有23.18%的把握、较好的有31.08%的把握,一般的有32.05%、较差的有10.96%、很差的有2.73%。根据最大隶属度原则可知AN/APQ-13雷达射频隐身性能中等偏差,AN/APS-7雷达射频隐身性能中等偏好。

结果表明,AN/APQ-7雷达的射频隐身性能要优于AN/APQ-13雷达,因此,美军的B-29轰炸机上AN/APQ-13雷达最终被性能占优的AN/APQ-7雷达所取代。从仿真过程可以看出,波形占空比、周期、脉内信号瞬时参数对射频隐身性能的影响较大,在实际军事应用中,通常需要人为设定波形占空比、周期等参数,雷达辐射源发射波形的射频隐身性能也会有所不同。另外,波形域、极化域、能量域射频隐身因子评价的公式并不唯一。选用不同的公式得出的射频隐身指标数值不同,但评估对象之间的射频隐身性能大小关系不变,仍然能评估出机载航电系统射频隐身性能的优劣。文中提供方法可以为雷达的射频隐身性能做出评估,在军事需求和射频隐身方面综合考虑选择最优解决方案。

## 4 结语

本文开展了极化域、能量域、波形域射频隐身指标的设计和射频隐身性能评估的研究,突破了传统的基于“辐射-接收”模型的射频隐身评估方法,建立

了基于自身辐射源的射频隐身性能模糊评估方法。设定辐射源的工作模式后,仅根据辐射源的辐射信号计算其射频隐身指标,不依赖于截获接收机的工作场景和工作参数。该多域联合的隐身指标便于计算,便于对辐射源的射频隐身性能进行定量评估和对比分析,是辐射源射频隐身能力的一种本质描述。通过对机载雷达信号进行仿真,实现了对机载雷达射频隐身能力的评估,形成了较为系统的射频隐身定量评估的技术能力,在射频隐身方面对机载雷达设备的设计制造和战术使用具有一定的指导意义,具有较强的通用性和实用性。

### 参考文献(References):

- [1] DAVID L J. Introduction to RF stealth [M]. Raleigh, NC: Science Technology Publishing Incorporation, 2004.
- [2] YANG H B, ZHOU J J, WANG F. Design and Analysis of Costas/PSK RF Stealth Signal Waveform [C]//CIE International Conference on Radar: IEEE, 2011: 1247-1250.
- [3] 李寰宇, 查宇飞, 李浩, 等. 联合截获威胁下的雷达射频隐身目标搜索算法 [J]. 航空学报, 2015, 36(6): 1953-1963.
- LI H Y, ZHA Y F, LI H, et al. Radar Search Algorithm Based on RF Stealth in the Case of Joint Intercepted Threats [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2015, 36(6): 1953-1963. (in Chinese)
- [4] 谢桂辉, 田茂, 王正海, 等. 射频隐身数据链的通信波形参数优化建模 [J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(4): 116-122.
- XIE G H, TIAN M, WANG Z H, et al. An Optimization Model for Communication Waveform Parameters of Radio Frequency Stealth Datalink [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(4): 116-122. (in Chinese)
- [5] SONG T Y, SHU X G, TAO H, et al. A Novel Stealth Vivaldi Antenna with Low Radar Cross Section [J]. International Journal of RF and Microwave Computer, 2014, 25(3): 255-261.
- [6] YANG H B, ZHOU J J, WANG F, et al. Characterization Parameters of Warplane RF Stealth and Analysis of Its Affecting Factors [J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2010, 31(4): 1000-1008.
- [7] 杨少委, 程婷, 何子述, 等. MIMO 雷达搜索模式下的射频隐身算法 [J]. 电子与信息学报, 2014, 36(5): 1018-1022.
- YANG S W, CHENG T, HE Z H, et al. Algorithm of Radio Frequency Stealth for MIMO Radar in Searching Mode [J]. Journal of Electronics Information Technology, 2014, 36(5): 1018-1022. (in Chinese)
- [8] YANG H, WANG J, ZHOU J. Design of Noise Modulation Continuous Wave RF Stealth Radar Signal Waveform [C]//IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing. IEEE, 2011: 1-4.
- [9] PHILLIP E P. Detecting and Classifying Low Probability of Intercept Radar [M]. London: Artech House Inc, 2004: 19-33.
- [10] LAURA S. Stealth Technology; The Potential to Make the Visible, Invisible [C]//Proceedings of 2014 International Conference on Unmanned Systems. Arlington, VA, USA: Association for Unmanned Vehicle Systems International, 2014: 1463-1482.
- [11] DILLARD G M, REUTER M, ZEIDLER J, et al. Cyclic Code Shift Keying: A Low Probability of Intercept Communication Technique [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2003, 39(3): 786-789.
- [12] 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): 6-11.
- ZHU Y C. Implication and Performance Metric Research of RF Stealth for Aircrafts [J]. Telecommunication Engineering, 2013, 53(1): 6-11. (in Chinese)
- [13] 杨宇晓, 汪飞, 周建江, 等. 跳频周期和跳频间隔的最大条件熵射频隐身设计方法 [J]. 电子与信息学报, 2015, 37(4): 841-847.
- YANG Y X, WANG F, ZHOU J J, et al. RF Stealth Method for Hopping Cycle and Hopping Interval Based on Conditional Maximum Entropy [J]. Journal of Electronics Information Technology, 2015, 37(4): 841-847. (in Chinese)
- [14] 吴思东, 朱明, 付克昌, 等. 基于多元集对分析的辐射源信号熵特征评价 [J]. 电路与系统学报, 2013, 18(2): 298-304.
- WU S D, ZHU M, FU K C, et al. Entropy Feature Evaluation of Radar Emitter Signals Based on SPA [J]. Journal of Circuits and Systems, 2013, 18(2): 298-304. (in Chinese)
- [15] MERRILL I S. Radar Manual [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2000.

(编辑: 姚树峰)