

基于线性 IFTS 的弹道中段目标融合识别方法

郑寇全^{1,2}, 雷英杰¹, 余晓东¹, 王 睿¹

(1. 空军工程大学 防空反导学院, 西安 710051; 2. 中国人民解放军 68331 部队, 陕西 华阴 714200)

摘 要: 针对弹道中段目标识别时间资源有限的问题, 提出一种基于线性直觉模糊时间序列的目标融合识别方法. 新模型通过直觉模糊线性相关函数表征弹道中段目标识别信息的实时模糊变化特性, 构建目标识别结果的时序变化模型, 将目标识别转换为直觉模糊时序变量间的寻优拟合问题, 缩短了目标正确识别时间, 提高了系统的识别效率. 最后通过仿真实例验证了所提出方法的有效性和优越性.

关键词: 直觉模糊集; 时间序列; 弹道中段; 目标识别

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Method of target fusion recognition in ballistic midcourse based on linear IFTS

ZHENG Kou-quan^{1,2}, LEI Ying-jie¹, YU Xiao-dong¹, WANG Rui¹

(1. Air Defense and Antimissile Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China; 2. Unit of 68331, PLA, Huayin 714200, China. Correspondent: ZHENG Kou-quan, E-mail: zhengkouquan0421@163.com)

Abstract: Aiming at the problem of limited time sources for target recognition in the ballistic midcourse, an approach based on the linear intuitionistic fuzzy time series is presented. In this method, the linear intuitionistic fuzzy time series is represented as real-time fuzzy characteristics of ballistic target recognition information. Then the time series changing model for the target recognition results is constructed, which converts the target fusion recognition to the problem of optimum fitting between intuitionistic fuzzy variables, decreases the method complexity, shortens the recognition time and promotes the system efficiency. Finally, the experiments validate the effectiveness and superiority of the proposed method.

Key words: intuitionistic fuzzy sets; time series; ballistic midcourse; target recognition

0 引 言

弹道导弹以其射程远、威力大、精度高、机动性好和生存能力强等优越特性成为了现代战争的“杀手锏”武器, 作为其对立面, 反导防御系统应运而生. 弹道中段防御被认为是反导防御的重点和难点, 受到了相关研究领域的高度关注, 并迅速发展成为一个重要而热门的研究课题^[1]. 然而, 弹道中段潜在威胁目标群在大气层外近似真空环境下, 以大致相同的速度作惯性飞行, 使得真假目标雷达信号特性差异降低, 加之来袭弹头常采用多种先进的突防手段, 这给防御方实现真目标识别带来了极大的技术挑战^[2]. 由此可见, 弹道中段目标识别的成败直接决定了反导防御系统跟踪与拦截的成功与否, 已成为打赢现代高技术防空作战亟待研究解决的重要问题.

弹道目标特征数据事先很难被防御方获取, 传统

的“模板训练”识别方法就难以发挥效用. 因此, 相关应用领域将弹道目标识别的重点转向了与其物理属性相关的特征提取与识别研究, 取得了较好的识别效果^[3-9]: 文献[3]系统地研究了弹道中段目标的微动电磁散射特性, 提出了基于时频分析的目标识别算法; 文献[4]给出了基于微多普勒进动特性的弹道目标识别方法; 文献[5]利用目标距离像序列的动态变化特性提取目标进动参数, 构建了基于进动目标尺寸估计的弹道目标识别模型; 文献[6]提出了基于特征熵方差分析的目标进动周期提取方法; 文献[7]给出了基于窄带雷达回波相位特性的弹道目标质心估计算法. 然而, 随着战场电磁环境的日益复杂和导弹突防技术的不断发展, 利用单一特征区分目标属性需要长时间的脉冲积累, 算法实时性差, 识别准确率低, 无法有效地满足现代化军事对抗的实际需求. 文献[8-9]采用

收稿日期: 2013-04-01; 修回日期: 2013-11-03.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61272011, 61309022, 60773209); 国家重点实验室基金项目(2012ADL-DW0301).

作者简介: 郑寇全(1983-), 男, 博士, 从事智能信息处理的研究; 雷英杰(1956-), 男, 教授, 博士生导师, 从事智能信息处理等研究.

多特征、多手段综合模糊识别方法实现了弹道中段多目标群的有效分离,较大程度地降低了目标识别的误差率,但算法的复杂度高,识别效率有待进一步提高.因此,如何在有限的时间资源内综合利用多类探测信息进行目标融合识别就成为反导防御系统作战性能提升的关键技术瓶颈.

弹道目标识别是一个典型的线性模糊时间序列应用问题.如果通过调整相关参数,合理运用时序分析理论,建立弹道目标时间序列分析模型,再通过模糊时序推理进行弹道目标融合识别,将取得事半功倍的效果.直觉模糊时间序列(IFTS)作为时间序列的重要扩充和发展,其数学描述更加符合客观世界的模糊本质,为序列数据随机模糊变化特性的描述和处理提供了新的思路^[10-11];模糊线性方程在对动态模糊时序系统实时建模时表现出了良好的鲁棒性能,函数拟合结果更加符合不确定系统的实际^[12].因此,本文在给出识别结果直觉模糊可信度、非可信度及其时序变化模型定义的基础上,提出了基于线性IFTS的弹道中段目标融合识别算法,有效地缩短了目标正确识别的时间,提高了目标识别效率.最后通过仿真实验验证了本文所提算法能够取得较好的识别效果.

1 基础知识

定义1(直觉模糊时间序列^[10]) 设 $Y(t)$ 为论域 U 上的模糊子集,在 $Y(t)$ 上定义直觉模糊集 $f_i(t) = \langle \mu_i(t), \gamma_i(t) \rangle (i = 1, 2, \dots)$,若 $F(t) = \{f_1(t), f_2(t), \dots\}$,则称 $F(t)$ 为定义在 $Y(t)$ 上的直觉模糊时间序列.

若将 $f_i(t)$ 理解为语言变量值, $F(t)$ 作为直觉模糊集的集合可以表示为时间 t 的函数.固定 t ,令 $f_i(t) = (f_i^{(1)}(t), f_i^{(2)}(t), \dots, f_i^{(n)}(t))$,其中 $f_i^{(j)}(t) = \langle \mu_i^{(j)}(t), \gamma_i^{(j)}(t) \rangle$,则称 $F(t)$ 为 n 维IFTS.由此可知,IFTS的数据集为直觉模糊数集,即随时间变化且具有随机性的前后相互关联的一系列动态直觉模糊数.

定义2(线性IFTS模型^[11]) 令 $F(t)$ 为论域 U 上的IFTS.如果对于任一时刻 t ,均有

$$F(t) = A_1 F(t-1) + \dots + A_m F(t-m) + \varepsilon(t), \quad (1)$$

则称其为 m 阶时间不变的IFTS预测模型.其中: $A_j (j \in [1, m])$ 为方程系数, $\varepsilon(t) = \langle \mu_\varepsilon(t), \gamma_\varepsilon(t) \rangle$ 为直觉模糊随机误差项.

定义3(直觉模糊可信度与非可信度) 若直觉模糊集 $f_k(t_i) = \langle \mu_k(t_i), \gamma_k(t_i) \rangle$ 表示 t_i 时刻探测方式 k 得到的弹道目标识别结果,则称 $\mu_k(t_i)$ 和 $\gamma_k(t_i)$ 分别为 t_i 时刻目标识别结果的可信度和非可信度.

由弹道目标识别特性可知:在弹道中段初期,目标识别信息可信任程度的直觉模糊值相对较小,但随

着时间延伸,目标不断接近,其识别可信度不断增加,非可信度则相应减小,且整体稳定地近似呈线性变化.因此,可建立弹道中段目标识别结果的线性直觉模糊时间序列分析模型

$$f_k(t_i) = A_k^{(1)} f_k(t_{i-1}) + \dots + A_k^{(m)} f_k(t_{i-m}) + \varepsilon_k(t_i). \quad (2)$$

其中: $f_k(t_j) = \langle \mu_k(t_j), \gamma_k(t_j) \rangle$ 为 t_i 时刻探测方式 k 获取目标识别结果的直觉模糊值; $A_k^{(j)}$ 为探测方式 k 在 t_{i-j} 时刻的模型参数; $\varepsilon_k(t_i) = \langle \mu_{\varepsilon_k}(t_i), \gamma_{\varepsilon_k}(t_i) \rangle$ 为 t_i 时刻的直觉模糊观测噪声; $j \in [1, m]$, m 为模型阶数; $i \in [1, n]$, n 为序列样本长度.

为了有效地利用历史信息,提高目标识别的准确率,目标融合识别不仅要进行单次识别的多特征融合,而且要进行多次识别结果的序贯融合.而在军事应用中,目标识别的时间资源非常有限,识别结果的时效性要求较高.因此,对于式(2)所描述的目标识别模型,常取其阶数 $m = 1$,即

$$f_k(t_i) = A_k f_k(t_{i-1}) + \varepsilon_k(t_i). \quad (3)$$

定义4(识别结果的时间积累) 若 $f_k(t_i)$ 和 $f_k(t_{i+1})$ 分别表示 t_i 和 t_{i+1} 时刻探测方式 k 的目标识别结果,则称直觉模糊集 $T_k^{t_i, t_{i+1}}$ 为从第 t_i 时刻到第 t_{i+1} 时刻识别结果的时间累积,其表达式为

$$T_k^{t_i, t_{i+1}} = f_k(t_i) + f_k(t_{i+1}) - f_k(t_i)f_k(t_{i+1}). \quad (4)$$

其中: $T_k^{t_i, t_{i+1}} = \langle \mu_k^{t_i, t_{i+1}}, \gamma_k^{t_i, t_{i+1}} \rangle$; $\mu_k^{t_i, t_{i+1}}, \gamma_k^{t_i, t_{i+1}}$ 分别为目标识别结果时间累积的置信度和非置信度.特别地, $T_k^{t_1, t_i} = \langle \mu_k^{t_1, t_i}, \gamma_k^{t_1, t_i} \rangle$ 表示起始时刻到 t_i 时刻目标识别结果的时间累积.

2 基于线性IFTS的弹道中段目标融合识别方法

2.1 弹道目标识别模型的直觉模糊时序特性

在弹道中段初期,目标识别准确率较低,识别结果可信任程度的直觉模糊数值相对较小,其识别结果时间累积模型可简记为

$$T_k^{t_1, t_2} = f_k(t_1) + f_k(t_2) - f_k(t_1)f_k(t_2) \approx f_k(t_1) + f_k(t_2). \quad (5)$$

其中 $T_k^{t_1, t_2} = \langle \mu_k^{t_1, t_2}, \gamma_k^{t_1, t_2} \rangle = \langle \mu_k(t_1) + \mu_k(t_2) - \mu_k(t_1)\mu_k(t_2), \gamma_k(t_1)\gamma_k(t_2) \rangle$.由于雷达滤波性能的不断提升,在目标融合识别阶段,各类观测手段通过时频滤波基本可消除系统噪声干扰^[9].因此,忽略随机误差项,式(3)可简记为

$$f_k(t_2) = A_k f_k(t_1) = \langle \mu_k(t_2), \gamma_k(t_2) \rangle = \langle 1 - (1 - \mu_k(t_1))^{A_k}, (\gamma_k(t_1))^{A_k} \rangle.$$

则 $T_k^{t_1, t_2} = \langle \mu_k^{t_1, t_2}, \gamma_k^{t_1, t_2} \rangle = \langle 1 - (1 - \mu_k(t_1))^{1+A_k}, (\gamma_k(t_1))^{1+A_k} \rangle$.类似推理可知

$$\begin{aligned}
 T_k^{t_1, n} &\approx f_k(t_1) + \dots + f_k(t_n) = \\
 &f_k(t_1) + A_k f_k(t_1) + \dots + A_k^{n-1} f_k(t_1) = \\
 &\left(\sum_{i=0}^{n-1} A_k^i \right) f_k(t_1). \tag{6}
 \end{aligned}$$

用数学归纳法证明式(6). 由文献[13]中的直觉模糊集运算规则可知, 当 $n = 2$ 时, $T_k^{t_1, 2} = \langle 1 - (1 - \mu_k(t_1))^{1+A_k}, (\gamma_k(t_1))^{1+A_k} \rangle = (1 + A_k) f_k(t_1)$, 命题显然成立. 假设 $n = m$ 时, 命题

$$T_k^{t_1, m} = \left(\sum_{i=0}^{m-1} A_k^i \right) f_k(t_1)$$

成立, 则

$$\begin{aligned}
 T_k^{t_1, m+1} &= \langle \mu_k^{t_1, m+1}, \gamma_k^{t_1, m+1} \rangle = \\
 &\left(\sum_{i=0}^{m-1} A_k^i \right) f_k(t_1) + A_k^m f_k(t_1) = \\
 &\left\langle 1 - (1 - \mu_k(t_1))^{\sum_{i=0}^{m-1} A_k^i}, (\gamma_k(t_1))^{\sum_{i=0}^{m-1} A_k^i} \right\rangle + \\
 &\langle 1 - (1 - \mu_k(t_1))^{A_k^m}, (\gamma_k(t_1))^{A_k^m} \rangle = \\
 &\left\langle \left[1 - (1 - \mu_k(t_1))^{\sum_{i=0}^{m-1} A_k^i} \right] + \left[1 - (1 - \mu_k(t_1))^{A_k^m} \right] - \right. \\
 &\left. \left[1 - (1 - \mu_k(t_1))^{\sum_{i=0}^{m-1} A_k^i} \right] \left[1 - (1 - \mu_k(t_1))^{A_k^m} \right], \right. \\
 &\left. (\gamma_k(t_1))^{\sum_{i=0}^{m-1} A_k^i} \cdot (\gamma_k(t_1))^{A_k^m} \right\rangle = \\
 &\left\langle 1 - (1 - \mu_k(t_1))^{A_k^m + \sum_{i=0}^{m-1} A_k^i}, (\gamma_k(t_1))^{A_k^m + \sum_{i=0}^{m-1} A_k^i} \right\rangle = \\
 &\left\langle 1 - (1 - \mu_k(t_1))^{\sum_{i=0}^m A_k^i}, (\gamma_k(t_1))^{\sum_{i=0}^m A_k^i} \right\rangle = \\
 &\left(\sum_{i=0}^m A_k^i \right) \langle (\mu_k(t_1), \gamma_k(t_1)) \rangle = \left(\sum_{i=0}^m A_k^i \right) f_k(t_1).
 \end{aligned}$$

因此, 当 $n = m + 1$ 时, 表达式亦成立.

由此可见, 弹道中段目标识别结果时间累积模型的性能检验标准就是研究 t_{n+1} 时刻识别结果 $f_k(t_{n+1}) = A_k^n f_k(t_1)$ 与初始时刻到 t_n 时刻识别结果时间累积 $T_k^{t_1, n}$ 间的关系, 即定量比较直觉模糊数 $A_k^n f_k(t_1)$ 与 $\left(\sum_{i=0}^{n-1} A_k^i \right) f_k(t_1)$ 的大小.

推论 1 若弹道目标识别结果线性 IFTS 模型参数 $A_k \in \left(1, \frac{3}{2} \right)$, 序列样本长度 $n \geq 2$, 探测方式 k 在初始时刻的目标识别结果 $f_k(t_1) = \langle \mu_k(t_1), \gamma_k(t_1) \rangle$, 则命题 $\left(\sum_{i=0}^{n-1} A_k^i \right) f_k(t_1) > A_k^n f_k(t_1)$ 成立, 且当 $A_k^m f_k(t_1) \approx \left(\sum_{j=0}^{i-1} A_k^j \right) f_k(t_1)$ 时, 有 $i \ll m$ 成立.

证明 1) 用数学归纳法证明推论 1 的前半部分, 由式(6)证明可知

$$\left(\sum_{j=0}^{n-1} A_k^j \right) f_k(t_1) =$$

$$\left\langle 1 - (1 - \mu_k(t_1))^{\sum_{j=0}^{n-1} A_k^j}, (\gamma_k(t_1))^{\sum_{j=0}^{n-1} A_k^j} \right\rangle.$$

同理

$$A_k^n f_k(t_1) = \langle 1 - (1 - \mu_k(t_1))^{A_k^n}, (\gamma_k(t_1))^{A_k^n} \rangle.$$

当 $n = 2$ 时, $A_k \in \left(1, \frac{3}{2} \right) \Rightarrow 1 \leq A_k^2 \leq \frac{3A_k}{2} = A_k + \frac{A_k}{2} < A_k + \frac{3}{4} < A_k + 1 < \sum_{j=0}^1 A_k^j$, 且 $\mu_k(t_1), \gamma_k(t_1) \in [0, 1], \mu_k(t_1) + \gamma_k(t_1) \in [0, 1]$, 则

$$\begin{cases} 1 - (1 - \mu_k(t_1))^{\sum_{j=0}^1 A_k^j} > 1 - (1 - \mu_k(t_1))^{A_k^2}, \\ (\gamma_k(t_1))^{\sum_{j=0}^1 A_k^j} < (\gamma_k(t_1))^{A_k^2}. \end{cases}$$

因此, $\left(\sum_{i=0}^1 A_k^i \right) f_k(t_1) > A_k^2 f_k(t_1)$, 命题成立.

假设 $n = m$ 时, $\left(\sum_{i=0}^{m-1} A_k^i \right) f_k(t_1) > A_k^m f_k(t_1)$ 成立, 则

$$\begin{cases} 1 - (1 - \mu_k(t_1))^{\sum_{j=0}^{m-1} A_k^j} > 1 - (1 - \mu_k(t_1))^{A_k^m} \\ (\gamma_k(t_1))^{\sum_{j=0}^{m-1} A_k^j} < (\gamma_k(t_1))^{A_k^m} \end{cases} \Rightarrow \\
 \sum_{i=0}^{m-1} A_k^i > A_k^m \Rightarrow \frac{A_k^{m+1} - 1}{A_k - 1} > A_k^{m+1} \Rightarrow \\
 (A_k^{m+1} - 1) \cdot A_k > A_k^{m+1} \cdot A_k (A_k - 1) \Rightarrow \\
 A_k^{m+2} - A_k > A_k^{m+3} - A_k^{m+2}.$$

由于 $1 < A_k < \frac{3}{2} \Rightarrow A_k^{m+2} - 1 > A_k^{m+2} - A_k$, 故 $A_k^{m+2} - 1 > A_k^{m+3} - A_k^{m+2} \Rightarrow \frac{A_k^{m+2} - 1}{A_k - 1} >$

$A_k^{m+2} \Rightarrow \sum_{i=0}^m A_k^i > A_k^{m+1}$, 则

$$\begin{cases} 1 - (1 - \mu_k(t_1))^{\sum_{j=0}^m A_k^j} > 1 - (1 - \mu_k(t_1))^{A_k^{m+1}} \\ (\gamma_k(t_1))^{\sum_{j=0}^m A_k^j} < (\gamma_k(t_1))^{A_k^{m+1}} \end{cases} \Rightarrow \\
 \left(\sum_{i=0}^m A_k^i \right) f_k(t_1) > A_k^{m+1} f_k(t_1).$$

因此, 当 $n = m + 1$ 时, 表达式成立. 命题得证.

2) 证明推论 1 的后半部分. 若令 $A_k^m f_k(t_1) = \left(\sum_{j=0}^{i-1} A_k^j \right) f_k(t_1)$, 则

$$\begin{cases} 1 - (1 - \mu_k(t_1))^{\sum_{j=0}^{i-1} A_k^j} = 1 - (1 - \mu_k(t_1))^{A_k^m} \\ (\gamma_k(t_1))^{\sum_{j=0}^{i-1} A_k^j} = (\gamma_k(t_1))^{A_k^m} \end{cases} \Rightarrow \\
 A_k^m = \sum_{j=0}^{i-1} A_k^j \Rightarrow i = \log A_k (A_k^m (A_k - 1) + 1).$$

且 $1 < A_k < \frac{3}{2} \Rightarrow A_k^m(A_k - 1) + 1 \ll A_k^m$, 则当 $A_k^m f_k(t_1) \approx \left(\sum_{j=0}^{i-1} A_k^j \right) f_k(t_1)$ 时, $m \gg i$ 成立. \square

在利用线性 IFTS 分析理论进行弹道中段目标融合识别时, 当前时刻以前的目标识别结果的时间累积可以覆盖当前识别结果. 对于当前所达到的识别准确率, 若使用识别结果时序变化模型, 则其在当前时刻以前就已经近似达到.

2.2 弹道目标识别模型的参数求解方法

弹道目标识别结果的线性 IFTS 模型为实系数、直觉模糊变量的直觉模糊线性方程. 因此, 滤波去除直觉模糊噪声干扰, 式 (3) 可简写为隶属函数形式

$$\langle \mu_k(t_{i+1}), \gamma_k(t_{i+1}) \rangle = \langle 1 - (1 - \mu_k(t_i))^{A_k}, (\gamma_k(t_i))^{A_k} \rangle. \quad (7)$$

式 (7) 等价于 $1 - \mu_k(t_{i+1}) = (1 - \mu_k(t_i))^{A_k}$ 且 $\gamma_k(t_{i+1}) = (\gamma_k(t_i))^{A_k}$. 由文献 [14] 中提出的直觉模糊数据拟合方法, 利用其隶属度数据序列可计算 A_k 的最小二乘估计为

$$A_k = \frac{\sum_{i=1}^n \ln(1 - \mu_k(t_i)) \ln(1 - \mu_k(t_i))^{A_k}}{\sum_{i=1}^n \ln^2(1 - \mu_k(t_i))}. \quad (8)$$

其中约定 $\ln 0 = 0$.

同样, 利用非隶属度序列也可拟合计算

$$A_k = \frac{\sum_{i=1}^n \ln(\gamma_k(t_i)) \ln(\gamma_k(t_i))^{A_k}}{\sum_{i=1}^n \ln^2(\gamma_k(t_i))}.$$

2.3 弹道目标融合识别算法

假设具有 n 类模版的弹道中段目标识别问题, 利用 k 种探测方式分别进行识别, t_i 时刻目标识别结果的 IFTS 可表示为 $F(t_i) = \{F_0(t_i), F_1(t_i), \dots, F_n(t_i)\}$, 其中 $F_r(t_i) = \langle \mu_{t_i}(F_r), \gamma_{t_i}(F_r) \rangle$, 则其相应的目标融合识别公式可表示为

$$F_l(t_i) = T_1^{t_1, i} \oplus T_2^{t_1, i} \oplus \dots \oplus T_k^{t_1, i}. \quad (9)$$

其中: “ \oplus ” 为直觉模糊合成运算符; $T_j^{t_1, i} = \langle \mu_j^{t_1, i}, \gamma_j^{t_1, i} \rangle$ 为第 j 种方式从起始时刻到 t_i 时刻的目标识别结果的时间累积, 则由直觉模糊数运算规则可知

$$\langle \mu_{t_i}(F_l), \gamma_{t_i}(F_l) \rangle = \left\langle \prod_{j=1}^k (\mu_j^{t_1, i}), 1 - \prod_{j=1}^k (1 - \gamma_j^{t_1, i}) \right\rangle. \quad (10)$$

因此, 弹道目标融合识别是一个连续、动态的模糊推理过程, 各类识别手段分别从不同的角度根据相应的探测信息判断目标属性, 并给出各自的目标识别结论. 而基于线性 IFTS 的弹道中段目标融合识别算法是将各类识别结果转换成由直觉模糊集及其隶属函数表

征的随时间变化的合理的时序变量, 通过直觉模糊线性逻辑关系和直觉模糊推理等模型对其加以有效的表征, 并根据时间序列拟合标准进行直觉模糊优化融合, 给出目标的最终识别结果. 算法的具体步骤如下.

输入: 在 t_i 时刻, 由探测方式 k 得到的弹道目标识别结果 $f_k(t_i)$;

输出: 目标融合识别结果 F_l .

Step 1: 序列数据的直觉模糊化预处理. 若 $f_k(t_i)$ 本身就是直觉模糊数, 则直接使用; 若 $f_k(t_i)$ 为经典模糊数, 则令直觉模糊犹豫度为零, 将模糊数序列转换为直觉模糊数序列进行建模; 若 $f_k(t_i)$ 为实数集, 则参照文献 [2] 单个特征隶属度判决模型来计算识别结果可信度, 并令犹豫度为零, 直觉模糊化目标识别结果.

Step 2: 由式 (2)、(3) 建立弹道目标的线性 IFTS 模型.

Step 3: 参照式 (8), 利用直觉模糊数据拟合方法计算模型参数的最小二乘估计值.

Step 4: 由式 (6) 构建起始时刻至 t_i 时刻目标识别结果的时间累积模型.

Step 5: 利用式 (9)、(10) 进行弹道目标融合识别, 并输出识别结果.

3 实例分析

3.1 实验设计及算法应用

为了验证算法的有效性, 本文参考文献 [10] 的仿真实例, 并增加识别难度进行算法性能测试. 假设识别模版有弹头、有缝球、无缝球、仿真翻滚诱饵和末级运载火箭碎片等; 在雷达单位观测区间内, 对目标实时动态散射特性数据采取滑动计算方式分别进行 RCS 序列识别、一维距离像识别、窄带极化识别和宽带极化识别, 其中雷达脉冲频率为 600 Hz; 忽略各种探测手段目标识别结果的直觉模糊预处理时间, 用于目标识别的平均时间约为 400 s. 因此, 若各识别单位反应时间为 0.2 s, 则系统有 2000 个单位观测区间.

由 Matlab 仿真统计数据, 利用式 (8) 拟合计算目标融合识别线性 IFTS 模型参数 $A_k = [1.057, 1.064, 1.076, 1.088, 1.093]^T$. 防空作战环境复杂, 识别时间资源有限, 假设某次实验中各类探测识别手段难以有效区分真假目标. 本文根据弹道中段目标的飞行特性, 结合工程实际模拟复杂电磁背景下防空反导作战环境, 利用本文提出的基于线性 IFTS 的弹道目标识别方法进行多探测方式的目标融合识别, 并将其与几种常用的目标识别方法进行比较, 结果如图 1 所示.

从图 1 可以看出, 单一探测识别手段利用特定信息在目标识别方面的独特优势, 算法匹配简单, 信息获取较为容易, 在理想条件下可实现目标探测信息的快速优化拟合, 但在复杂电磁环境下却难以实时

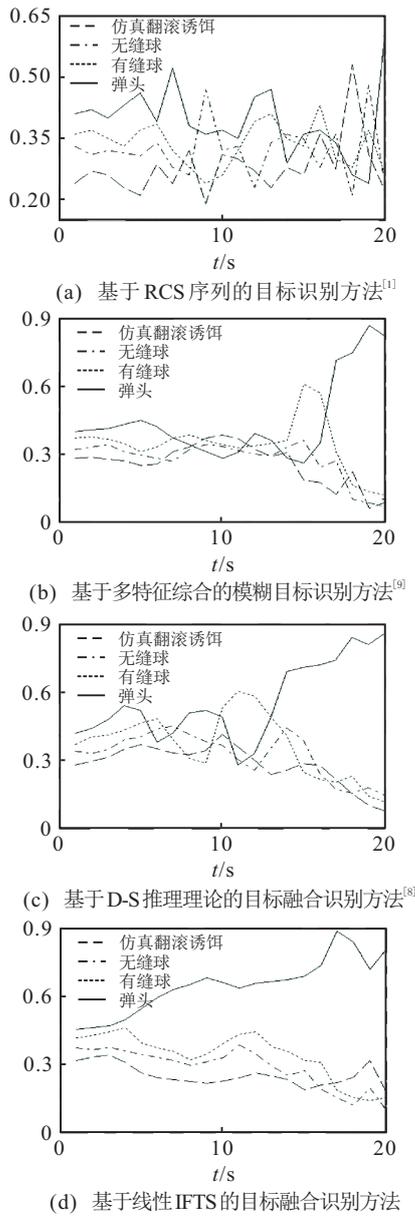


图 1 弹道中段目标识别结果

有效地区分目标类型; 常用的基于多特征、多识别手段融合目标识别方法能更全面地利用所获取的各类历史信息, 提高了目标识别性能, 但系统复杂, 整体寻优需要较长的脉冲积累时间, 算法实时性差, 无法满足防空反导紧迫战情的实际需求; 本文提出的基于线性 IFTS 的弹道目标融合识别方法较好地利用了 IFTS 对不确定数据集在描述和推理方面的优势, 成功地将目标识别信息的时序特性反映在一个线性变化的直觉模糊相关函数上, 以目标识别结果的时间积累替代当前时刻的识别信息, 充分考虑了探测信息间的随机依赖性, 较大程度地降低了目标识别错误率, 并增强了系统的鲁棒性能, 虽然模型求解需花费一定的时间资源, 但当线性 IFTS 预测模型确定后, 算法的识别速率迅速提高, 目标的正确识别时间均小于其他识别算法, 从而提高了反导防御系统的作战效能。

3.2 目标识别可靠性分析

为了对目标识别算法的可靠性进行分析, 本节以锥球体目标为例, 基于微波暗室测量样本数据进行仿真实验. 其中雷达采用步进扫频测量方式, 脉冲频率为 8.75~10.75 GHz, 步长为 20 MHz. 实验中, 首先提取目标数据的特征子像并在相同的实验平台下仿真, 给出本文算法与几种常用目标识别算法识别结果的空间散布图, 结果如图 2 所示, 其中“x”和“⊗”、“⊕”、“·”分别表示真弹头与干扰目标; 然后由实验参数设置的变化, 计算获取各识别算法的平均错误误差、平均识别率以及平均识别速度, 结果如表 1 所示。

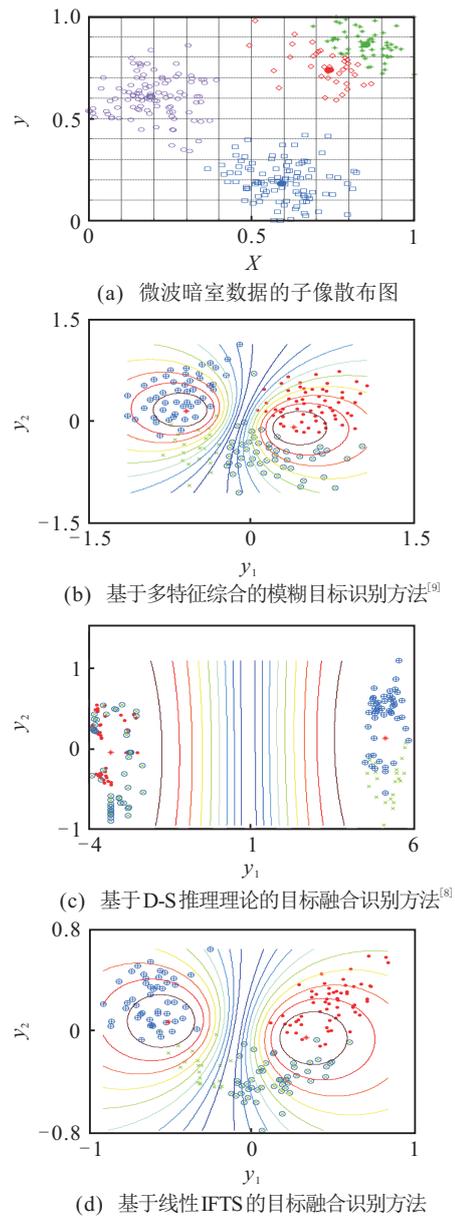


图 2 弹道中段目标识别结果空间散布

表 1 不同算法的目标识别性能对比表

算法	平均错误误差/%	平均识别率/%	平均识别速度/ μ s
文献 [1]	0.745	0.522	467
文献 [9]	0.412	0.746	598
文献 [8]	0.387	0.765	613
本文	0.234	0.857	547

从图2可以看出,本文算法将真弹头有效地分离开来,并保持较稳定的识别准确率,模型识别可靠性较好.由表1可知,本文算法对于真弹头的平均识别率较高,虽然运行速度比单特征识别慢,但在识别性能上的明显优势是单特征识别无法比拟的,并且克服了全局搜索导致时间过长的缺陷,在时间复杂度及识别准确率上都有比其他融合识别算法更大的优势.因此,对于兼顾识别效果及识别速度的弹道中段目标识别,本文算法是一种较好的选择.

4 结 论

弹道中段雷达目标识别是反导防御系统的关键技术之一,本文针对弹道目标识别时间资源有限的问题,提出了基于线性 IFTS 的目标融合识别方法.通过直觉模糊扩展原理定义直觉模糊线性相关函数,建立识别信息的时序变化模型,将各识别结果转换为随时间发展变化的直觉模糊变量,准确地反映了模糊探测信息间的实时相关特性;由 IFTS 拟合标准进行识别结果优化融合,充分利用了各类探测手段的信息优势,较大程度地缩短了目标正确识别的时间,提高了系统的识别效率.通过仿真分析,验证了模型能够取得较好的识别效果.如何减小算法对模型的依赖、优化模型参数的智能调控、进一步提高系统的泛化功能将是今后研究的重点.

参考文献(References)

- [1] Chen V C, Li F, Ho S S. Micro-doppler effect in radar-phenomenon, model and simulation study[J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 2006, 42(1): 2-21.
- [2] 刘进,冯德军,赵锋,等.弹道中段雷达目标识别仿真系统的关键模型及实现[J].系统仿真学报,2008,20(17): 4588-4592.
(Liu J, Feng D J, Zhao F, et al. Models and realization of target recognition simulation system in ballistic midcourse[J]. J of System Simulation, 2008, 20(17): 4588-4592.)
- [3] Li K, Liu Y, Huo K, et al. Estimation of micro-motion parameters based on cyclostationary analysis[J]. IET Signal Processing, 2010, 4(3): 218-223.
- [4] 邹小海,艾小锋,李永祯,等.基于微多普勒的圆锥弹头进动与结构参数估计[J].电子与信息学报,2011,33(10): 2413-2419.
(Zou X H, Ai X F, Li Y Z, et al. Precession and structural parameter estimation of the cone-shaped warhead based on the micro-doppler[J]. J of Electronics & Information Technology, 2011, 33(10): 2413-2419.)
- [5] 颜维,孙文峰,钱李昌,等.基于一维像序列的弹道中段目标进动特征提取[J].空军雷达学院学报,2011,25(2): 87-96.
(Yan W, Sun W F, Qian L C, et al. Precession feature extraction of ballistic midcourse target based on HRRP sequences[J]. J of Air Radar Academy, 2011, 25(2): 87-96.)
- [6] Patrice Pajusco, Pascal Pagani. On the use of uniform circular arrays for characterizing UWB time reversal[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2009, 57(1): 102-109.
- [7] 肖立,卢再奇,周剑雄,等.弹道中段目标质心位置估计[J].航空学报,2012,33(1): 110-117.
(Xiao L, Lu Z Q, Zhou J X, et al. Centroid position estimation of ballistic target in midcourse[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2012, 33(1): 110-117.)
- [8] 柏仲干,周丰,王国玉,等.弹道中段目标的融合识别[J].系统工程与电子技术,2006,28(9): 1338-1340.
(Bai Z G, Zhou F, Wang G Y, et al. Research on target recognition in the middle part of the ballistic trajectory[J]. Systems Engineering and Electronics, 2006, 28(9): 1338-1340.)
- [9] 王森,杨建军,孙鹏.基于多特征综合模糊识别方法的弹道中段目标识别[J].弹箭与制导学报,2011,31(5): 23-25.
(Wang S, Yang J J, Sun P. Target recognition research in ballistic midcourse based on fuzzy recognition of multi-feature fusion[J]. J of Projectiles, Rockets, Missile and Guidance, 2011, 31(5): 23-25.)
- [10] 郑寇全,雷英杰,王睿,等.基于确定性转换的 IFTS 预测[J].应用科学学报,2013,31(2): 204-211.
(Zheng K Q, Lei Y J, Wang R, et al. Prediction of IFTS based on deterministic transition[J]. J of Applied Science, 2013, 31(2): 204-211.)
- [11] 郑寇全,雷英杰,王睿,等.直觉模糊时间序列建模及应用[J].控制与决策,2013,28(10): 1525-1530.
(Zheng K Q, Lei Y J, Wang R, et al. Modeling and application of IFTS[J]. Control and Decision, 2013, 28(10): 1525-1530.)
- [12] 王丽敏,哈明虎,胡运权.一种基于模糊线性方程组的模糊随机时间序列模型[J].河北大学学报:自然科学版,2003,23(3): 227-231.
(Wang L M, Ha M H, Hu Y Q. A kind of fuzzy random time series model based on a fuzzy system of linear equations[J]. J of Hebei University: Natural Science Edition, 2003, 23(3): 227-231.)
- [13] 雷英杰,王宝树,苗启广.直觉模糊关系及其合成运算[J].系统工程理论与实践,2005,25(2): 113-118.
(Lei Y J, Wang B S, Miao Q G. On the intuitionistic fuzzy relations with compositional operations[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2005, 25(2): 113-118.)
- [14] 李晓漫,雷英杰.基于数值拟合的直觉模糊近似推理方法[J].空军工程大学学报:自然科学版,2008,9(1): 82-85.
(Li X M, Lei Y J. Approximate reasoning method based on intuitionistic fuzzy[J]. J of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2008, 9(1): 82-85.)