

## 基于脉冲样本图的机载 RWR/ESM 辐射源威胁评估

王睿甲, 王星, 程嗣怡, 周东青, 陈游

(空军工程大学航空航天工程学院, 西安 710038)

**摘要:** 辐射源威胁评估是机载雷达告警器/电子支援措施(RWR/ESM)的重要功能,为了提高机载 RWR/ESM 设备应对复杂电磁环境的能力,建立了基于脉冲样本图的威胁评估专家系统,通过雷达威力模型确定了以脉冲样本图为输入的评估指标,运用 TOPSIS 方法,使得评估系统客观、有效,贴近电子战要求,符合机载 RWR/ESM 工作流程。仿真证明了评估系统的有效性及其可行性。

**关键词:** 威胁评估; RWR/ESM; 脉冲样本图; 雷达威力模型; 专家系统

**中图分类号:** V271.4; TN97 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2015)05-0019-06

## Airborne RWR/ESM Threat Assessment of Radiation Source Based on Pulse Sequence Pattern

WANG Rui-jia, WANG Xing, CHENG Si-yi, ZHOU Dong-qing, CHEN You

(School of Aeronautics and Astronautics Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

**Abstract:** Threat assessment of radiation source is an important function of airborne Radar Warning Receiver/Electronic Support Measure (RWR/ESM). To improve the RWR/ESM ability in the complex electromagnetic environments, an expert system of threat assessment was established based on the pulse sequence pattern. The assessment index was determined taking the pulse sequence pattern as the input by using the power model of radar. The TOPSIS method was used to make the assessment system objective and effective, which can meet the requirements of Electronic Warfare and conform to the working process of airborne RWR/ESM. The simulation proved that the assessment system is effective and feasible.

**Key words:** threat assessment; RWR/ESM; pulse sequence pattern; power model of radar; expert system

### 0 引言

现代空战中,快速、准确、精细的辐射源威胁评估是机载雷达告警器/电子支援措施(RWR/ESM)及综合电子战系统作战能力的直接体现,辐射源威胁评估是制定干扰决策、进行干扰资源分配的重要前提<sup>[1]</sup>,在整个机载电子战链路中占有举足轻重的地位。

目前国内外针对威胁评估方法进行了深入研究<sup>[2-4]</sup>,在机载辐射源威胁评估方面研究较少,文献<sup>[5]</sup>研究了防空作战中的辐射源威胁评估,建立了多级的辐射源评估模型,利用模糊多属性方法进行辐射

源威胁评估;文献<sup>[1]</sup>研究了基于 VIKOR 方法的电子战目标威胁评估,通过增加心态指标将主观因素影响融入评估方法中。

本文在以上文献研究基础上,结合机载 RWR/ESM 分选、识别、评估的工作流程,建立了基于脉冲样本图辐射源威胁评估专家系统,通过构建雷达威力模型,确立评估指标,采用 TOPSIS 法进行威胁评估,改变了传统评估模型不够精细、评估指标难以获取等问题。脉冲样本图特征矢量作为评估模型输入,提高了机载 RWR/ESM 应对复杂电磁环境的能力。

### 1 机载 RWR/ESM 威胁评估概述

机载 RWR/ESM 威胁评估区别于传统威胁评估,传统目标威胁评估多基于自闭环链路,而机载 RWR/ESM 系统与待评估雷达系统构成互闭环链路。

机载 RWR/ESM 设备基本工作流程<sup>[6]</sup>如图 1 所示。

收稿日期:2014-06-17

修回日期:2015-04-01

基金项目:陕西省自然科学基金(2012JQ8019);电子信息控制国防重点实验室基金(9140C1005051103)

作者简介:王睿甲(1990—),男,陕西咸阳人,硕士生,研究方向为电子对抗理论与技术。

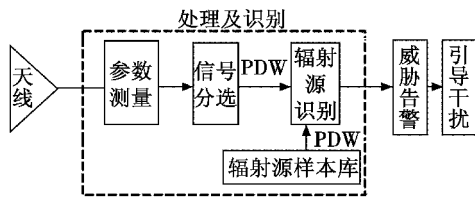


图 1 机载 RWR/ESM 工作流程图

Fig. 1 Airborne RWR/ESM working process

通过分选后的 PDW 脉冲流与辐射源样本库内脉冲样本进行模板匹配,完成辐射源识别,同时读取该脉冲样本的威胁值,根据事先设定的威胁值门限判断是否告警。

机载 RWR/ESM 中辐射源样本库是否全面与合理直接影响了威胁评估的效果,且模板匹配威胁评估方法精细程度不够,难以适应复杂多变的战场电磁环境。为了应对日益复杂的电磁环境,机载 RWR/ESM 威胁评估系统需具备实时动态调整功能,从而能够更加精细地感知战场电磁态势。通过分析 RWR/ESM 工作流程可知,分选与识别是威胁评估的基础。在文献[7-8]有关脉冲样本图分选、识别研究基础之上,建立基于脉冲样本图的威胁评估系统,如图 2 所示,威胁评估系统包括评估模型、评估指标和评估算法。

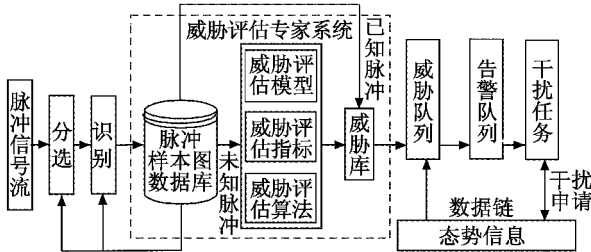


图 2 基于脉冲样本图的机载 RWR/ESM 威胁评估系统

Fig. 2 Threat assessment system of airborne RWR/ESM based on the pulse sequence

脉冲样本图所包含的脉冲特征矢量<sup>[9]</sup>作为 RWR/ESM 系统的辐射源样本库以及威胁评估专家系统的输入,经过分选识别后形成已知脉冲、未知脉冲,已知脉冲威胁评估过程在脉冲样本图数据装订时已经完成,直接读取威胁库中威胁值,进入威胁队列;未知脉冲依据脉冲样本图特征矢量格式输入威胁评估系统得到评估结果,刷新威胁库,进入威胁队列。载机平台结合本机参数、数据链态势信息形成告警队列并生成干扰任务。

## 2 基于脉冲样本图的威胁评估系统

### 2.1 基于脉冲样本图的雷达威力评估模型构建

空战条件下辐射源威胁评估需要考虑众多因素:雷达平台属性、雷达平台状态、雷达状态、雷达对我方

企图等都需要考虑<sup>[5]</sup>。本文构建的基于脉冲样本图的威胁评估模型从辐射源信号对我方飞机的定位能力入手构建雷达威力评估模型,利用机载 RWR/ESM 输出脉冲特征矢量作为模型输入。

雷达威力评估模型主要包括:能量模型、检测模型、测距模型、测速模型、平台能力指数模型,如图 3 所示。通过雷达威力评估模型全面地描述雷达对我方定位能力以及作战企图,有效解决文献[1,5]评估模型不全面、模型中指标难以获取及计算的问题。

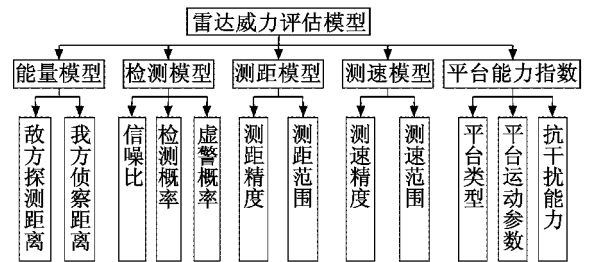


图 3 雷达威力评估模型

Fig. 3 The model for radar performance assessment

雷达威力评估模型以经过机载 RWR/ESM 侦收并分选识别后的脉冲样本图特征矢量为输入,通过各个子模型将辐射源特征参数转换成相对我方的评价指标,对传统评估模型进行了改进。例如,文献[5]中评估模型内重频威胁,文中指出雷达辐射源重频越高,表明敌方雷达平台对我方实施攻击的可能性越高,威胁度也越高。实际上,高重频信号单值测距范围小,测速范围大,不一定重频越高对我方威胁越大,需要结合测速范围以及测距范围综合判断。

### 2.2 威胁评估指标确定及计算

脉冲样本图表征雷达在某工作模式下发射一串脉冲信号  $S = (P_1, P_2, \dots, P_m)$ ,  $P$  为单个脉冲的特征矢量<sup>[8,10]</sup>,即

$$P = (p(1), p(2), \dots, p(K))^T \quad (1)$$

式中,  $K$  维特征参数里,除去特征参数到达时间  $t$  外,其余  $K-1$  维特征参数为  $C$ ,则脉冲样本图又可表示为

$$P = (C, t) \quad (2)$$

结合机载 RWR/ESM 系统量测能力,特征矢量  $P$  所包含参数为<sup>[11]</sup>

$$P = (F_{RF}, P_{PRI}, P_w, A_{AOA}, P_A, T_s, T_e, N) \quad (3)$$

式中:  $F_{RF}$  表示脉冲载频;  $P_{PRI}$  表示重频周期;  $P_w$  表示脉宽;  $A_{AOA}$  表示到达角;  $P_A$  表示幅度;  $T_s$  表示脉冲串到达时间起始时刻;  $T_e$  表示脉冲串到达时间结束时刻;  $N$  表示脉冲串中包含的脉冲个数。

在脉冲样本图特征矢量基础上,对雷达威力评估模型各个子模型进行介绍,梳理模型输入输出关系,计算雷达威力模型中各项评价指标。

1) 探测距离。

雷达体制决定探测距离,本文以空战中简单脉冲雷达与脉冲多普勒雷达为例进行讨论,简单脉冲雷达探测距离可表示为

$$R_{\max} = \left[ \frac{P_{sv}}{B} * \frac{G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 k T_0 F_n (S/N)_{\min} L} \right]^{1/4} \quad (4)$$

脉冲多普勒雷达平均探测距离可表示为

$$\bar{R}_{\max} = \left[ \frac{P_t \bar{D}_a}{B_d (N_{RC} + 1)} * \frac{G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 k T_0 F_n (S/N)_{\min} L} \right]^{1/4} \quad (5)$$

式(4)、式(5)中,参数含义参见文献[12],其中,平均功率  $P_{sv} = P_t d$ ,平均距离损失系数  $\bar{D}_a = (7N_{RC} + 1) / 12(N_{RC} + 1)$ 。

2) 侦察距离。

侦察距离反映我方机载RWR/ESM对敌辐射源告警距离<sup>[13]</sup>,可表示为

$$R_r = \left[ \frac{P_t G_r G_t \lambda^2}{(4\pi)^3 P_{\min} L_s} \right]^{1/2} \quad (6)$$

3) 信噪比。

雷达信号重频决定了信号处理方式,不同的信号处理方式会得到不同的信噪比,中、高重频下考虑积累、频域检测,信噪比的算式为

$$R_{s,N,MH} = N^2 \cdot P_r / P_n \quad (7)$$

低重频信号通常在高空上视情况下使用,信噪比的算式为

$$R_{s,N,L} = P_r / P_n \quad (8)$$

式(7)、式(8)中,  $P_r, P_n$  可表示为

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4} \quad (9)$$

$$P_n = k T_0 B \quad (10)$$

4) 虚警概率。

雷达中、高重频下虚警概率可表示为

$$P_{fa} = \frac{t_{int}}{t_{fa} \times N_{RC} \times N} \quad (11)$$

低重频下虚警概率为

$$P_{fa} = \frac{1}{t_{fa} B} \quad (12)$$

5) 检测概率。

雷达单次检测概率可以表示为

$$P_d \approx 0.5 \times \operatorname{erfc}(\sqrt{-\ln P_{fa}} - \sqrt{R_{s,N} + 0.5}) \quad (13)$$

6) 测距精度。

脉冲延迟测距精度表示为

$$\Delta R = c P_w / 2 \quad (14)$$

7) 测距范围。

单重频下最大可测距离为

$$R_{\max} = c P_{PRI} / 2 \quad (15)$$

多重频解模糊是雷达常用的测距方法,多重频情况下最大可测距离为<sup>[14]</sup>

$$R_{\max} = R_{\max(1)} \prod_{i=2}^k \frac{R_{\max(i)}}{\Delta R_{\max(i)}} \quad (16)$$

式中,  $\Delta R_{\max(i)} = R_{\max(i)} - R_{\max(i-1)}$ ,  $R_{\max(i)}$  对应第  $i$  组重频下的最大可测距离。

8) 测速精度。

多普勒滤波器带宽决定了测速精度,可表示为

$$\Delta v = \frac{\lambda}{2} \Delta f = \frac{\lambda}{2} \frac{F_{PRF}}{N} \quad (17)$$

式中,  $F_{PRF}$  为脉冲重复频率。

9) 测速范围。

$$v_{\max} = \frac{\lambda}{2} F_{PRF} \quad (18)$$

10) 平台能力指数。

平台能力指数  $C^{[15]}$  为

$$C = \ln A_1 + \ln(\sum A_2 + 1) + \ln A_3 \quad (19)$$

式中:  $A_1$  表示平台类型,包括预警雷达、制导雷达、搜索雷达、火控雷达等;  $A_2$  表示平台运动参数,包括辐射源所处平台的速度  $v$ 、高度  $h$ 、距离  $R$  等;  $A_3$  表示抗干扰能力。  $A_1, A_3$  采用文献[1]中定性指标描述方法,  $A_2$  采用文献[1]中定量指标描述方法。

雷达威力模型中输入参数包括3类,第1类为由脉冲样本图特征矢量直接读取或间接计算的输入参数,如表1所示;第2类为辐射源本身的属性参数,例如雷达发射功率,辐射源属性参数作为辐射源特征参数存储于机载RWR/ESM的辐射源特征数据库中,如表2所示;第3类为机载航电设备或数据链给出的态势参数,包括目标参数以及本机参数,如表3所示。

表1 脉冲样本图计算参数表

Table 1 Parameters computed by the pulse sequence

计算参数	占空比 $d$	波长 $\lambda$	距离门 $N_{RC}$	多普勒带宽 $B_d$	带宽 $B$	积累时间 $t_{int}$
转换公式	$P_w/P_{PRI}$	$c/F_{RF}$	$P_{PRI}/P_w$	$P_{PRF}/N$	$1/P_w$	$T_0 - T_s$

表2 辐射源特征参数

Table 2 Character parameters of radiation resource

特征参数	发射功率 $P_t$	天线增益 $G(G_t)$	噪声系数 $F_n$	损耗 $L$	灵敏度 $(S/N)_{\min}$	虚警时间 $t_{fa}$
参数类别	确定数	确定数	确定数	确定数	区间数	区间数

表3 态势参数

Table 3 Parameters of situation

目标参数			本机参数				
$A_1$	$\frac{A_2}{R}$	$\frac{A_3}{v \ h}$	$A_3$	$\frac{P_{\min}}{\text{最小检测信号}}$	$G_r$ 接收增益	$L_e$ 损耗	$\sigma$ RCS

### 3 威胁评估算法

机载RWR/ESM辐射源威胁评估是典型的多属性

决策问题,且决策过程以RWR/ESM工作流程为基础,通过雷达威力模型将辐射源特征属性指标转化为相对本机的探测能力指标,对于多个辐射源将形成评价指标矩阵,本文采用改进的TOPSIS方法进行辐射源威胁评估,TOPSIS法的基本原理是基于标准化后的样本评价矩阵,通过正样本和负样本构建出评价空间,待评价的目标可以视为评价空间内的一点,通过计算与正负样本之间距离,给出评价结果,如图4所示。

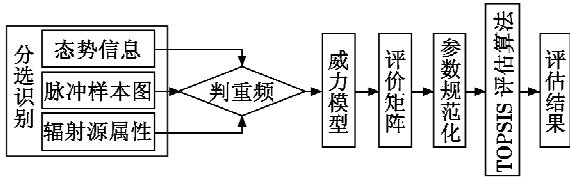


图4 评估流程图

Fig.4 Flow chart of assessment

评估流程如下所述。

1) 根据脉冲样本图、辐射源特征属性、态势信息输入,通过雷达威力模型形成目标属性决策矩阵  $A = (a_{ij})_{m \times n}$ ,其中,  $a_{ij}$  表示第  $i$  个样本关于第  $j$  个属性的指标值,雷达威力模型中共包括 10 个评价属性,其中探测距离、虚警概率、检测概率为区间指标,其余为确定指标。

2) 依据评估指标类别,将成本型及效益型指标采用线性尺度变换法<sup>[16]</sup>进行标准化,构造规范化评价矩阵  $V = (v_{ij})_{m \times n}$ 。

3) 确定理想解与负理想解,理想解为每个评价指标下各个样本中威胁值最大的解,负理想解则为威胁值最小的解,即

$$V^+ = \{ \max_{1 \leq i \leq m} v_{ij} \} = \{ v_1^+, v_2^+, \dots, v_n^+ \} \quad (20)$$

$$V^- = \{ \min_{1 \leq i \leq m} v_{ij} \} = \{ v_1^-, v_2^-, \dots, v_n^- \} \quad (21)$$

4) 计算各个样本到正、负理想解的距离  $S_i^+, S_i^-$ ,即

$$S_i^+ = \sqrt{\left( \sum_{j=1}^n v_{ij} - v_j^+ \right)^2} \quad (22)$$

$$S_i^- = \sqrt{\left( \sum_{j=1}^n v_{ij} - v_j^- \right)^2} \quad (23)$$

5) 计算各个目标相对于  $V^+$  的相对贴近度  $CL_i$ ,即

$$CL_i = S_i^- / (S_i^- + S_i^+) \quad (24)$$

6) 根据相对贴近度的排序,给出辐射源威胁程度排序,输出评估结果。

### 4 仿真实例

仿真想定设置如下,假设我方飞机执行常规巡逻任务,飞行速度为 300 m/s,区域内共有 5 个辐射源目标,记为  $X_i (i = 1, 2, \dots, 5)$ 。其中: $X_1, X_2$  为同一型号战斗机的相控阵机载火控雷达; $X_3$  为某型电子战飞机

机载雷达; $X_4$  为地面远程警戒雷达, $X_5$  为地面制导雷达。 $X_1 \sim X_5$  的辐射源特征参数存储于我方飞机 RWR 辐射源数据库中,如表 4 所示, $X_1 \sim X_5$  相对我机的态势信息如表 5 所示。

表4 辐射源特征参数表

Table 4 Character parameter of radiation resources

目标	属性					
	$P_t/kW$	$(G/G_t)/dB$	$F_n/dB$	$L/dB$	$(S/N)_{min}/dB$	$t_{fa}/s$
$X_1 / X_2$	12	40	4	6	[12, 20]	[60, 90]
$X_3$	13.5	45	3	4	[10, 20]	[60, 90]
$X_4$	50	48	2	7	[8, 16]	[90, 120]
$X_5$	15	50	3	6	[10, 18]	[50, 80]

表5 辐射源平台相对我机态势信息

Table 5 Relatively situation information of radiation platform

目标	$A_1$	$A_2$			$A_3$
		$R/km$	$v/(m \cdot s^{-1})$	$h/m$	
$X_1$	3	80	285	6 000	5
$X_2$	3	50	290	5 500	5
$X_3$	4	120	250	7 000	5
$X_4$	2	400	0	0	2
$X_5$	6	150	0	0	8

我机 RWR/ESM 系统参数有:天线增益  $G_t$  为 35 dB;最小可检测信号  $P_{min}$  为  $[-60 \text{ dBW}, -50 \text{ dBW}]$  的区间数;接收机损耗为 6 dB;本机 RCS 值约为  $5 \text{ m}^2$ 。我机 RWR/ESM 系统开机后侦收信号经过分选识别后,形成脉冲样本图矢量如表 6 所示。

表6 RWR/ESM 脉冲样本图列表

Table 6 RWR/ESM pulse sequence list

目标	$F_{RF}/MHz$	$P_{PRI}/\mu s$	$P_w/\mu s$	$A_{AOA}/(^\circ)$	$P_A/dB$	$T_s/\mu s$	$T_o/\mu s$	$N$
$X_1$	9 500	3	1.2	11	10	1.00	3072.00	1024
	9 800	8.9	0.29	2	12	201.00	1340.20	128
$X_2$	9 800	11.4	0.29	2	12	1340.20	2799.40	128
	9 800	12.6	0.29	2	12	2799.40	4412.20	128
$X_3$	9 000	3.1	1.1	30	6	4 510.00	6097.20	512
$X_4$	1 500	100	1.1	15	11	4 670.00	11070.00	64
$X_5$	10 000	3	0.5	45	5	7 910.00	9 446.00	512

1) 根据表 4 ~ 表 6 参数,结合雷达威力模型可以得到  $X_1 \sim X_5$  辐射源目标的属性决策矩阵  $A = (a_{ij})_{5 \times 10}$ ,如表 7 所示。其中:虚警概率、测距精度、测速精度为效益性指标,其余指标为成本性指标;探测距离、侦察距离、虚警概率、检测概率为区间数,其余指标为确定数;各个指标量纲如表 7 所示。

2) 构造标准化矩阵  $V = (v_{ij})_{5 \times 10}$ ,如表 8 所示,并确定正理想解  $V^+$ 、负理想解  $V^-$ ,即  $V^+ = \{ 1.000, 1.000, 1.000, [0.990, 1.000], [1.000, 1.000], 1.000, 1.000, 1.000, 1.000, 1.000 \}$ ;  $V^- = \{ 0.167, 0.030, 0.408, [0.241, 0.242], [0.784, 0.750], 0.239, 0.007, 0.328,$

0.186,0.620}。

想解的距离,并计算各个目标的相对贴程度,结果如表9

3) 根据式(27)~式(28)计算各个目标到正、负理想解的距离,并计算各个目标的相对贴程度,结果如表9所示。

表7 辐射源目标属性决策矩阵

Table 7 Radiation target property decision matrix

目标	$R/\text{km}$	$\text{RESM}/\text{km}$	$R_{S,N}/\text{dB}$	$P_{fa}/10^{-9}$	$P_d$	$\Delta R/\text{km}$	$R_{\max}/\text{km}$	$\Delta v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$V_{\max}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$C$
$X_1$	[207.05,130.64]	[218.86,69.21]	13.43	[20.00,13.30]	[0.770,0.750]	0.18	0.45	5.13	5263.15	11.46
$X_2$	[98.13,61.91]	[212.16,67.09]	15.16	[4.83,3.22]	[0.976,0.972]	0.043	63.91	9.49	1719.78	11.38
$X_3$	[151.13,84.99]	[435.74,137.79]	16.99	[18.30,12.20]	[0.980,0.990]	0.16	0.46	10.50	5376.34	11.90
$X_4$	[186.51,117.68]	[7107.22,2247.50]	23.33	[6.11,4.58]	[0.830,0.901]	0.16	15.00	15.62	1000.00	7.38
$X_5$	[588.80,371.51]	[735.11,232.47]	32.91	[10.00,6.25]	[0.981,1.000]	0.075	0.45	9.76	5000.00	8.88

表8 标准化决策矩阵

Table 8 Standardization decision matrix

目标	$R/\text{km}$	$\text{RESM}/\text{km}$	$R_{S,N}/\text{dB}$	$P_{fa}/10^{-9}$	$P_d$	$\Delta R/\text{km}$	$R_{\max}/\text{km}$	$\Delta v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$V_{\max}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$C$
$X_1$	0.352	0.031	0.408	[0.241,0.242]	[0.784,0.750]	0.239	0.007	1.000	0.979	0.963
$X_2$	0.167	0.030	0.460	[0.990,1.000]	[0.994,0.972]	1.000	1.000	0.541	0.320	0.956
$X_3$	0.737	0.061	0.516	[0.264,0.264]	[0.846,0.901]	0.268	0.007	0.489	1.000	1.000
$X_4$	0.317	1.000	0.708	[0.791,0.703]	[1.000,1.000]	0.268	0.235	0.328	0.186	0.620
$X_5$	1.000	0.103	1.000	[0.483,0.515]	[0.994,0.972]	0.573	0.007	0.526	0.930	0.746

表9 各个目标的 $S^+, S^-, CL$ 值

Table 9 The values of  $S^+, S^-, CL$  of each target

目标	$S^+$	$S^-$	$CL$
$X_1$	0.0281	0.3234	0.9200
$X_2$	0.0000	0.3515	1.0000
$X_3$	0.0949	0.2566	0.7300
$X_4$	0.3515	0.0000	0.0000
$X_5$	0.2197	0.1318	0.3750

4) 根据相对贴程度  $CL$  值进行威胁排序,目标威胁程度从高到低为  $X_2 > X_1 > X_3 > X_5 > X_4$ 。

$X_2$  为相控阵机载火控雷达,从态势信息分析, $X_2$  离我机距离近,速度高,根据我机 ESM 侦收信号分析, $X_2$  雷达采用了相参处理的中高重频信号且重频变化,该组信号具有良好的测距及测速能力,此时  $X_2$  雷达很有可能对我机处于单目标跟踪 (SIT)、边跟踪边扫描 (TWS) 状态,全向性优于其他目标,因此对我机威胁最大; $X_1$  与  $X_2$  信号样式类似,均为高重频相参信号,可能均处于速度搜索 (VS) 状态,基本战术能力相当,但  $X_1$  相对  $X_2$  距离更近、速度更高,因此  $X_2$  威胁相对高于  $X_3$ ; $X_5$  与  $X_4$  同为地面雷达, $X_5$  距离更近且为制导雷达,因此  $X_5$  威胁度高于  $X_4$ 。

### 5 结论

现代空战中,实时动态辐射源威胁评估将是机载综合电子战系统的重要能力之一。本文结合机载 RWR/ESM 系统工作流程,基于脉冲样本图概念,提出了机载辐射源威胁评估方法,通过建立雷达威力模型,确定评估指标并给出评估指标计算方法,有效地解决了传统评估方法评估指标不全面、难以获取等问题,通过仿真证明了基于脉冲样本图的辐射源威胁评估方法

的有效性,对机载 RWR/ESM 精细化战场电磁态势感知具有一定的参考意义。下一步的主要工作是研究基于评估结果智能干扰决策以及干扰任务分配。

### 参考文献

- [1] 王鑫,吴华,赵玉,等.电子战目标威胁评估的折衷排序方法[J].电光与控制,2013,20(8):14-17.(WANG X, WU H, ZHAO Y, et al. A compromise sorting method for electronic warfare target threat assessment[J]. Electronics Optics & Control, 2013, 20(8):14-17.)
- [2] 李孟启,孙永芹,纪金耀,等.基于DFDBN的防空火控雷达威胁评估方法[J].现代雷达,2013,35(7):1-5.(LI M Q, SUN Y Q, JI J Y, et al. Method of threat assessment for air defense fire control radar based on discrete fuzzy dynamic Bayesian network[J]. Modern Radar, 2013, 35(7):1-5.)
- [3] 耿涛,卢广山,张安.基于Vague集的空中标威胁评估群决策方法[J].系统工程与电子技术,2011,33(12):2686-2690.(GENG T, LU G S, ZHANG A. Group decision-making method for air target threat assessment based on Vague sets[J]. System Engineering and Electronics, 2011, 33(12):2686-2690.)
- [4] 王永杰,张喜斌,张恒喜,等.基于TOPSIS方法的空战威胁评估研究[J].电光与控制,2008,15(5):32-34.(WANG Y J, ZHANG X B, ZHANG H X, et al. Threat assessment of air combat based on TOPSIS[J]. Electronics Optics & Control, 2008, 15(5):32-34.)
- [5] 姚成才,苏同领.基于模糊多属性群组决策的雷达辐射源威胁评估方法[J].舰船电子对抗,2012,35(4):34-

38. (YAO C C, SU T L. Evaluation method of radar emitter threat based on fuzzy MAGDM [J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2012, 35(4) :34-38. )
- [6] 王睿甲, 王星, 程嗣怡, 等. 机载 RWR/ESM 中改进最近邻算法的分频段辐射源识别[J]. 火力指挥与控制, 2014, 39(8) :883-885. (WANG R J, WANG X, CHENG S Y, et al. Improved nearest neighbor mating algorithm in radar emitter recognition in airborne RWR/ESM [J]. Fire Control and Command Control, 2014, 39(8) :883-885. )
- [7] 孟祥豪, 罗景青. 基于合成特征参数和脉冲样本图的雷达信号分选[J]. 火力指挥与控制, 2012, 37(9) :50-54. (MENG X H, LUO J Q. Radar signal sorting based on composite characteristic parameter and pulse pattern [J]. Fire Control and Command Control, 2012, 37(9) :50-54. )
- [8] 旷平昌, 王杰贵, 罗景青. 基于脉冲样本图和 Vague 集的雷达辐射源识别[J]. 宇航学报, 2011, 32(7) :1639-1644. (KUANG P C, WANG J G, LUO J Q. Radar emitter recognition based on pulse sequence pattern and Vague set [J]. Journal of Astronautics, 2011, 32(7) :1639-1644. )
- [9] 龚亮亮, 罗景青. 一种基于脉冲样本图的雷达信号特征表述方式[J]. 舰船电子工程, 2008, 28(2) :83-85. (GONG L L, LUO J Q. The expression approach of radar signal character based on the pulse sequence [J]. Ship Electronic Engineering, 2008, 28(2) :83-85. )
- [10] QUAN W, LI P, WU D, et al. A new sorting algorithm for radar emitter recognition [C]//IEEE International Conference on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering (CMCE), 2010:407-410.
- [11] 贾朝文, 周水楼. 机载雷达工作模式识别[J]. 电子信息对抗技术, 2011, 26(1) :14-17. (JIA C W, ZHOU S L. Work mode identification of airborne radar [J]. Electronic Warfare Technology, 2011, 26(1) :14-17. )
- [12] 严利华, 姬宪法, 梅金国. 机载雷达原理与系统[M]. 北京:航空工业出版社, 2010:307-313. (YAN L H, JI X F, MEI J G. Airborne radar theory and system [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2010:307-313. )
- [13] 王星. 航空电子对抗原理[M]. 北京:国防工业出版社, 2008. (WANG X. Principles of aircraft electronic countermeasure [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008. )
- [14] STIMSON G W. 机载雷达导论[M]. 吴汉平, 译. 北京:电子工业出版社, 2005:326-330. (STIMSON G W. Introduction of airborne radar [M]. Translated by WU H P. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005:326-330. )
- [15] 朱宝鏊, 朱荣昌, 熊笑非. 作战飞机效能评估[M]. 2版. 北京:航空工业出版社, 2006:63-68. (ZHU B L, ZHU R C, XIONG X F. Combat aircraft effectiveness evaluation [M]. 2nd ed. Beijing: Aviation Industry Press, 2006:63-68. )
- [16] 张杰, 唐宏, 苏凯. 效能评估方法研究[M]. 北京:国防工业出版社, 2009:66-70. (ZHANG J, TANG H, SU K. Reserch in efficiency assesment [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009:66-70. )

(上接第 9 页)

- [5] 郭锐, 熊耀恒, 李荣旺, 等. 基于月面图像的大气波前倾斜量提取算法的性能分析[J]. 强激光与粒子束, 2009, 21(1) :47-52. (GUO R, XIONG Y H, LI R W, et al. Performance evaluation of atmospheric tip-tilt computing algorithms based on lunar surface images [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2009, 21(1) :47-52. )
- [6] LUHE O V D, WIDENER A L, RIMMELE T, et al. Solar feature correlation tracker for ground-based telescopes [J]. Astron Astrophys, 1989, 224(1-2) :351-360.
- [7] 饶长辉, 姜文汉, 凌宁. 低阶模式校正自适应光学系统的补偿效果分析[J]. 光学学报, 1999, 19(12) :1615-1624. (RAO C H, JIANG W H, LING N. Analysis of compensation effectiveness for adaptive optical system used as low-order modes correction [J]. Acta Optica Sinica, 1999, 19(12) :1615-1624. )
- [8] 饶长辉, 姜文汉, 凌宁. 扩展目标低阶校正自适应光学系统的补偿效果[J]. 量子电子学报, 2001, 18(s) :70-75. (RAO C H, JIANG W H, LING N. Compensation effectiveness analysis of low-order correction adaptive optical system for extend object [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2001, 18(s) :70-75. )
- [9] 李克玉, 田福庆. 光电跟踪系统的共轴跟踪控制技术研究[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(8) :2106-2110. (LI K Y, TIAN F Q. On-axis tracking control technology of electro-optical tracking system [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(8) :2106-2110. )
- [10] 饶长辉, 姜文汉, 凌宁, 等. 低对比度扩展目标跟踪算法[J]. 天文学报, 2001, 42(3) :329-338. (RAO C H, JIANG W H, LING N, et al. Tracking algorithm for low contrast extended object [J]. Acta Astronomica Sinica, 2001, 42(3) :329-338. )