

引用格式:张永利,计文平,雷川.证据冲突情况下舰载机群多传感器目标识别[J].电光与控制,2018,25(3):15-19. ZHANG Y L, JI W P, LEI C. Multi-sensor target identification under evidence conflict for carrier aircraft fleet[J]. Electronics Optics & Control, 2018, 25(3):15-19.

## 证据冲突情况下舰载机群多传感器目标识别

张永利, 计文平, 雷川

(中国电子科技集团公司电子科学研究院,北京 100041)

**摘要:** 针对海战场协同探测系统的多种传感器容易出现信息不确定、不完全、甚至高度冲突的问题,利用 DSmH 融合规则和成比例的冲突再分配规则(PCR),解决证据源冲突消解问题。通过仿真对各种融合规则进行比较分析,为航母编队舰载机群多传感器目标综合识别提供理论支撑和借鉴。

**关键词:** 证据冲突; 目标识别; 多传感器证据源; DSmH; PCR

**中图分类号:** E911; TN202 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2018.03.004

## Multi-Sensor Target Identification Under Evidence Conflict for Carrier Aircraft Fleet

ZHANG Yong-li, JI Wen-ping, LEI Chuan

(China Academy of Electronics and Information Technology, Beijing 100041, China)

**Abstract:** Considering that in the naval battlefield, the information detected by the multiple sensors of the collaborative detection system are uncertain, incomplete and even in conflict, we used the DSmH fusion rules and Proportional Conflict Redistribution (PCR) rules to solve the conflicting and offsetting problem of the evidence sources. Comparison was made to different fusion rules by simulation, in order to provide a theoretical support for carrier aircraft fleet to implement multi-sensor synthetic target identification.

**Key words:** evidence conflict; target identification; multi-sensor source for evidence; DSmH; PCR

### 1 简介

2016年1月18日,在夏威夷太平洋导弹靶场,美国海军“阿利·伯克”级导弹驱逐舰“约翰·保罗·琼斯”号发射一枚“标准”-6(SM-6)防空导弹(如图1所示),击沉了作为靶船的退役“佩里”级导弹驱逐舰“鲁宾·詹姆斯”号,旨在验证“分布式杀伤”作战思想。



图1 “标准”-6导弹从导弹驱逐舰上发射

Fig. 1 SM-6 missile launched from a missile destroyer

“分布式杀伤”将传统航母战斗群化整为零的同时,又保持了每支编队的攻防威力。“分布式杀伤”增加了我军“反介入/区域拒止”系统探测、识别重要目标和非重要目标、主力舰和辅助舰船的难度,难以明确美军的主攻方向和任务性质<sup>[1-2]</sup>。同时,舰载机以航空母舰或其他军舰为基地,具有作战速度快、作用距离远、效率高以及机动灵活等特点。舰载电子战飞机、舰载战斗攻击机、舰载预警机、直升机和运输机一起组成航母舰载机联队<sup>[3]</sup>。其中,福特级航母舰载机联队一天能打击的目标数量由现在的尼米兹级的700个增加到1200个,福特级航母舰载机联队能力见表1。

海战场协同探测系统采用不同工作模式或体制的传感器共同完成协同探测、信息互补,实现对目标的精确定位、跟踪和识别,对于提高海上编队的作战效能具有重要的意义。海战场协同探测系统装备有雷达、ESM、光电/红外等多种传感器。其中:雷达可以获得目标的距离、方位、速度等信息;ESM可以获取目标的辐射源特征信息;光电/红外传感器测角精度高,获取目标图像能力强<sup>[4]</sup>。将多传感器获取的信息进行融合,可以提高对目标的识别率。但是在复杂的战场环境下,各传感

收稿日期:2017-04-11

修回日期:2017-12-29

作者简介:张永利(1971—),女,黑龙江安达人,博士,高工,研究方向为传感器管理、信息融合、无人机等。

器容易受到各种因素的影响和干扰,因此导致提供的信息不确定、不完全甚至高度冲突。针对在证据高冲突情况下 DST(Dempster-Shafer Theory)证据理论不能解决的多传感器信息融合问题,利用 DSmH(DSm Hybrid)融合规则,对不同传感器提供的目标识别证据进行空间域和时间域的决策融合<sup>[5]</sup>。DEZERT 和 SMARANDACHE 同时提出成比例的冲突再分配规则(Proportional Conflict Redistribution Rules,PCR),直接将冲突信度按照一定的比例关系分配到非空集部分,主要有 5 种 PCR 规则即 PCR1 ~ PCR5<sup>[6-9]</sup>。本文针对多传感器信息融合冲突因子高于一定的阈值时,结合 DST 证据理论,利用 DSmH 和 PCR1 ~ PCR5 对目标自适应地进行综合识别,并进行仿真分析,为解决多传感器证据源冲突消解问题,更好地实现综合目标识别提供理论支撑和借鉴。

表 1 福特级航母舰载机联队的能力

Table 1 Capability of the Carrier Air Wing of the Ford-class aircraft carrier

飞机型号	最大航速	最大续航时间/h	载荷/lb	进场速度/kn	作战半径/n mile	航程/n mile
E-2D“先进鹰眼”预警机	325 kn	10		103		1541
F-35C 多用途战斗机	马赫数 1.6	10	8000	125	600 +	1200 +
F/A-18E/F “超级大黄蜂”	马赫数 1.8	10	8000	125	400	1275
E/A-18G “咆哮者”	马赫数 1.8	10	8000	125	400	1500
X-47B 型无人战斗机	500 kn	50	4500	125	1500	3500 +
舰载空中监视与打击无人机 UCLASS(MQ-25)		12	3000		1200	2000 +

## 2 证据组合规则

给定一个基本辨识框架(Frame of Discernment, FoD) $\Theta$ ,若有  $m: D^\Theta \rightarrow [0, 1]$  满足条件<sup>[8]</sup>

$$\begin{cases} m(\emptyset) = 0 \\ \sum_{A \in D^\Theta} m(A) = 1 \end{cases} \quad (1)$$

则定义  $m(A)$  为  $A$  的基本信度分配函数(Basic Belief Assignment, BBA)<sup>[10]</sup>,其信任函数(Belief Function)和似真函数(Plausibility Function)分别为

$$Bel(X) = \sum_{Y \in D^\Theta, Y \subseteq X} m(Y) \quad (2)$$

$$Pl(X) = \sum_{Y \in D^\Theta, X \cap Y \neq \emptyset} m(Y) \quad (3)$$

式中: $Bel(X)$  表示  $X$  的所有子集的基本信度分配之

和; $Pl(X)$  表示所有与  $X$  相交的集合的基本信度分配之和,且有  $Bel(X) \leq Pl(X)$ ,  $Pl(X) - Bel(X)$  表示对  $X$  不确定的信息, $Bel(\bar{X})$  表示对  $X$  不知道的置信函数。

### 2.1 经典 DST 合成规则

考虑对于自由 DST 模型的融合问题。假设同一识别框架  $\Theta$  下的 2 条独立的、不确定的信源,定义在  $(D^U$  (或  $D^U$  的任何子集)上的 2 个广义基本概率赋值函数  $m_1(\cdot)$  和  $m_2(\cdot)$ ,经典 DS 组合准则为

$$m_{M'}(A) \equiv m(\cdot) \triangleq [m_1 \oplus m_2](A) = \frac{\sum_{X_1, X_2 \in D^U, X_1 \cap X_2 = A} m_1(X_1) m_2(X_2)}{1 - k} \quad (4)$$

式中: $k = \sum_{\substack{X_1, X_2 \in D^U \\ X_1 \cap X_2 = \emptyset}} m_1(X_1) m_2(X_2)$ ,且定义  $m_{M'}(\emptyset) = 0$ 。

### 2.2 混合合成规则(DSmH)

混合合成规则(DSmH)是建立在 DSmT 框架上解决冲突信息的第一个组合规则。对于 2 个独立证据源, $M(\Theta)$  定义为  $\forall A \in D^\Theta$ ,有

$$m_{M(\Theta)}(A) = \phi(A) (S_1(A) + S_2(A) + S_3(A)) \quad (5)$$

式中: $\phi(A)$  为集合  $A$  的特征非空函数,即如果  $\forall A \notin \varphi$ ,  $\phi(A) = 1$ ,否则  $\phi(A) = 0$ ;  $\varphi(\emptyset_M, \emptyset)$ ,  $\emptyset_M$  是属于  $D^\Theta$  的在给定的混合模型  $M(\Theta)$  下被强制成为空集的所有元素的集合。 $S_1(A)$ ,  $S_2(A)$ ,  $S_3(A)$  分别定义为

$$S_1(A) \triangleq \sum_{X_1, X_2 \in D^\Theta, X_1 \cap X_2 = A} m_1(X_1) m_2(X_2) \quad (6)$$

$$S_2(A) \triangleq \sum_{\substack{X_1, X_2 \in D^\Theta \\ [u(X_1) \cup u(X_2) = A] \vee [u(X_1) \cup u(X_2) \in \emptyset] \wedge (A = I_i)}} m_1(X_1) m_2(X_2) \quad (7)$$

$$S_3(A) \triangleq \sum_{X_1, X_2 \in D^\Theta, X_1 \cup X_2 = A, X_1 \cap X_2 = \emptyset} m_1(X_1) m_2(X_2) \quad (8)$$

式中: $U \triangleq u(X_1) \cup u(X_2)$ ,  $I_i \triangleq \theta_1 \cup \theta_2$ ,代表未知集; $S_1(A)$  对应经典 DSmT 理论对基于自由 DSmT 模型  $M^f(\Theta)$  的  $K$  个独立证据源的处理; $S_2(A)$  是所有绝对空集和相对空集的信度质量传递给总的或相对未知集; $S_3(A)$  是将相对空集映射到非空集合上的传递函数。

### 2.3 成比例分配冲突规则(PCR)

下面介绍在 DST 和 DSmT 框架下,将冲突信度成比例重新分配的 5 种分配规则 PCR。其中,PCR1 和 PCR2 将整个冲突信度重新分配,PCR3 和 PCR5 重新分配部分冲突信度,PCR4 是 DS 规则的改进。

#### 2.3.1 证据源组合规则——PCR1 理论

$$m_{\text{PCR1}}(X) = \sum_{X_1, X_2 \in D^\Theta, X_1 \cap X_2 = X} m_1(X_1) m_2(X_2) + \frac{c_{12}}{d_{12}} \cdot k_{12} \quad (9)$$

式中: $c_{12}$  是信度矩阵  $\mathbf{M} = (m_1 \ m_2)^\top$  所在列的和; $k_{12}$  是冲突系数; $d_{12}$  是对所有非空集的非零列的和求和。

2.3.2 证据源组合规则——PCR2 理论

$$m_{\text{PCR2}}(X) = \sum_{X_1, X_2 \in G^\theta, X_1 \cap X_2 = X} m_1(X_1)m_2(X_2) + C(X) \frac{c_{12}}{e_{12}} \cdot k_{12} \quad (10)$$

式中： $C(X) = \begin{cases} 1 & X \text{ 有冲突} \\ 0 & \text{否则} \end{cases}$ ； $e_{12}$  是对所有冲突的非空集的非零列的和求和。

2.3.3 证据源组合规则——PCR3 理论

$$m_{\text{PCR3}}(X) = \sum_{X_1, X_2 \in G^\theta, X_1 \cap X_2 = X} m_1(X_1)m_2(X_2) + \left( c_{12} \cdot \sum_{Y \in G^\theta, Y \cap X = \emptyset} \frac{m_1(Y)m_2(X) + m_1(X)m_2(Y)}{c_{12}(X) + c_{12}(Y)} \right) + \sum_{\substack{X_1, X_2 \in G^\theta \setminus |X| \cap \emptyset \\ X_1 \cap X_2 = \emptyset \\ u(X_1) \cup u(X_2) = X}} (m_1(X_1)m_2(X_2) + m_1(X_2)m_2(X_1)) + \left[ \emptyset_\theta(X) \sum_{\substack{X_1, X_2 \in G^\theta \setminus |X| \cap \emptyset \\ X_1 \cap X_2 = \emptyset \\ u(X_1) \cup u(X_2) = \emptyset}} (m_1(X_1)m_2(X_2) + m_1(X_2)m_2(X_1)) \right] \quad (11)$$

式中： $\emptyset_\theta(X) = \begin{cases} 1 & X = \theta_1 \cup \theta_2 \cup \dots \cup \theta_n \\ 0 & \text{否则} \end{cases}$ 。

2.3.4 证据源组合规则——PCR4 理论

若对于信息源  $s=2, \forall X \in G^\theta \setminus \{\emptyset\}$

$$m_{\text{PCR4}}(X) \triangleq \sum_{\substack{X_1, X_2 \in G^\theta \\ X_1 \cap X_2 = X}} m_{12}(X) \cdot \left[ 1 + \sum_{\substack{Y \in G^\theta \\ Y \cap X = \emptyset}} \left( 1 + \frac{m_{12}(X \cap Y)}{m_{12}(X) + m_{12}(Y)} \right) \right] \quad (12)$$

式中： $m_{12}(X)$  和  $m_{12}(Y)$  非零，且  $m_{12}(X) = \sum_{\substack{X_1, X_2 \in G^\theta \\ X_1 \cap X_2 = X}} m_1(X_1) \cdot m_2(X_2)$ 。

2.3.5 证据源组合规则——PCR5 理论

设  $m_1(\cdot)$  和  $m_2(\cdot)$  是 2 个独立的基本信度分配，则对于 2 个证据源的 PCR5 组合规则如下

$$m_{\text{PCR5}}(X) \triangleq \sum_{\substack{X_1, X_2 \in G^\theta \\ X_1 \cap X_2 = X}} m_1(X_1)m_2(X_2) + \sum_{\substack{Y \in G^\theta \\ Y \cap A = \emptyset}} \left( \frac{m_1(X)^2 m_2(Y)}{m_1(X) + m_2(Y)} + \frac{m_2(X)^2 m_1(Y)}{m_2(X) + m_1(Y)} \right) \quad (13)$$

3 证据冲突情况多传感器目标识别步骤

DST 在低冲突下融合效果好，算法复杂度低，但是难以解决高度冲突情况下目标识别问题，结合 DSmH/PCR1 ~ PCR5 融合规则，对辐射源目标进行身份识别，步骤如下：

1) 多传感器获取辐射源目标的广义基本信度分配函数，计算冲突因子  $k$ ；

2) 根据自适应门限相关研究<sup>[11-12]</sup>，设定阈值  $T$  为 0.667 时，当冲突因子  $k$  小于预设阈值  $T$  时，采用 DST 理论进行融合；

3) 当冲突因子  $k$  大于预设阈值  $T$  时，使用 DSmH/PCR 融合规则，计算组合后的信度，按照不同的比例关系分配冲突信度到非空集部分；

4) 根据决策规则确定目标身份。

证据冲突情况下多传感器目标识别算法流程如图 2 所示。

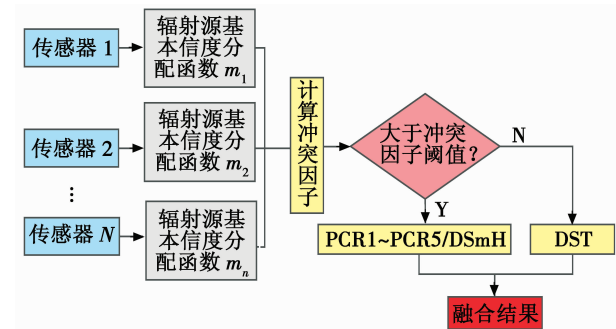


图 2 证据冲突情况下多传感器目标综合识别流程图

Fig. 2 Flow chart of target identification by multiple sensors with conflict evidence

4 DSmH/PCR 在多目标识别中的应用

4.1 两种辨识框架的目标识别

假设分别有 2 种传感器雷达、红外 ( $C_i, i=1,2$ ) 对航母编队舰载机群进行识别。辐射源目标有 2 种不同辨识框架  $\theta = (A, B)$ ，分别代表 EA-18G 舰载电子战飞机和“超级大黄蜂”舰载战斗机。由 2 种传感器确定的基本信度分配函数分别表示为  $m_{c_i} (i=1,2)$ ，如表 2 所示。

根据上述对证据冲突情况下多传感器目标综合识别流程，计算 2 个传感器综合目标识别的冲突因子  $k = 0.72 > 0.667$ ，根据式(4) ~ 式(13)，利用 DSmH/PCR 融合规则对基本信度分配  $m_{c_1}(\cdot)$  和  $m_{c_2}(\cdot)$  进行融合，综合识别率见表 2。

表 2 两个传感器两种识别框架综合识别

Table 2 Integrated recognition by two sensors under two identification frameworks

因子	A	B	A ∪ B
$m_{c_1}(\cdot)$	0.9	0.05	0.05
$m_{c_2}(\cdot)$	0	0.8	0.2
DSmH <sup>12</sup> ( $\cdot$ )	0.18	0.09	0.73
$m_{\text{PCR1}}^{12}(\cdot)$	0.5040	0.3960	0.1000
$m_{\text{PCR2}}^{12}(\cdot)$	0.5503	0.4397	0.0100
$m_{\text{PCR3}}^{12}(\cdot)$	0.5503	0.4397	0.0100
$m_{\text{PCR4}}^{12}(\cdot)$	0.6600	0.3300	0.0100
$m_{\text{PCR5}}^{12}(\cdot)$	0.5612	0.4288	0.0100

通过仿真可看出,DSmH 没有识别出目标,PCR1 ~ PCR5 均识别出目标为 EA-18G 舰载电子战飞机。相比 DSmH 证据理论,PCR1 ~ PCR5 将冲突分解,目标识别率更高,识别效果更加明显,仿真如图 3 所示。

当有第 3 个传感器 ESM 加入,基本信度分配函数为  $m_{c_3}(\cdot) = (0.7, 0.1, 0.2)$ 。由于第 3 个传感器加入后,与  $m_{12}$  融合后的冲突因子  $k < 0.667$ ,考虑利用 DST 证据理论进行融合,融合结果见表 3。

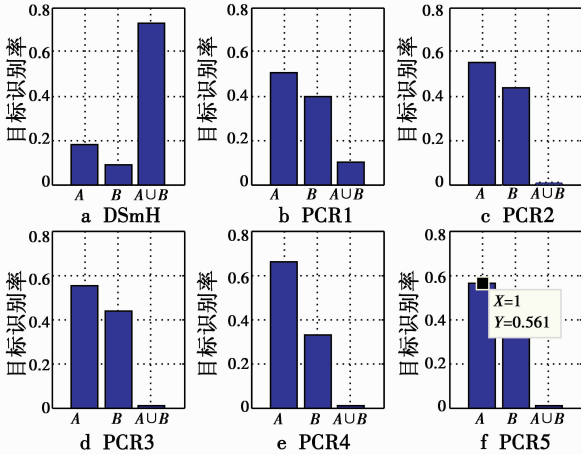


图 3 2 个传感器 2 种辨识框架综合识别仿真

Fig. 3 Simulation for integrated recognition by two sensors under two identification frameworks

表 3 基于 DST 的 3 个传感器 2 种识别框架综合识别

Table 3 Integrated recognition by three sensors under two frameworks based on DST

因子	A	B	AUB
$m_{c_1}(\cdot)$	0.9	0.05	0.05
$m_{c_2}(\cdot)$	0	0.8	0.2
$m_{c_3}(\cdot)$	0.7	0.1	0.2
$m_{DSmH^{12}}(\cdot)$	0.7787	0.1916	0.0297
$m_{PCR1-DST}^{123}(\cdot)$	0.8927	0.0895	0.0177
$m_{PCR2-DST}^{123}(\cdot)$	0.9012	0.0963	0.0001
$m_{PCR3-DST}^{123}(\cdot)$	0.9012	0.0963	0.0001
$m_{PCR4-DST}^{123}(\cdot)$	0.9453	0.0525	0.0000
$m_{PCR5-DST}^{123}(\cdot)$	0.8965	0.1011	0.0001

由表 3 可以看到,与第 3 个传感器基于 DST 规则的融合结果,相比单纯利用 DSmH/PCR 规则识别率更高,而且算法复杂度降低,识别效果更好,仿真如图 4 所示。

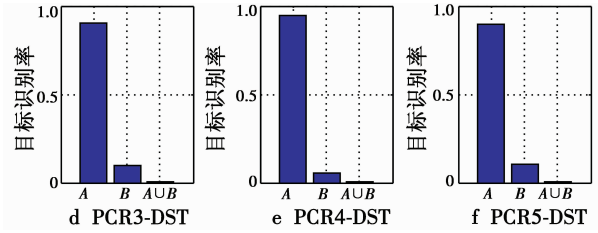
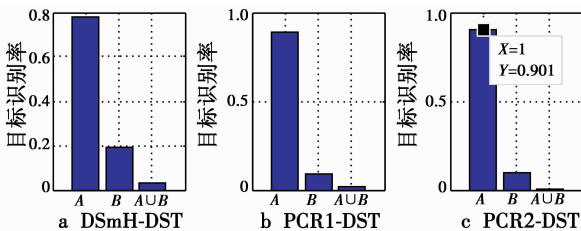


图 4 基于 DST 的 3 个传感器 2 种识别框架综合识别仿真

Fig. 4 Simulation for integrated recognition by three sensors under two frameworks based on DST

### 4.2 3 种辨识框架的目标识别

假设目标敌我属性有 3 种不同辨识框架  $\Theta = (A, B, C)$ ,分别代表 EA-18G 舰载电子战飞机、“超级大黄蜂”舰载战斗机、E-2D“先进鹰眼”。由 2 种传感器  $C_i (i = 1, 2)$  对空中目标进行识别。确定的基本信度分配函数分别表示为  $m_{c_i} (i = 1, 2)$ 。2 种传感器  $C_i$  的目标综合识别结果见表 4。

当 2 种传感器的基本概率赋值出现极度冲突,即  $m_1(B) = 0, m_2(A) = 0$  时,冲突因子  $k > 0.667$ ,DST 规则无法得出合理的识别结果,则需利用 DSmH/PCR 规则进行信息融合,目标识别结果见表 4。

表 4 2 个传感器 3 种识别框架综合识别

Table 4 Integrated recognition by two sensors under three frameworks

因子	A	B	C	AUB	AUC	BUC
$m_{c_1}(\cdot)$	0.9	0	0.1			
$m_{c_2}(\cdot)$	0	0.8	0.2			
$DSmH^{12}(\cdot)$	0	0	0.02	0.72	0.18	0.08
$m_{PCR1}^{12}(\cdot)$	0.4410	0.3920	0.1670			
$m_{PCR2}^{12}(\cdot)$	0.4410	0.3920	0.1670			
$m_{PCR3}^{12}(\cdot)$	0.5162	0.3970	0.0868			
$m_{PCR4}^{12}(\cdot)$	0.3812	0.3388	0.2800			
$m_{PCR5}^{12}(\cdot)$	0.5284	0.4099	0.0616			

通过仿真可以看出,DSmH 没有得到关于目标的明确的识别结果,PCR1 ~ PCR5 均可以识别出目标为 EA-18G 舰载电子战飞机。其中,PCR5 对目标识别精度最高,但是通过对各种规则的基本运算次数进行分析,可知 PCR3 和 PCR5 的算法复杂度高,系统实时性差;PCR1 和 PCR2 精度逊于 PCR3 和 PCR5,但是算法复杂度亦低;PCR4 精度最低,但算法复杂度也低,时间效率高,仿真如图 5 所示。

综上所述,基于 DSmH 证据理论进行多传感器信息融合,在证据冲突的情况下,不易得到明确的识别结果。基于 PCR1 ~ PCR5 融合规则的多传感器信息融合,通过降低探测信息的不确定性,实现对目标的综合识别。但对于 PCR1 ~ PCR5 融合规则之间,各自的识

别置信度略有不同,且识别的不确定性亦略有差别,这取决于对冲突分配原则的不同选择。可以结合对算法复杂度和精度的要求确定选择何种融合规则。

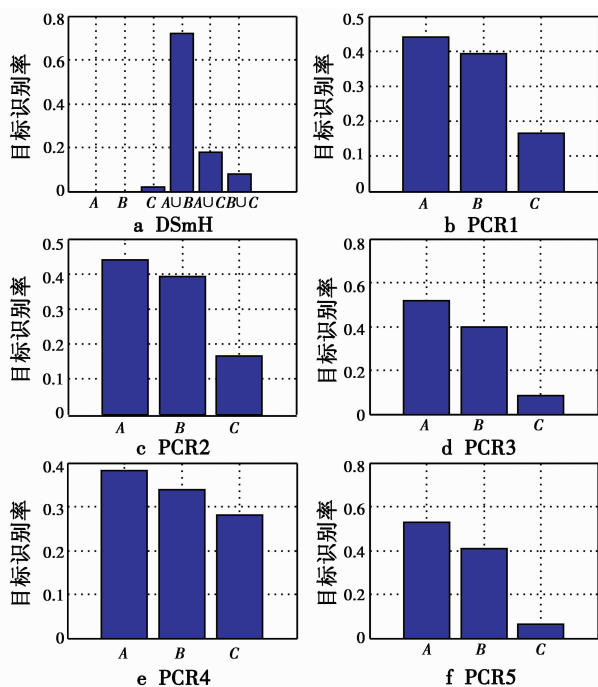


图5 2个传感器3种辨识框架高度冲突情况下综合识别仿真

Fig. 5 Simulation of integrated recognition by two sensors under three frameworks with highly conflict evidence

## 5 结束语

本文介绍将来自不同信息源的置信度进行自适应融合,当出现证据冲突时,通过使用 DSMT/PCR1 ~ PCR5 规则将冲突成比例重新分配,增加了融合信息的精确性。当信息源产生冲突,可能是传感器探测质量下降,分类器发生故障,探测目标行为异常等原因。通过跟踪需要进行冲突重新分配的基本概率赋值函数,找到造成

冲突的信息源,若分类器和传感器运转正常,则表明是探测目标异动,对于提高海战场态势感知能力是很有价值的。

## 参考文献

- [1] 米格. 中国舰空导弹打击水面目标的意义[J]. 现代舰船, 2016(8):54-57.
- [2] 陈和彬. 海军作战方式要重新洗牌? ——解读美国“分布式杀伤”作战概念[J]. 兵工科技, 2016(21):44-47.
- [3] 安东. 闯入南海的美航母编队[J]. 兵工科技, 2016(7):6-10.
- [4] 狄方旭, 王小平, 林秦颖, 等. 雷达与红外数据融合的近距空中目标识别[J]. 光电与控制, 2014, 21(9):54-57.
- [5] 张永利, 计文平, 张靖. 基于 DSMT 的不同时域多传感器目标识别方法研究[J]. 昆明理工大学学报, 2013, 38(5):106-110.
- [6] FLORENTIN S, JEAN D. Advances and applications of DSMT for information fusion [M]. Rehoboth: American Research Press, 2009:33-35.
- [7] FLORENTIN S, JEAN D. advances and applications of DSMT for information fusion [M]. Rehoboth: American Research Press, 2006:1-66.
- [8] 张永利, 计文平, 郭卫东. 证据冲突条件下多传感器目标识别方法比较分析[J]. 数学的实践与认识, 2015, 45(17):158-166.
- [9] 张令波. 基于 AHP-PCR5 的多传感器目标识别[J]. 指挥控制与仿真, 2015, 37(1):64-67.
- [10] 郭卫东, 张永利, 周荣坤. AWACS/USV 协同目标识别技术研究[J]. 舰船电子对抗, 2016, 39(5):9-13.
- [11] 陈金广, 张芬. 基于 DST 和 PCR2 的自适应信息融合算法[J]. 计算机工程, 2013, 39(5):69-77.
- [12] 周宪英. DST 与 DSMT 自适应融合门限研究[J]. 舰船电子工程, 2009, 29(12):128-141.

(上接第9页)

- [2] WANG C, LIU H. Accurate range estimation of LFM monopulse radar based on virtual sample pulse compression [C]//Chinese Control and Decision Conference, 2015:3677-3681.
- [3] SCHMITT H. Pulse compression radar system analysis [J]. Microwave Journal, 2016, 59(1):72-81.
- [4] 陆三兰, 胡修林, 陈岳明. 基于部分匹配的雷达回波信号检测[J]. 华中科技大学学报:自然科学版, 2008, 36(10):56-58.
- [5] 高星. 基于 FPGA 的数字脉冲压缩算法的设计与实现[J]. 舰船电子对抗, 2016, 39(1):85-88.
- [6] 张云龙. 雷达微弱目标检测算法研究[D]. 杭州:杭州

电子科技大学, 2012.

- [7] LOVELAND R, MACDONELL A, CLOSE S, et al. Comparison of methods of determining meteoroid range rates from linear frequency modulated chirped pulses[J]. Radio Science, 2016, 46(2):1-8.
- [8] NING F, WANG Y, XU H, et al. Method of LFM pulse compression implementation based on FPGA[C]//IEEE 11th International Conference on Electronic Measurement & Instruments, 2013:392-395.
- [9] 刘霄. 调频信号脉冲压缩的 FPGA 实现[D]. 北京:北京理工大学, 2016.
- [10] 时维元, 林正英, 陈希信. 线性调频信号低旁瓣脉压窗函数的优化设计[J]. 现代雷达, 2015, 37(10):18-20.