doi:10.11959/j.issn.1000-436x.2015104

基于信任度和虚假度的证据组合方法

宋亚飞，王晓丹，雷蕾，薛爱军
(空军工程大学 防空反导学院，陕西 西安 710051)

摘 要：D-S 证据理论在信息融合领域有着广泛的应用，但使用 Dempster 组合规则对高冲突证据进行合成时可能会得到反直观的结果，在应用中也存在“一票否决”的问题，为解决这些问题，提出一种改进的基于证据信任度和虚假度的证据加权组合方法。首先在证据相关系数的基础上定义了证据信任度，再结合证据虚假度的概念来确定各原始证据的权重，依此权重系数对各证据进行加权平均后利用 Dempster 组合规则对加权平均证据进行组合。数值算例表明，该组合方法可实现冲突证据的有效融合，与其他方法相比该方法具有更好的收敛性。
关键词：D-S 证据理论；证据组合；证据冲突；相关系数；信任度；虚假度
中图分类号：TP274 **文献标识码**：A

Evidence combination based on the degree of credibility and falsity

SONG Ya-fei, WANG Xiao-dan, LEI Lei, XUE Ai-jun
(Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi’an 710051, China)

Abstract: D-S evidence theory has been widely used in various fields of information fusion due to its efficiency in dealing with uncertain information. Unfortunately, combination of conflicting evidences by classical Dempster’s rule may produce counter-intuitive results. To alleviate this problem, a new weighted average combination rule is proposed. Definitions of correlation coefficient was first presented, followed by the introduction of falsity. Then the credibility of evidence is proposed. A new weighted coefficient is determined by credibility and falsity. To achieve convergence, the normalized weighted coefficient was suggested into the Dempster’s combination rule to average the basic probability assignment. Comparable numerical examples demonstrate that the proposed approach can combine conflicting evidences more effectively. Moreover, the proposed methodology can provide a faster identification of the observed object.
Key words: D-S evidence theory; evidence combination; evidence conflict; correlation coefficient; credibility; falsity

1 引言

最初由 Dempster 提出并由其学生 Shafer 进一步完善的证据理论(Dempster-Shafer 证据理论)可以在缺乏先验概率的情况下有效地进行不确定性信息的处理和融合[1,2]，因此在故障诊断[3]、目标识别[4]、图像处理[5]等领域得到了广泛的应用，然而焦元“组合爆炸”和组合规则失效依然是困扰证据理论的重要问题[6~8]。针对组合规则失效的问题，国内外学者提出了大量的改进方法，主要可分为 2 大类：一类是对经典 D-S 证据理论的组合规则进行修改，实现在证据冲突情况下，对冲突的重新分配[9~12]；另外一类是保持经典的组合规则不变，在融合前对冲突数据进行预处理[13]，证据源的预处理方法有加权平均法[14~16]和折扣系数法[17~20]。

这 2 类解决方法分别从不同的角度对证据理论进行了丰富与发展，目前国内外仍有大量学者围绕这 2 种方法进行研究，本文借鉴文献[14]中证据平均组合的思想，在引入证据相关系数的基础上，给出了证据信任度的概念，将其与证据虚假度相结合来定义一种新的证据权重系数，利用各证据的权重系数对原始证据进行加权平均，然后再利用 Dempster 组合规则对加权平均后的证据进行组合。

收稿日期：2004-02-18；**修回日期**：2014-08-26
基金项目：国家自然科学基金资助项目（61273275, 60975026）
Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China（61273275, 60975026）

2　证据信任度

定义 1　设 Θ 为辨识框架，$\mathbb{P}$ 为 Θ 的所有子集生成的一个子空间，该辨识框架中证据 $\boldsymbol{m}$ 的基本概率赋值(BPA)可以用子空间 $\mathbb{P}$ 中的行向量 $\boldsymbol{m}$ 表示为

$$\boldsymbol{m}=[m(A_1),m(A_2),\cdots,\ m(A_{2^N})] \tag{1}$$

其中，$m(A_i)\geqslant 0$，$\sum m(A_i)=1$，$A_i\in\mathbb{P}$。

定义 2　设 2 个证据的 BPA 分别为 $\boldsymbol{m}_1$、$\boldsymbol{m}_2$，则 $\boldsymbol{m}_1$、$\boldsymbol{m}_2$ 之间的相关系数为

$$cor(\boldsymbol{m}_1,\boldsymbol{m}_2)=\frac{\langle \boldsymbol{m}_1,\boldsymbol{m}_2\rangle}{|\boldsymbol{m}_1||\boldsymbol{m}_2|} \tag{2}$$

其中，$\langle \boldsymbol{m}_1,\boldsymbol{m}_2\rangle$ 为向量的内积，$|\cdot|$ 表示向量的模。

当证据的焦元中包含非单子集焦元时，为了体现 BPA 对辨识框架中各单子集焦元的支持度，借鉴文献[21]的思想，引入矩阵 $\boldsymbol{D}$ 的概念对 BPA 向量进行修正后形成新的向量

$$\boldsymbol{m}_1'=\boldsymbol{m}_1\boldsymbol{D} \tag{3}$$

$$\boldsymbol{m}_2'=\boldsymbol{m}_2\boldsymbol{D} \tag{4}$$

修正后的证据相关系数为

$$cor(\boldsymbol{m}_1,\boldsymbol{m}_2)=\frac{\langle \boldsymbol{m}_1',\boldsymbol{m}_2'\rangle}{|\boldsymbol{m}_1'||\boldsymbol{m}_2'|} \tag{5}$$

容易证明，$cor(\boldsymbol{m}_1,\boldsymbol{m}_2)$ 满足以下条件[22]：

1) $0\leqslant cor(\boldsymbol{m}_1,\boldsymbol{m}_2)\leqslant 1$；

2) $cor(\boldsymbol{m}_1,\boldsymbol{m}_2)=cor(\boldsymbol{m}_2,\boldsymbol{m}_1)$；

3) $cor(\boldsymbol{m}_1,\boldsymbol{m}_2)=1\Leftrightarrow \boldsymbol{m}_1=\boldsymbol{m}_2$；

4) $cor(\boldsymbol{m}_1,\boldsymbol{m}_2)=0\Leftrightarrow (\cup A_i)\cap(\cup B_j)=\varnothing$，$A_i$、$B_j$ 分别为 $\boldsymbol{m}_1$、$\boldsymbol{m}_2$ 的焦元。

定义 3　设有 n 个证据体 $\boldsymbol{m}_1,\boldsymbol{m}_2,\cdots,\boldsymbol{m}_n$，则 n 个证据的相关矩阵为

$$\boldsymbol{CM}=\begin{bmatrix} cor(\boldsymbol{m}_1,\boldsymbol{m}_1) & cor(\boldsymbol{m}_1,\boldsymbol{m}_2) & \cdots & cor(\boldsymbol{m}_1,\boldsymbol{m}_n)\\ cor(\boldsymbol{m}_2,\boldsymbol{m}_1) & cor(\boldsymbol{m}_2,\boldsymbol{m}_2) & \cdots & cor(\boldsymbol{m}_2,\boldsymbol{m}_n)\\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots\\ cor(\boldsymbol{m}_n,\boldsymbol{m}_1) & cor(\boldsymbol{m}_n,\boldsymbol{m}_2) & \cdots & cor(\boldsymbol{m}_n,\boldsymbol{m}_n) \end{bmatrix} \tag{6}$$

由于 $cor(\boldsymbol{m}_i,\boldsymbol{m}_i)=1$，所以 $\boldsymbol{CM}$ 的主对角线元素为 1。

定义 4　设有 n 个证据体 $\boldsymbol{m}_1,\boldsymbol{m}_2,\cdots,\boldsymbol{m}_n$，则每个证据 $\boldsymbol{m}_i$ 的信任度为

$$Crd_i=\frac{1}{n-1}\sum_{\substack{j=1\\ j\neq i}}^{n} cor(\boldsymbol{m}_i,\boldsymbol{m}_j) \tag{7}$$

所有证据的信任度组成信任度向量

$$\boldsymbol{CRD}=[Crd_1,Crd_2,\cdots,\ Crd_n]^{\mathrm{T}} \tag{8}$$

3　证据虚假度

证据虚假度(falsity)最初由 Schubert 基于证据冲突系数 k 进行定义，也是证据冲突程度的一种度量[23]。其定义原则是，多个证据源 $\boldsymbol{m}_1,\boldsymbol{m}_2,\cdots,\boldsymbol{m}_n$，按照 Dempster 规则融合时它们之间的全局冲突为

$$k_0=\sum_{\cap_{i=1}^{n}A_i=\varnothing}\left(\prod_{i=1}^{n}m_i(A_i)\right) \tag{9}$$

假设从证据源中剔除证据 $\boldsymbol{m}_j$，则剩余证据之间的局部冲突为

$$k_j=\sum_{\cap_{i=1,i\neq j}^{n}A_i=\varnothing}\left(\prod_{i=1,i\neq j}^{n}\boldsymbol{m}_i(A_i)\right) \tag{10}$$

显然，$0\leqslant k_j\leqslant k_0\leqslant 1$，那么，证据 $\boldsymbol{m}_j$ 的虚假度定义为

$$F(\boldsymbol{m}_j)=\frac{k_0-k_j}{1-k_j} \tag{11}$$

当只有 2 个证据时，$F(\boldsymbol{m}_1)=F(\boldsymbol{m}_2)=k_0$。

从式(11)可知，当 $k_0=k_j$ 时，$F(\boldsymbol{m}_j)=0$，表明证据 $\boldsymbol{m}_j$ 的虚假度为 0，对全局冲突度 k_0 没有贡献；特别地，若 $k_j=1$，则 $k_0=1$，此时 $k_0=k_j$，$F(\boldsymbol{m}_j)=0$，也表明 $\boldsymbol{m}_j$ 对 k_0 没有影响。当 $k_0=1$，$k_j<1$ 时，$F(\boldsymbol{m}_j)=1$，表明 $\boldsymbol{m}_j$ 是造成全局冲突度 $k_0=1$ 的主要原因，融合时应尽量减小该证据对整体融合效果的影响。当 $0<F(\boldsymbol{m}_j)<1$ 时，$\boldsymbol{m}_j$ 对造成全局冲突有贡献，且虚假度越大，对全局冲突的贡献越大。设有 n 个证据体 $\boldsymbol{m}_1,\boldsymbol{m}_2,\cdots,\boldsymbol{m}_n$，则所有证据的虚假度构成的向量为

$$\boldsymbol{F}=[F(\boldsymbol{m}_1),F(\boldsymbol{m}_2),\cdots,F(\boldsymbol{m}_n)]^{\mathrm{T}} \tag{12}$$

4　新的证据组合方法

Murphy 在文献[14]中提出的证据组合方法是：对融合系统收集到的 n 个证据的基本概率赋值进行平均后使用 Dempster 组合规则组合 $n-1$ 次，本文方法中，综合考虑证据间的相关性和证据的虚假度。通过前面的分析可知，一个证据的信任度越大意味着它被其他证据所支持的程度较高，有理由认为该证据比较可信，在融合系统中应适当加大其权

重，以增强它对最终融合结果的影响；如果一个证据的虚假度较大，那么该证据与其他证据的冲突较大，在加权平均时应该降低其权重。因此可以把证据信任度和虚假度结合起来，以此来确定权重系数，对证据的基本概率赋值进行加权平均。

通过以上分析可知，证据权重系数满足条件 $\omega_i \propto Crd_i - F(\boldsymbol{m}_i)$，为了保证 $\omega_i > 0$，权重系数可定义为

$$\omega_i = Crd_i + 1 - F(\boldsymbol{m}_i) \tag{13}$$

对其进行归一化可得

$$\bar{\omega}_i = \frac{\omega_i}{\sum_{i=1}^{n} \omega_i} \tag{14}$$

以此作为权重系数对所有证据的基本概率赋值进行加权平均。

基于信任度和虚假度的证据组合步骤概可括如下。

1) 将 n 个传感器收集到的数据转换为基本概率赋值 $\boldsymbol{m}_1, \boldsymbol{m}_2, \cdots, \boldsymbol{m}_n$。

2) 分别计算这些证据的两两之间相关系数。

3) 求出各个证据的信任度。

4) 求出各证据的虚假度。

5) 根据证据信任度和虚假度计算权重系数，并归一化。

6) 利用归一化的权重系数对所有证据的基本概率赋值进行加权平均。

7) 利用 D-S 证据合成准则加权平均 BPA 组合 $n-1$ 次。

为了进一步说明本文所提方法，下面通过算例来说明该方法的具体步骤。

例 1 设辨识框架 $\Theta = \{A, B, C, D\}$，4 个证据的 BPA 分别为

$$m_1(A) = 0.7,\ m_1(B) = 0.1,\ m_1(C) = 0.05,\ m_1(D) = 0.15$$

$$m_2(A) = 0,\ m_2(B) = 0.25,\ m_2(C) = 0.45,\ m_2(D) = 0.3$$

$$m_3(A) = 0.3,\ m_3(B) = 0.6,\ m_3(C) = 0.1,\ m_3(D) = 0$$

$$m_4(A) = 0.45,\ m_4(B) = 0.15,\ m_4(C) = 0.25,\ m_4(D) = 0.15$$

相关矩阵为

$$\boldsymbol{CM} = \begin{bmatrix} 1 & 0.214 & 0.560 & 0.905 \\ 0.214 & 1 & 0.483 & 0.588 \\ 0.560 & 0.483 & 1 & 0.662 \\ 0.905 & 0.588 & 0.662 & 1 \end{bmatrix}$$

信任度向量为

$$\boldsymbol{CRD} = [0.560, 0.428, 0.568, 0.718]^{\mathrm{T}}$$

虚假度向量为

$$\boldsymbol{F} = [0.917, 0.973, 0.826, 0.837]^{\mathrm{T}}$$

归一化的权重系数为

$$\bar{\boldsymbol{\omega}} = [0.236, 0.167, 0.273, 0.324]^{\mathrm{T}}$$

对证据进行加权平均后的基本概率赋值为

$$\bar{m}(A) = 0.393,\ \bar{m}(B) = 0.278$$

$$\bar{m}(C) = 0.195,\ \bar{m}(D) = 0.134$$

利用 Dempster 组合规则对 $\boldsymbol{m}'$ 组合 3 次可得最终结果

$$m(A) = 0.755,\ m(B) = 0.188$$

$$m(C) = 0.046,\ m(D) = 0.011$$

5 典型算例

近年来，D-S 证据推理在目标综合识别中得到了广泛的应用[24]，为验证本文方法的有效性，下面通过证据理论在目标识别领域的一个典型算例来对比分析本文证据组合方法和其他证据组合方法的融合结果。

例 2 辨识框架 $\Theta = \{A =$直升机，$B =$战斗机，$C =$导弹$\}$，5 个传感器获取各目标的 BPA 分别为

$$m_1(A) = 0.5,\ m_1(B) = 0.2,\ m_1(C) = 0.3$$

$$m_2(A) = 0,\ m_2(B) = 0.85,\ m_2(C) = 0.15$$

$$m_3(A) = 0.6,\ m_3(B) = 0.1,\ m_3(C) = 0.3$$

$$m_4(A) = 0.65,\ m_4(B) = 0.25,\ m_4(C) = 0.1$$

$$m_5(A) = 0.55,\ m_5(B) = 0.1,\ m_5(C) = 0.35$$

表 1 给出了各种方法的融合结果，可以看出：Dempster 组合规则和 Yager 组合规则都无法识别出目标，由于 $m_2(A)$=0，不认为待识别目标是直升机，所以尽管以后收集到的证据都认定目标是 A，融合系统依然将目标识别为其他类型。而且当运用 Yager 组合规则时，随着证据数目的增加，未知项 Θ 的概率赋值 $m(\Theta)$ 始终在增加，这显然不利于进行目标识别。孙全对 Yager 方法进行了改进，克服了“一票否决”的缺点，但随着支持 A 的证据的增加，$m(A)$ 增加速度很慢，$m(\Theta)$ 也在增加，当收集到 5 个证据时，$m(A) = 0.234$，依然无法进行有效决策。从表 1 中可以看出，收集到 4 个证据时 Murphy 的

平均方法就可识别出目标($m(A)=0.683$),运用邓勇等人对 Murphy 方法的改进以及本文的方法只对前 3 个证据进行融合就能判定目标的类型，这是由于 Murphy 方法对证据进行平均时没有考虑不同证据之间的差异，只是对证据进行简单的算术平均，对比本文方法和邓勇的改进方法可以看出，在证据个数相同的条件下，本文方法得到的 $m(A)$ 大于邓勇方法的计算结果，表明本文方法具有更好的收敛性和聚焦效果，有利于最终的决策，这是因为本文方法同时考虑了证据的信任度虚假度，有效降低了不可靠证据的权重系数。

通过以上分析可知，本文方法和邓勇等在文献[15]中所提的方法都具有较好的性能，既可以得到正确的决策结果，又具有较好的聚焦效果，可以有效降低不可靠证据的影响，为了进一步验证本文所提方法的有效性，下面在含有多子集焦元的情况下将本文方法与文献[15]中的方法进行对比。

例 3　辨识框架为 $\Theta=\{A,B,C\}$，6 个证据所对应的 BPA 如表 2 所示。

在表 2 中可以看出，证据 1、2、4 和 5 比较倾向于 A，证据 3 则对 B 赋予了较大的支持度，证据 6 具有较大的不确定性。因此在对这 6 个证据进行融合时，应该充分考虑每个证据的权重系数，邓勇等的方法和本文方法的融合结果如表 3 所示。

表 1　　**本文证据组合方法与其他几种证据组合方法的比较**

证据组合方法	$\oplus_{i=1}^{2} m_i$	$\oplus_{i=1}^{3} m_i$	$\oplus_{i=1}^{4} m_i$	$\oplus_{i=1}^{5} m_i$
Dempster 方法	$m(A)=0$ $m(B)=0.791$ $m(C)=0.209$	$m(A)=0$ $m(B)=0.557$ $m(C)=0.443$	$m(A)=0$ $m(B)=0.759$ $m(C)=0.241$	$m(A)=0$ $m(B)=0.474$ $m(C)=0.526$
Yager 方法[9]	$m(A)=0$ $m(B)=0.170$ $m(C)=0.045$ $m(\Theta)=0.785$	$m(A)=0$ $m(B)=0.017$ $m(C)=0.014$ $m(\Theta)=0.969$	$m(A)=0$ $m(B)=0.004$ $m(C)=0.002$ $m(\Theta)=0.994$	$m(A)=0$ $m(B)=0.000\,4$ $m(C)=0.000\,5$ $m(\Theta)=0.999\,1$
孙全方法[11]	$m(A)=0.090$ $m(B)=0.358$ $m(C)=0.126$ $m(\Theta)=0.426$	$m(A)=0.168$ $m(B)=0.193$ $m(C)=0.128$ $m(\Theta)=0.511$	$m(A)=0.217$ $m(B)=0.178$ $m(C)=0.107$ $m(\Theta)=0.498$	$m(A)=0.234$ $m(B)=0.153$ $m(C)=0.122$ $m(\Theta)=0.491$
Murphy 方法[14]	$m(A)=0.161$ $m(B)=0.709$ $m(C)=0.130$	$m(A)=0.407$ $m(B)=0.464$ $m(C)=0.129$	$m(A)=0.683$ $m(B)=0.279$ $m(C)=0.038$	$m(A)=0.865$ $m(B)=0.102$ $m(C)=0.033$
邓勇方法[15]	$m(A)=0.161$ $m(B)=0.709$ $m(C)=0.130$	$m(A)=0.617$ $m(B)=0.232$ $m(C)=0.151$	$m(A)=0.870$ $m(B)=0.095$ $m(C)=0.035$	$m(A)=0.952$ $m(B)=0.020$ $m(C)=0.028$
本文方法	$m(A)=0.161$ $m(B)=0.709$ $m(C)=0.130$	$m(A)=0.665$ $m(B)=0.181$ $m(C)=0.154$	$m(A)=0.905$ $m(B)=0.063$ $m(C)=0.032$	$m(A)=0.964$ $m(B)=0.011$ $m(C)=0.025$

表 2　　**含有多子集焦元的 BPA**

组合	m_1	m_2	m_3	m_4	m_5	m_6
$\{A\}$	0.75	0.4	0	0.35	0.5	0.05
$\{B\}$	0.1	0.2	0.9	0.15	0.1	0.1
$\{C\}$	0.05	0.1	0.1	0.25	0	0
$\{AB\}$	0	0.3	0	0.2	0	0.3
$\{AC\}$	0	0	0	0	0	0.2
$\{BC\}$	0	0	0	0	0.15	0.1
$\{ABC\}$	0.05	0	0	0.05	0.25	0.25

表 3 本文方法和文献[15]方法的比较

证据组合方法	$\oplus_{i=1}^{2} m_i$	$\oplus_{i=1}^{3} m_i$	$\oplus_{i=1}^{4} m_i$	$\oplus_{i=1}^{5} m_i$	$\oplus_{i=1}^{6} m_i$
邓勇方法[15]	$m(A)=0.805\,2$ $m(B)=0.118\,5$ $m(C)=0.018\,9$ $m(AB)=0.053\,9$ $m(AC)=0$ $m(BC)=0$ $m(ABC)=0.003\,6$	$m(A)=0.589\,9$ $m(B)=0.391\,0$ $m(C)=0.004\,8$ $m(AB)=0.014\,2$ $m(AC)=0$ $m(BC)=0$ $m(ABC)=0.000\,1$	$m(A)=0.713\,3$ $m(B)=0.273\,8$ $m(C)=0.005\,0$ $m(AB)=0.007\,9$ $m(AC)=0$ $m(BC)=0$ $m(ABC)=0$	$m(A)=0.811\,0$ $m(B)=0.181\,4$ $m(C)=0.004\,5$ $m(AB)=0.002\,9$ $m(AC)=0$ $m(BC)=0.000\,2$ $m(ABC)=0$	$m(A)=0.789\,9$ $m(B)=0.199\,6$ $m(C)=0.005\,7$ $m(AB)=0.004\,4$ $m(AC)=0.000\,2$ $m(BC)=0.000\,2$ $m(ABC)=0$
本文方法	$m(A)=0.805\,2$ $m(B)=0.118\,5$ $m(C)=0.018\,9$ $m(AB)=0.053\,9$ $m(AC)=0$ $m(BC)=0$ $m(ABC)=0.003\,6$	$m(A)=0.625\,8$ $m(B)=0.356\,2$ $m(C)=0.004\,9$ $m(AB)=0.012\,9$ $m(AC)=0$ $m(BC)=0$ $m(ABC)=0.000\,1$	$m(A)=0.734\,0$ $m(B)=0.253\,7$ $m(C)=0.005\,0$ $m(AB)=0.007\,3$ $m(AC)=0$ $m(BC)=0$ $m(ABC)=0$	$m(A)=0.826\,1$ $m(B)=0.166\,9$ $m(C)=0.004\,1$ $m(AB)=0.002\,6$ $m(AC)=0$ $m(BC)=0.000\,2$ $m(ABC)=0$	$m(A)=0.814\,1$ $m(B)=0.178\,2$ $m(C)=0.004\,3$ $m(AB)=0.003\,1$ $m(AC)=0.000\,1$ $m(BC)=0.000\,1$ $m(ABC)=0$

通过直观分析可知，最后的融合结果对 A 应该赋予最大的支持度，2 种方法的融合结果都体现了这一点。从表 3 中可知，不可靠证据 m_3 对融合结果的影响较大，当 m_3 加入到系统中后，融合结果对 A 的支持度有所降低，但使用本文所提的方法进行融合可以有效降低不可靠证据的影响。这是因为本文所提方法充分考虑了证据虚假度的影响，计算可知 m_1、m_2、m_3 之间的冲突度为 0.91，而 m_1、m_2 之间的冲突度只有 0.32，因此证据 m_3 具有较高的虚假度，这将降低 m_3 的权重，从而削弱其对最终融合结果的影响。另外，本文方法也可以减低不确定证据 m_6 对融合结果的影响。在表中还可以发现，本文所提方法具有较好的聚焦效果。然而，在含有多子集焦元的情况下，随着证据个数的增加本文方法的运算时间大幅增长，一方面是由于随着焦元个数和证据个数的增加，计算证据间的冲突程度需要耗费大量时间，另一方面是因为对加权平均证据进行组合使用的依然是 Dempster 组合规则，也就是说该方法依然面对“焦元爆炸”的问题。

6 结束语

运用 Dempster 组合规则对高冲突证据进行组合时，会出现与反直观的结果，为了有效解决该问题，本文首先提出了证据相关系数的概念，在此基础上定义了证据信任度。然后借鉴证据虚假度的概念，将其与证据信任度结合构造一个新的加权平均系数，对证据源进行加权平均，最后基于 Murphy 的思想，运用 Dempster 证据组合规则对加权平均证据进行组合，算例表明该方法可以有效地处理冲突证据，通过降低不可靠证据的权重来削弱其对融合结果的影响，且具有较好的聚焦效果。但是，当焦元数目较多时，本文方法的时间复杂度受证据数目的影响较大，这也是下一步将重点解决的问题。

参考文献：

[1] DEMPSTER A P. Upper and lower probabilities induced by a multi-valued mapping [J]. Annals Math. Stat., 1967, 38: 325-339.

[2] SHAFER G. A Mathematical Theory of Evidence [M].Princeton, NJ: Princeton University Press, 1976.

[3] 苗锐, 陈国初, 李月等. 基于随机集含糊证据的风力发电机故障诊断方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(7): 22-26.
MIAO R, CHEN G C, LI Y, *et al*. A wind turbine fault diagnosis method based on vague evidence of random set [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(7): 22-26.

[4] 雷蕾, 王晓丹, 邢雅琼等. 结合 SVM 和 DS 证据理论的多极化 HRRP 分类研究[J]. 控制与决策, 2013, 28(6): 861-866.
LEI L, WANG X D, XING Y Q, *et al*. Multi-polarized HRRP classification by SVM and DS evidence theory [J]. Control and Decision, 2013, 28(6): 861-866.

[5] 刘帅奇, 胡绍海, 肖扬等. 基于局部混合滤波的SAR图像边缘检测[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(5): 1120-1127.
LIU S Q, HU S H, XIAO Y, *et al*. SAR image edge detection based on local hybrid filter [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2013, 35(5): 1120-1127.

[6] ZADEH L. Review of a mathematical theory of evidence [J]. AI Magazine, 1984, 5(3): 81-83.

[7] ZADEH L. A simple view of the dempster-shafer theory of evidence and its implication for the rule of combination[J]. AI Magazine, 1986, 7(2): 85-90.

[8] 郭华伟, 施文康, 邓勇等. 证据冲突: 丢弃, 发现或化解? [J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29(6): 890- 898.
GUO H W, SHI W K, DENG Y, *et al*. Evidential conflict and its 3D strategy: discard, discover and disassemble?[J]. Systems Engineering and Electronics, 2007, 29(6): 890-898.

[9] YAGER R.R. On the Dempster-Shafer framework and new combina-

tion rules [J]. Information Sciences, 1987, 41(5): 93-138.

[10] LEFEVRE E, COLOT O, VANNOORENBERGHE P. Belief function combination and conflict management [J]. Information Fusion, 2002, 3(2): 149- 162.

[11] 孙全, 叶秀清, 顾伟康. 一种新的基于证据理论的合成公式[J]. 电子学报, 2000, 28(8): 117-119.
SUN Q, YE X Q, GU W K. A new combination rules of evidence theory[J]. Acta Electronica Sinica, 2000, 28(8): 117-119.

[12] 邓勇, 施文康. 一种改进的证据推理组合规则[J]. 上海交通大学学报, 2003, 37(8): 1275-1278.
DENG Y, SHI W K. A modified combination rule of evidence theory [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2003, 37(8): 1275-1278.

[13] HAENNI R. Are alternative to Dempster's rule of combination real alternative? Comments on about the belief function combination and the conflict management problem-E lefevre [J]. Information, Fusion, 2002, 3(3):237-239.

[14] MURPHY C K. Combining belief functions when evidence conflicts [J]. Decision support systems, 2000, 29(1): 1-9.

[15] 邓勇, 施文康, 朱振福. 一种有效处理冲突证据的组合方法[J]. 红外与毫米波学报, 2004, 23(1): 27-32.
DENG Y, SHI W K, ZHU Z F. Efficient combination approach of conflict evidence [J]. J Infrared Millim Waves, 2004, 23(1): 27-32.

[16] HAN D Q, DENG Y, HAN C Z. Weighted evidence combination based on distance of evidence and uncertainty measure [J]. J Infrared Millim Waves, 2011, 30(5): 396-400.

[17] FABRE S, APPRIOU A, BRIOTTET X. Presentation and description of two classification methods using data fusion based on sensor management [J]. Information Fusion, 2001, 2(1): 49-71.

[18] 胡昌华, 司小胜, 周志杰等. 新的证据冲突衡量标准下的 DS 改进算法[J]. 电子学报, 2009, 37(7):1578-1583.
HU C H, SI X S, ZHOU Z J, *et al*. An improved D S algorithm under the new measure criteria of evidence conflict [J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(1): 1578-1583.

[19] 许丽佳. D-S 理论在信息融合中的改进[J].系统工程与电子技术, 2004, 26(6): 717-720.
XU L J. Improvement of D S theory in an information fusion system [J]. Systems Engineering and Electronics, 2004, 26(6): 717-720.

[20] 周哲, 徐晓滨, 文成林等. 冲突证据融合的优化方法[J]. 自动化学报, 2012, 38(6): 976-985.
ZHOU Z, XU X B, WEN C L, *et al*. An optimal method for combining conflicting evidences[J]. Acta Automatica Sinica, 2012, 38(6): 976-985.

[21] JOUSSELME A L, GRENIER D, BOSSE E. A new distance between two bodies of evidence [J]. Information Fusion, 2001, (2):91-101.

[22] 宋亚飞, 王晓丹, 雷蕾等. 基于相关系数的证据冲突度量方法[J]. 通信学报, 2014, 35(5): 95-100.
SONG Y F, WANG X D, LEI L, *et al*. Measurement of evidence conflict based on correlation coefficient [J]. Journal on Communications, 2014, 35(5): 95-100.

[23] SCHUBERT J. Conflict management in Dempster-Shafer theory using the degree of falsity[J]. International Journal of Approximate Reasoning, 2011, 52(3): 449-460.

[24] 冯德军, 王博, 王伟. 弹道中段雷达目标识别研究进展综述[J]. 中国电子科学研究院学报, 2013, 8(2): 142-148.
FENG D J, WANG B, WANG W. Overview of progress in midcourse radar target recognition [J]. Journal of CAEIT, 2013, 8(2): 142-148.

作者简介：

宋亚飞（1988-），男，河南汝州人，空军工程大学博士生，主要研究方向为模式识别、智能信息处理等。

王晓丹（1966-），女，陕西汉中人，空军工程大学教授、博士生导师，主要研究方向为机器学习、模式识别、智能信息处理等。

雷蕾（1988-），女，四川南充人，空军工程大学博士生，主要研究方向为模式识别、智能信息处理等。

薛爱军（1989-），男，山东聊城人，空军工程大学博士生，主要研究方向为模式识别、智能信息处理等。