

基于机动特征辅助的 MFR 状态预测方法

陈维高¹, 贾 鑫², 朱卫纲², 唐晓婧²

(1. 航天工程大学研究生院, 北京 101416; 2. 航天工程大学光电装备系, 北京 101416)

摘 要: 针对多功能雷达(Multi-Function Radar, MFR)状态预测方法存在的鲁棒性、预测正确率不佳的问题, 提出一种基于机动特征辅助的 MFR 状态预测方法. 该方法将载机机动信息与常规侦收参数共同作为预测特征集, 一方面利用支持向量回归(Support Vector Regression, SVR)和侦收信号特征集, 得到常规预测模型, 另一方面通过 SVR 和机动特征集, 得到 MFR 各个状态间的转变概率模型; 然后利用 D-S 证据理论得到最终预测状态. 实验结果表明, 与 SVR 和 LSR 方法相比, 平均预测精度分别提高了 6.97% 和 7.2%, 同时具备更优异的鲁棒性. 此外, 提出的预测方法通过进一步的拓展, 可应用于机械设备、道路交通等领域.

关键词: 多功能雷达; 状态预测; 支持向量回归; 机动特征; D-S 证据理论

中图分类号: TN958.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2018)06-1404-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2018.06.019

MFR State Prediction Method Based on Aircraft Maneuvering Features Assistance

CHEN Wei-gao¹, JIA Xin², ZHU Wei-gang², TANG Xiao-jing²

(1. Graduate School, Aerospace Engineering University, Beijing 101416, China;

2. Department of Optoelectronic Equipment, Aerospace Engineering University, Beijing 101416, China)

Abstract: Aiming at the problem of weak robustness and poor accuracy of the traditional multi-function radar (MFR) state prediction methods, a MFR state prediction method aided by maneuvering features is proposed. First of all, the aircraft maneuver features and the conventional reconnaissance parameters work together as the prediction feature set; then, on the one hand, the conventional prediction model can be achieved by support vector regression (SVR) and detected signal feature set; on the other hand, the MFR state transition probability model of each state is obtained by SVR and maneuvering feature set; at last, the eventual prediction state is obtained by the D-S evidence theory. Experimental results show that in comparison with SVR and LSR, the proposed method improves the average prediction accuracy by 6.97% and 7.2% respectively, and meanwhile, it is more robust. The proposed method can be applied to the mechanical equipment, road transport, etc. by further extension.

Key words: multi-function radar; state prediction; support vector regression; aircraft maneuvering features; D-S evidence theory

1 引言

随着电子战系统向着高度自适应的方向发展, 对 MFR 功能意图的预测受到了广泛的关注. 如果能掌握 MFR 功能状态转变规律, 并准确地预测出雷达下一步的功能状态, 将对决策者提供更为充分可靠的情报支援, 降低突防过程中的风险和损伤.

近年来, 许多学者对 MFR 的状态规律进行了深入探索, 其中 Visnevski 等人在形式语言与自动机的基础

上提出了雷达句法模型, 打破了传统的统计特征思想, 以雷达句、短语、字的结构更全面充分地描述了 MFR 的多功能特性, 并利用该模型完成对 MFR 的识别、状态跟踪^[1,2]; 刘海军以句法模型为基础, 研究了 MFR 辐射源的雷达字提取方法, 并将概率思想引入识别算法中, 取得了较好的识别效果^[3]; Haran Arasaratnam 等人借助句法和 Observable Operator Models (OOMs) 模型, 提出利用格子滤波来跟踪 MFR 辐射源状态的变化^[4].

上述对 MFR 的研究取得了一定的成果, 但这些方

法大都止步于对 MFR 当前状态的识别估计,并未对下一步的状态意图进行预测.同时在对 MFR 状态识别的过程中,不仅存在着识别错误率,而且侦察接收机侦收到的 MFR 信号也存在一定的传播、测量和系统误差,因此单纯依靠这些信息进行 MFR 状态预测,必将影响最终预测结果的准确度.针对该问题,从空地战斗撕破敌方防空防线的角度出发,通过分析突防机动特征对 MFR 系统功能状态的影响,提出一种基于 SVR 和机动特征辅助的 MFR 状态预测方法(SVR-TMF).

2 MFR 系统状态分析

以地基防空 MFR 为例,参考文献[5]并结合实际情况,可将系统状态分为“搜索、捕获、跟踪、距离分辨、制导”5 种,各状态之间的简要转换过程可描述为:

MFR 将作用距离划分为多个空域,每个空域由若干波位构成,通常在下面三种情况下对空域内各个波位执行搜索任务^[6]:①未发现目标时,MFR 按内置程序对空域内各个波位执行搜索任务;②依据目标指示数据进行搜索;③一旦丢失目标,即在丢失区域较小范围内进行重新搜索.

一旦探测到目标,立即转入捕获过程,即对发现目标的区域进行 1 次或多次探测照射,如果是虚警则重新转入搜索,否则捕获成功,随即转入跟踪状态.

进入稳定跟踪后,需要依据目标重要性或威胁程度的高低,在跟踪与距离分辨进行转换.当攻击条件满足并收到攻击指令,则迅速转入制导状态,为导弹提供引导数据.当不再需要 MFR 引导数据时,即从制导转变为跟踪;当目标进行规避机动或实施对抗措施时,极有可能导致目标丢失,需要即刻转入搜索状态进行失跟处理.

3 预测特征集构建

3.1 侦收信号特征集

从侦收信号的角度,考虑载频(Carrier Frequency, CF)、脉冲重复周期(Pulse Repetition Interval, PRI)、脉宽(Pulse Width, PW)、数据率(Data Rate, DR)常规描述特征^[7],分析这些特征在 MFR 不同系统功能下的变化,确定用于预测的侦收信号特征集.

(1)CF 作为最重要的雷达特征,与 MFR 的功能状态关联密切.搜索状态时,所需监视的空域广阔,通常采用较低的 CF,而在跟踪制导时,为提高目标的探测精度,采用较高 CF.

(2)MFR 中的 PRI 为多种调制样式组合,根据目标的位置和所执行的任务,选取不同的取值,通常从搜索跟踪到制导状态,PRI 的取值逐渐变小.

(3)MFR 中 PW 变化样式主要分为固定、抖动和可

选择三种,取值规律与 PRI 类似,随搜索到制导状态变化,PW 逐渐变小.

(4)DR 指雷达对同一目标相邻两次照射的时间间隔的倒数,值越大说明 MFR 分配给该目标的时间和能量资源越大,即对该目标的重视程度越高.搜索状态时,由于尚未发现威胁目标,MFR 按内置程序对所属波位依次照射,DR 较低;跟踪制导状态时,为保证目标的跟踪连续性和测量精度,需要较高的 DR.

(5)此外,MFR 各个状态之间的转换是遵循一定规律的,并且相邻状态具备较强的相关性,因此将当前时刻识别出的状态也作为预测特征.

通过上述分析,所构建的侦收信号特征集 $P_t = \{state_t, cf_t, pri_t, pw_t, dr_t\}$,其中 $state_t$ 为 t 时刻识别出的状态, cf_t 、 pri_t 、 pw_t 、 dr_t 分别为 t 时刻侦收到的载频、重复周期、脉宽和数据率.

3.2 机动特征集

从目标运动模型和目标威胁等级两方面来分析适用于 MFR 状态预测的机动特征.

3.2.1 目标运动模型

对于雷达而言,单机在空中的飞行状态可拆分为 3 种^[8]:①俯仰上的上升或下降运动;②方位上的转弯运动;③俯仰、方位都不变的直线运动.针对不同的飞行状态,雷达需要选取相匹配的运动模型来估计运动轨迹,否则将产生较大的跟踪误差,甚至丢失目标.常用于描述目标运动的有匀速、匀加速、当前统计和协调转弯等多种模型,通过这些运动模型得到状态方程后,经过推导计算即可预判目标下一时刻出现的位置,对监控目标有着至关重要的意义.而在诸多目标运动模型中,距离、速度、加速度以及角度信息都是核心参数,因此考虑引入到机动特征集中.

3.2.2 目标威胁等级

导致 MFR 状态转变的“外因”中,最为关键的是目标的威胁等级.决定载机威胁程度的因素有很多^[9],一般从作战能力和相对战术关系两方面进行分析,作战能力主要体现在载机的载弹量、导弹攻击距离等因素,以 δ_c 表示.相对战术关系考虑在空地战斗环境下, t 时刻载机以速度 v 进入某型地基 MFR 的作用距离,相对于 MFR,载机的高度、方位角、俯仰角分别为 H 、 α 、 β ,空间模型如图 1 所示. t 时刻,载机对 MFR 的威胁程度可表示为:

$$\text{threat}_t = \delta_c (\lambda_d f_d(\mathbf{d}_t) + \lambda_v f_v(\mathbf{v}_t') + \lambda_\varphi f_\varphi(\varphi_t)) \quad (1)$$

其中, \mathbf{d}_t 、 \mathbf{v}_t' 、 φ_t 分别代表 t 时刻载机相对 MFR 的距离,径向速度和进入角, $\varphi \in [0, \pi]$ 为载机运动方向与距离延长线的夹角. f_d 、 f_v 、 f_φ 分别代表距离、速度、角度威胁因子函数. λ_d 、 λ_v 、 λ_φ 为威胁加权系数, $\lambda_d + \lambda_v + \lambda_\varphi = 1$ 且 $\lambda_d, \lambda_v, \lambda_\varphi \in (0, 1)$.

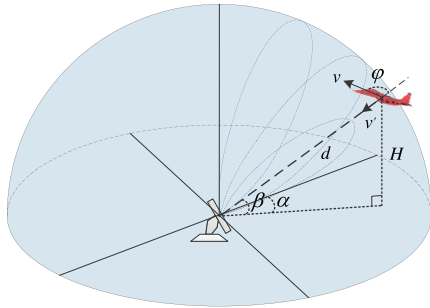


图1 MFR与载机的空间模型

综合运动模型和威胁等级,两者都明确了距离、速度、角度的重要性,此外考虑到加速度对运动状态描述的重要意义以及 MFR 对载机的多种状态都需要加速度参数的辅助才能完成,因而引入加速度特征,确定机动特征集 $Q_i = \{d_i, v_i', a_i, \varphi_i\}$, 由距离、径向速度、径向加速度和进入角构成。

综上所述,可得最终的预测特征集 $O_i = P_i \cup Q_i = \{state_i, cf_i, pri_i, pw_i, dr_i, d_i, v_i', a_i, \varphi_i\}$ 。

4 MFR 状态联合预测方法

MFR 状态联合预测方法分为常规 SVR 预测、分布 SVR 预测和 D-S 融合三部分,首先将侦收信号特征集作为预测特征,进行常规 SVR 预测;然后将机动特征集作为预测特征,借助先验知识对各个状态间的转变生成对应的独立预测模型,进行分布 SVR 预测;最后利用 D-S 证据理论对两个预测结果进行融合,得到最终预测状态。

4.1 常规 SVR 预测

SVR 构建在结构风险最小化和 VC 维理论的基础上,具备全局最优解和强泛化能力,引入核函数后,将原有非线性回归问题转化为高维 Hilbert 空间中的线性问题^[10],因此利用非线性 ε -SVR 从常规侦收信号集的角度来预测 MFR 的状态。

在构建 ε -SVR 预测模型的过程中,将已知的侦收信号特征集 P_i^j 及其对应的下一时刻 MFR 状态 $state_{i+1}^j$, 分别作为训练样本 x_i 和标签 y_i 。通过引入 Lagrange 函数、Gauss 径向基核函数,构造并求解最优化问题,得到决策函数

$$f(x) = \sum_{i=1}^l (\bar{\alpha}_i^* - \bar{\alpha}_i) K(x_i, x) + \bar{b} \quad (2)$$

其中, \bar{b} 可通过 Lagrange 乘子的最优解 $\bar{\alpha}_i$ 或 $\bar{\alpha}_i^*$ 得到。

4.2 分布 SVR 预测方法

通过第 2 小节分析,明确了 MFR 系统状态转变是与目标运动情况密切相关的^[1],这里采用概率来描述 MFR 各状态之间的转变规律,如图 2 和表 1 所示,其中各个状态间的转移概率由目标的运动情况决定。

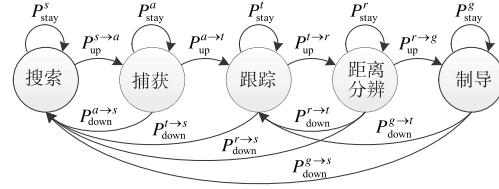


图2 MFR状态转移图

表1 MFR 状态转移概率

	搜索	捕获	跟踪	距离分辨	制导
搜索	P_{stay}^s	$P_{up}^{s \rightarrow a}$	0	0	0
捕获	$P_{down}^{a \rightarrow s}$	P_{stay}^a	$P_{up}^{a \rightarrow t}$	0	0
跟踪	$P_{down}^{t \rightarrow s}$	0	P_{stay}^t	$P_{up}^{t \rightarrow r}$	0
距离分辨	$P_{down}^{r \rightarrow s}$	0	$P_{down}^{r \rightarrow t}$	P_{stay}^r	$P_{up}^{r \rightarrow g}$
制导	$P_{down}^{g \rightarrow s}$	0	$P_{down}^{g \rightarrow t}$	0	P_{stay}^g

倘若能够得到 MFR 各状态间的转移概率函数,即可轻松地预测 MFR 下一步的状态,然而转移概率依据目标运动情况的不同而变化,获取十分困难,因此考虑通过 SVR 分布地寻找目标运动与 MFR 状态间的关系来解决。具体方法如下:

(1) 先验知识划分。将先验知识集 $\{state_i, d_i, v_i', a_i, \varphi_i\}, t \in [1, N-1]$, 其中 N 为先验知识总数,按照 state 的取值 $\{1, 2, 3, 4, 5\}$ 分为 5 类,其中 state 的 5 个取值依次对应图 2 中 MFR 的 5 种状态。对于第 i 类,将下一时刻的状态值 $state_{i+1}^j$ 作为标签,当前时刻的机动信息 $\{d_i^j, v_i^j, a_i^j, \varphi_i^j\}$ 作为预测特征。

(2) 生成分布预测模型。对划分后 5 类的先验知识集,利用 SVR 进行训练,得到相应的预测模型 model。

(3) 状态预测。对新到来的目标进行状态预测时,首先对当前状态进行识别 $state_i$, 然后按照识别结果,利用相应的预测模型 model 和机动特征,对目标下一步状态进行预测。

4.3 D-S 证据理论融合

D-S 证据理论是在 Bayes Theory 基础上构建的决策融合方法,通过构建证据体、量化决策信任程度以及引入信任函数的方法来衡量决策信息的不确定程度^[11]。

在利用 D-S 证据理论对两种预测结果进行融合时,将 MFR 的 5 种状态作为辨识框架,具备 A、B 两个证据源,即 A 代表利用 SVR 和侦收信号特征集 P_i 训练样本,得到的 MFR 预测状态概率集;B 代表利用 3.2 小节分布 SVR 和机动特征集 Q_i 训练样本,得到的 MFR 预测状态概率集。整个融合过程可分为证据体构建、信任函数和似真函数的构建、按合成规则生成各状态的概率三部分,最后选择概率最大的作为预测状态。

5 实验

实验背景设定为空地战斗中单架载机进入某型 MFR 的作用距离,针对载机的机动状态和威胁等级, MFR 按照内置状态转移规律(如图 2 所示)自适应地改变功能状态,并对载机发射相应的侦察信号,载机则根据侦察信号参数和自身机动特征预测出 MFR 下一步的状态。

表 2 载机按轨迹 1 飞行过程中预测特征与 MFR 状态示例

序号	机动特征集				侦察信号特征集				MFR 状态
	d/km	$v'/\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$	a/g	$\varphi/(\circ)$	CF/MHz	PRI/ μs	PW/ μs	DR/Hz	
1	299.05	1184.37	0.94	123.02	1163.16	2682.29	129.57	0.12	搜索
2	248.91	631.56	2.84	156.08	2925.12	1419.53	50.62	0.61	捕获
3	243.84	792.21	0.67	159.17	2852.53	1276.91	75.91	0.82	跟踪
4	161.88	903.71	0.12	129.95	2500.86	2100.34	62.12	0.60	距离探测
5	145.49	417.23	2.38	113.65	5460.35	690.16	2.50	10.11	制导
6	151.55	-962.90	-0.68	54.12	3476.88	2488.38	105.61	0.52	跟踪
7	153.79	-862.01	-0.95	51.86	3398.27	1342.13	75.92	0.82	跟踪
8	286.33	-1102.67	-2.75	68.79	1236.13	2880.05	51.66	0.23	搜索

g 指代重力加速度 $g=9.8\text{m/s}^2$

5.1 状态预测对比分析

实验选择图 3 轨迹 1 飞行过程中的预测特征集 O_i 和真实 MFR 状态作为先验知识,利用提出的基于机动特征辅助的 MFR 状态预测方法(SVR-TMF)、常规 SVR 和最小二乘回归(Least Square Regression, LSR)三种方法,预测载机在轨迹 2、3、4 飞行过程中 MFR 系统状态,进行对比分析.利用预测正确率(Prediction Accuracy, PA)作为评价指标,设 l 为预测总次数, $\text{state}_{\text{pre}}^i$ 和 $\text{state}_{\text{true}}^i$ 分别为第 i 次的预测状态和真实状态,其中 $i \in \{1, 2, \dots, l\}$, 则

$$\text{PA} = \frac{\text{num}(\text{state}_{\text{true}} = \text{state}_{\text{pre}})}{l} \quad (3)$$

其中, $\text{num}(\text{state}_{\text{true}} = \text{state}_{\text{pre}})$ 指预测状态与真实状态相同的个数。

载机按轨迹 2、4 飞行过程中,利用 SVR-TMF、SVR 以及 LSR 三种方法对 MFR 系统状态的预测结果如图 4、5 所示,整体预测结果如表 3 所示。

表 3 SVR-TMF、SVR 和 LSR 方法状态预测精度评价

评估指标	PA/%			
轨迹	1	2	3	4
SVR-TMF	94.87	95.88	96.10	94.95
SVR	86.82	90.49	88.50	88.10
LSR	86.60	90.19	88.35	87.86

为模拟真实情况,实验中 MFR 存在丢失目标的现象,且丢失概率与目标的运动情况相关.图 4(b) 和 5(b) 为预测结果的局部图,分别对应图 4(a) 和 5(a) 中红色虚线框内的时段.从图 4、5 可以看出,对于 SVR 和 LSR 方法,由于缺乏了机动特征集的信息支撑,因此对于变化频繁的跟踪、距离探测状态的预测性能较差. SVR-TMF 方法借助了机动特征集,并且利用分布 SVR、融合的思想,状态预测错误较低。

通过表 3 可知,利用 SVR-TMF 方法对 MFR 状态的平均预测精度为 95.45%, 而 SVR 和 LSR 方法的平均预测精度分别为 88.48% 和 88.25%, 显然提出的 SVR-TMF 方法在同等条件下的预测精度优于其它两种方法,具备较强的 MFR 状态预测能力。

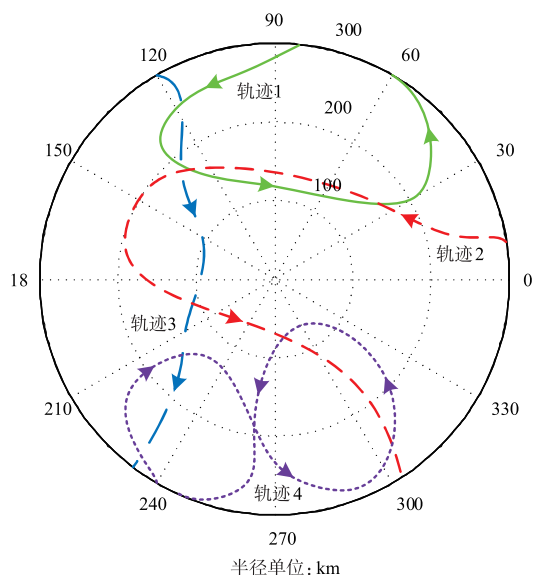


图 3 载机轨迹

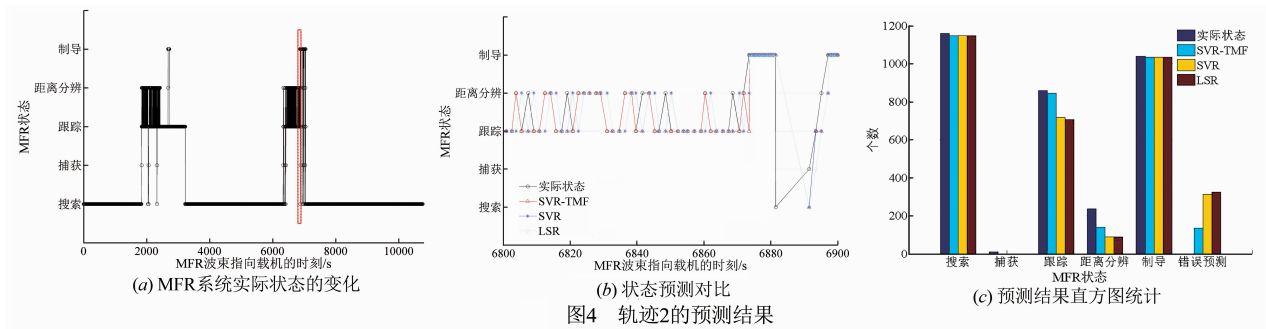


图4 轨迹2的预测结果

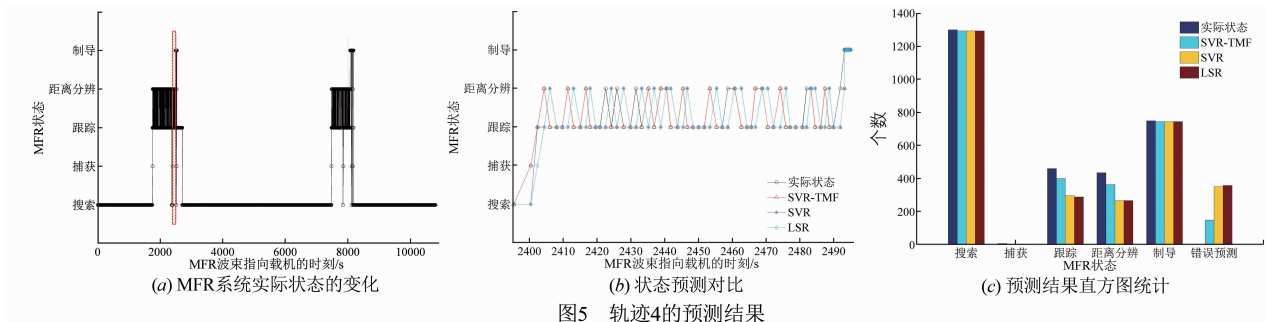


图5 轨迹4的预测结果

5.2 误差对预测结果的影响

为验证 SVR-TMF 方法的鲁棒性,在先验知识保持不变的前提下,逐步增加用于测试的输入参数误差,对比分析三种方法的预测结果.对于侦收信号特征集 $\{state_i, cf_i, pri_i, pw_i, dr_i\}$,参数 cf_i, pri_i, pw_i, dr_i 不可避免地存在传播和测量误差,这些误差必然导致 MFR 状态 $state_i$ 识别准确率的下降,因而实验中设定的误差包含侦收参数误差 σ 和状态识别错误率 δ 两方面,且两者相关.

$$\sigma = \frac{P_{rec}}{P_{ture}} \pm 1 \quad (4)$$

$$\delta = \frac{\text{num}(state_{true} \neq state_{rec})}{l} \quad (5)$$

其中, P_{ture} 和 P_{rec} 分别为实际参数值和侦收到的参数值, $state_{rec}$ 为识别出的 MFR 状态.

以载机按轨迹 2 飞行为例,分别利用 SVR-TMF、SVR 以及 LSR 三种方法对 MFR 系统状态的预测正确率如图 6 所示.

从图 6 可以看出,随着侦收参数误差 σ 和状态识别误差 δ 的增大,三种方法的 MFR 状态预测正确率都迅速下降. SVR-TMF 和 SVR 方法侦收信号特征集相同,受 σ 和 δ 的共同影响,而 LSR 方法以识别出的状态为预测特征,仅受 δ 的影响,因而在逐步增加误差 (σ 较 δ 变化幅度大) 的过程中,SVR-TMF 和 SVR 方法的等效误差是大于 LSR 方法的,预测正确率逐渐趋于甚至低于 LSR 方法.在 $\sigma \leq 30\%$ 、 $\delta \leq 15\%$ 条件下,相对于 SVR 和 LSR 方法,所提出的 SVR-TMF 具备较好的预测正确

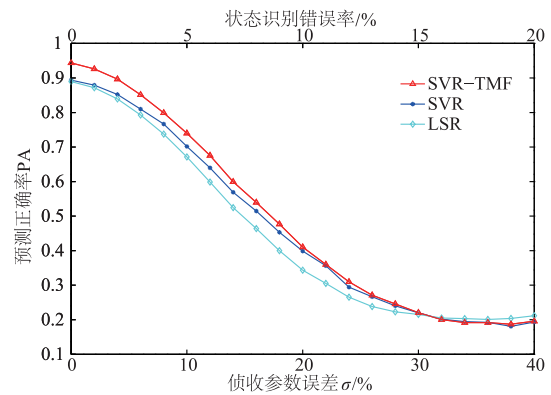


图6 预测正确率受误差的影响(轨迹2)

率,但为了满足预测正确率 $PA \geq 80\%$,需要 $\sigma \leq 8\%$ 的前提下,进一步降低状态识别误差.

6 结论

(1) 提出将机动信息与常规侦收参数共同作为预测特征集,能够更充分地描述 MFR 状态转变规律,在一定程度上提高了 MFR 状态预测的鲁棒性.

(2) 提出了 SVR-TMF 状态预测方法,将 MFR 状态转变规律概率化,通过 SVR、侦收信号特征集和机动特征集,得到常规预测模型和各个状态间的转变概率模型,引入 D-S 证据理论融合预测结果.虽然时间消耗略有增加,但较常规 SVR 和 LSR 方法,具备更优异的状态预测正确率.

参考文献

[1] Wang A, Krishnamurthy V. Signal interpretation of multi-

- function radars; modeling and statistical signal processing with stochastic context free grammar [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2008, 56(3): 1106 – 1119.
- [2] Visnevski N, Krishnamurthy V, Wang A, et al. Syntactic modeling and signal processing of multifunction radars: a stochastic context-free grammar approach [J]. Proceedings of the IEEE, 2007, 95(5): 1000 – 1025.
- [3] 刘海军. 雷达辐射源识别关键技术研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010. 105 – 128.
LIU Hai-jun. Researches on Identification Key Technology for Radar Emitter [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010. 105 – 128.
- [4] Arasaratnam I, Haykin S, Kirubarajan T, et al. Tracking the mode of operation of multi-function radars [A]. Sherwood Boehlert. 2006 IEEE Conference on Radar [C]. New York, USA: IEEE, 2006. 233 – 238.
- [5] Visnevski N. Syntactic Modeling of Multi-Function Radars [D]. Hamilton: McMaster University, 2005. 77 – 85.
- [6] 马爽. 多功能雷达电子情报信号处理关键技术研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2013. 46 – 50.
MA Shuang. Research on ELINT Signal Processing Key Technologies for Multifunction Radar [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2013. 46 – 50.
- [7] 何明浩, 韩俊. 现代雷达辐射源信号分选与识别 [M]. 北京: 科学出版社, 2016. 137 – 159.
- [8] 汪飞. 低截获概率机载雷达信号处理技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2015. 20 – 25.
- [9] 谢希权, 易华. 机载多目标攻击武器系统信息处理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2012. 112 – 115.
- [10] Basak D, Pal S, Patranabis D C. Support vector regression [J]. Neural Information Processing Letters & Reviews, 2007, 11(10): 203 – 224.

- [11] Dong G, Kuang G. Target recognition via information aggregation through Dempster – Shafer's evidence theory [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2015, 12(6): 1247 – 1251.

作者简介



陈维高 (通信作者) 男, 1990 年生于河南禹州. 现为航天工程大学光电装备系博士研究生. 主要研究方向为雷达对抗和雷达信号处理.
E-mail: tingxue9278@163.com



贾鑫 男, 1958 年生于江苏邳县. 现为航天工程大学教授、博士生导师. 主要研究方向电子对抗和雷达信号处理.
E-mail: 13910413166@139.com



朱卫纲 女, 1973 年生于河北沧州. 现为航天工程大学副教授、硕士生导师. 主要研究方向为现代信号处理、空间信息对抗.
E-mail: yi_yun_hou@163.com



唐晓婧 女, 1986 年生于云南昆明. 现为航天工程大学光电装备系讲师. 主要研究方向为雷达信号处理.
E-mail: tang_0637215@126.com