

## 改进的联合概率数据关联算法(JPDA)对红外 目标与诱饵的辨别

耿利祥, 陈 钱, 钱惟贤

(南京理工大学 近程高速目标探测技术国防重点学科实验室, 江苏 南京 210094)

**摘 要:** 红外诱饵干扰作为常见的影响红外跟踪能力的干扰手段发展的越来越先进, 如何有效的排除红外诱饵的干扰一直是红外目标跟踪的难题。文中在研究了红外目标与诱饵干扰的特征差异的基础上, 首次提出了将多目标跟踪策略应用于红外抗干扰跟踪中, 建立了一种可以融合多个特征的改进型联合概率数据关联(JPDA)的数据关联算法。最后, 利用该算法对抗干扰过程进行了仿真, 仿真结果表明: 与现有的抗干扰手段相比, 该数据关联方法对解决红外干扰形成的假目标、目标遮挡等红外目标识别的难题, 不仅实时性好, 而且准确率高。

**关键词:** 红外目标跟踪; 红外诱饵; 联合概率数据关联; 目标识别

**中图分类号:** TN911.73 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)02-0305-06

## Infrared aircraft-flare discrimination using improved JPDA algorithm

Geng Lixiang, Chen Qian, Qian Weixian

(Ministerial Key Laboratory of JGMT, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** It was a difficult problem in infrared target tracking field that how to effectively exclude the interference of infrared decoy, especially for that infrared decoy technique had developed more and more advanced as a common measure to interfere infrared tracking capability. Based on discussing characteristic difference of infrared targets and decoys, a multi-target tracking strategy to track excluding the infrared decoy was firstly proposed. And an improved joint probabilistic data association (JPDA) algorithm with fusion of multiple features was established. Finally, the process of tracking with excluding infrared decoy was simulated. Simulation results showed that the proposed algorithm can track target at real-time, which has higher accuracy for resolving the problem of the infrared target recognition that infrared decoys form false targets and the target block.

**Key words:** infrared target tracking; infrared decoy; JPDA; target discrimination

收稿日期: 2012-06-22; 修订日期: 2012-07-19

基金项目: 国家自然科学基金(61101199); 江苏省自然科学基金(BK201199)

作者简介: 耿利祥(1986-), 男, 博士生, 主要从事红外图像实时处理和红外目标探测识别与跟踪方面的研究工作。

Email: [genglixiang@yahoo.com.cn](mailto:genglixiang@yahoo.com.cn)

导师简介: 陈钱(1964-), 男, 博士生导师, 博士, 主要从事光电探测与图像处理, 光电信号处理与数字视频技术方面的研究工作。

Email: [chenq@mail.njust.edu.cn](mailto:chenq@mail.njust.edu.cn)

## 0 引言

红外目标跟踪过程中,由主动红外干扰(红外诱饵)引起的假目标、目标遮挡等问题一直是红外目标跟踪的研究热点和难点,特别是当目标在远距离成像阶段,目标的特征不明显,造成跟踪系统容易被干扰诱骗或丢失目标,所以鲁棒性和稳定性强的跟踪策略一直是红外成像制导中目标跟踪的重点。

在对抗红外干扰的方法中,很多学者都对其进行了深入的研究<sup>[1-2]</sup>,由于现代干扰机制<sup>[3-4]</sup>的发展越来越先进,所以抗干扰的方法也必须做相应的改进,朱梦宇等人提出双波段探测的方法,利用双波段特征区别目标和干扰<sup>[5]</sup>。但是,利用两种波段探测本身的成本就相对较高。杨卫平等采用了 D-S 证据理论进行决策层的融合得到综合判决<sup>[6]</sup>,Gilles Labonte 等人利用人工神经网络将目标与干扰的特征进行分类从而辨别出目标<sup>[7-8]</sup>。这些方法虽然也利用了目标的多种特征,但是它们都需要有目标与诱饵干扰的先验特征模型作为支撑,并且没有将目标的运动规律很好的融合到模型中,鉴于以上原因,当场景比较复杂的时候,这些算法很容易出现错误跟踪。

文中提出的多目标跟踪的抗干扰策略,是将场景中探测到的数据都作为潜在目标,通过基于多特征的改进型联合概率数据关联的算法,将干扰未出现阶段的图像序列中的目标特征提取后,实时建立目标特征模型,并把其作为抗干扰跟踪的先验知识,形成判决目标或干扰的依据,计算每个潜在目标的似然概率,从而确定真实目标。算法集合了 JPDA 的优点,对目标的航迹滤波优越性和对多目标辨别的稳定性,更好地利用了目标的运动特性,对目标的定位更加稳定准确。

## 1 抗干扰跟踪

红外目标跟踪的抗干扰过程的具体步骤如图 1 所示。在正常跟踪的情况下,通过干扰检测模块检测出干扰的出现,然后抗干扰跟踪模块会对视场内所有可能的潜在目标继续跟踪,同时计算每个潜在目标与真实目标的相似程度(图 1 中的目标置信度),当这种相似程度达到一定的阈值的时候,目标被确

定,然后转入正常跟踪。

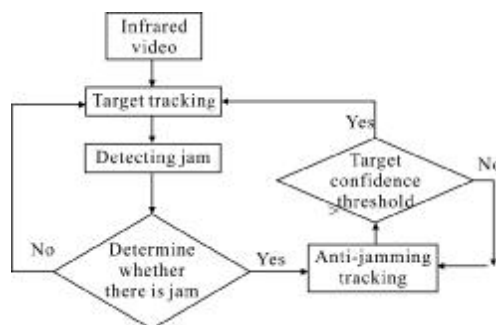


图 1 红外抗干扰跟踪

Fig.1 Target tracking with excluding infrared decoys

干扰检测模块的作用是用来检测正常跟踪过程中所遇的突发干扰事件,即是被跟踪目标为了躲避跟踪而主动释放的红外干扰。而对这些干扰的检测的原理则是利用图像序列中目标的特征,根据目标特征在序列图像中的连续性,当特征出现突变,连续性异常的情况下,判断为干扰出现。算法在抗干扰跟踪模块中,建立了基于改进的联合概率数据关联的多目标跟踪方法,对所有视场内的潜在目标进行跟踪。在抗干扰过程中将测得的数据用来计算潜在目标与真实目标的相似程度,以此作为辨识目标与干扰的判决依据,将目标与干扰分离后的数据作为后验知识来巩固先前的判决。最终确定要跟踪的目标。

## 2 目标特征

目标与诱饵干扰的特征是区别它们的主要依据,红外图像经过图像去噪和分割等处理提取出目标,为了更好地描述这些目标的特征,算法融合了参考文献[10-11]中的目标特征:辐射能量特征、形状特征、运动特征。

在众多的红外干扰中,大多数干扰的能量辐射会呈现出明显的变化。因此红外辐射强弱是检测红外干扰出现的重要标志。同时,红外干扰的能量辐射随时间有明显的变化,而目标对于时间的变化相对稳定。目标距离较远时形状特征虽然并不明显,但是由于红外干扰没有主动的动力,诱饵一旦被释放后,其出现的拖尾等形状特征与目标有显著的区别。根据参考文献[11]的论述,目标运动规律特征是目标亚成像阶段最主要的特征,这也是采用对运动特性敏感的 JPDA 算法作为跟踪基础的原因之一。

### 3 改进的联合概率数据关联滤波

联合概率数据关联算法为处理多目标跟踪的有效算法,然而也有其固有的缺陷,文中在改进了联合概率数据关联的基本框架的基础上,引入了多个特征的关联以及置信度计算策略来处理多个目标与测量之间分配问题。

#### 3.1 红外图像概率描述

将红外图像中信息用随机变量  $I$  表示,那么对于图像的目标探测问题就转化为,通过红外视频序列,寻找一个最大后验估计。如果把真实信息表示为随机变量  $W$ ,根据贝叶斯理论, $W$  的概率就可以通过图像  $I$  得到:

$$p(W|I) = \frac{p(I|W)p(W)}{p(I)} \quad (1)$$

由于,图像中的大部分信息中只有目标信息是有用的,所以用  $X_t$  表示在  $t$  时刻的目标状态,图像序列表示为  $I_t, I_{t-1}, \dots$ 。那么,最大后验跟踪的任务就是估计当  $p(X_t|I_t, I_{t-1}, \dots)$  最大时候的目标状态。根据贝叶斯法则,得到:

$$p(X_t|I_t, I_{t-1}, \dots) = \frac{1}{C} p(I_t|X_t) p(X_t|I_{t-1}, I_{t-2}, \dots) \quad (2)$$

式中:  $p(X_t|I_{t-1}, I_{t-2}, \dots)$  包含了  $X_t$  先验信息,即基于先验信息估计对  $X_t$  的预测。从而图像中目标的状态构成了马尔可夫链:

$$p(X_t|I_{t-1}, I_{t-2}, \dots) = \int_{x_{t-1}} p(X_t|X_{t-1}) p(X_{t-1}|I) \quad (3)$$

#### 3.2 状态估计与更新方程

定在  $k$  时刻有  $m(k)$  个认定的测量  $Z^{m(k)}$ ,那么就有与之对应的  $m(k)+1$  个关联事件产生  $H^{m(k)+1}$ ,关联事件  $h_i(k) \in H, i=0, \dots, m(k)$ 。

定义关联概率  $\xi_i(k) = P\{h_i(k)|Z^k\}$ ,且

$$\sum_{i=0}^{m(k)} \xi_i(k) = 1 \quad (4)$$

那么  $k$  时刻目标状态条件均值:

$$\hat{x}(k|k) = E[x(k)|Z^k] = \sum_{i=0}^{m(k)} E[x(k)|h_i(k), Z^k] \xi_i(k) = \sum_{i=0}^{m(k)} \hat{x}_i(k|k) \xi_i(k) \quad (5)$$

式中:  $\hat{x}_i(k|k)$  为第  $i$  个关联事件的更新状态,这里采用卡尔曼滤波对其进行更新估计:

$$\hat{x}_i(k|k) = \hat{x}_i(k|k-1) + \kappa(k) \tilde{z}_i(k), i=1, \dots, m(k) \quad (6)$$

式中:  $\tilde{z}_i(k)$  为测量新息;  $\kappa(k)$  为滤波器增益。由于  $\sum_{i=0}^{m(k)} \xi_i(k) = 1$ ,从而得到状态更新方程:

$$\hat{x}(k|k) = \hat{x}(k|k-1) + \kappa(k) \sum_{i=1}^{m(k)} \xi_i(k) \tilde{z}_i(k) \quad (7)$$

#### 3.3 联合概率和目标置信度计算

为了能够有效的得到目标与干扰的置信度,首先要选取它们的多个特征作为判定依据,同时也将目标的特征作为更新目标状态的信息。假设选取的特征个数为  $S$ ,特征状态用  $X_1, X_2, \dots, X_S$  表示,运动状态用  $X_M$  表示,根据公式(2)和(4)中的联合概率可得:

$$\xi_i(k) = p(X_1, X_2, \dots, X_S, X_M|Z^k) = \frac{1}{C} p(Z(k)|X_1, X_2, \dots, X_S, X_M, Z^{k-1}) p(X_1, X_2, \dots, X_S, X_M, Z^{k-1}) \quad (8)$$

式中:  $p(X_1, X_2, \dots, X_S, X_M, Z^{k-1})$  为联合先验概率,可以由联合概率数据关联滤波的方法具体得到;  $C$  为归一化参数。而对于另一项联合特征似然概率  $p(Z(k)|X_1, X_2, \dots, X_S, X_M, Z^{k-1})$ ,由于多个特征视为相互独立,所以可以得到:

$$p(Z(k)|X_1, X_2, \dots, X_S, X_M, Z^{k-1}) = p(Z(k)|X_1, Z^{k-1}) p(Z(k)|X_2, Z^{k-1}) \dots p(Z(k)|X_S, Z^{k-1}) p(Z(k)|X_M, Z^{k-1}) \quad (9)$$

当检测到干扰出现时,目标将瞬间被遮盖,此时探测得到的数据已经不能更新目标的状态。但是,在红外图像中由于干扰形成的目标块也包含了目标的位置信息,所以,仍然可以根据图像中的目标块对目标的运动状态进行更新估计。

运动状态的概率密度函数  $p(Z(k)|X_M, Z^{k-1})$  可以由联合概率数据关联滤波器直接得到。而对于特征的概率密度函数,因为受干扰影响,此时目标的特征被淹没在干扰中,所以在概率密度函数中采用稳定跟踪时的目标特征来计算特征量似然概率。假定  $k_F$  时刻出现干扰,在  $S$  个特征中,对特征  $X_S$  则有:

$$p(Z(k)|X_S, Z^{k-1}) = p(Z(k)|X_S, Z^{k_F}) = \frac{1}{c'} \phi(x_S(k) - x_F) \quad (10)$$

式中:  $\phi(x)$  为一个窗函数,  $\phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_S} \exp(-\frac{x^2}{2\sigma_S^2})$ ;

因子  $c'$  起着将正态密度限制在认定区域的作用。  $x_S(k)$

表示  $k$  时刻测量得到的特征量;  $\mathbf{x}_T$  表示稳定跟踪时的目标特征量。

由以上推理可以得到目标状态更新估计的关联概率,实质上就是求得的当前测量与稳定跟踪时刻的目标似然概率,而为了完整的区分开目标和非目标,算法采取了一套继承关联的决策管理策略。定义继承为当一个目标有多个干扰的时候,或者遮盖目标的干扰块分离成多个块的时候,那么,可以肯定的是真实目标就在其中一个干扰块中,或者就是其中的一个测量块,此时,定义所有这些测量块为与同一目标的继承。假定目标  $T$  投出的干扰与目标在  $k$  时刻分离成  $I(k,T)$  个目标块,即红外图像中分割得到的为目标  $T$  继承关联的测量为  $\{Z_1^{k,T}, Z_2^{k,T}, \dots, Z_{I(k,T)}^{k,T}\}$ ,显然目标  $T$  被包含在其中,那么任务就是在这个测量中确定这个准确目标。

将  $\vartheta_T$  作为目标  $T$  的置信度,定义一个目标的置信度为 1,则有目标  $T$  的置信度为

$$\vartheta_T = \sum_{i=1}^{I(k,T)} \vartheta(Z_i^{k,T}) = 1 \quad (11)$$

将与目标  $T$  的继承测量块的关联概率作为测量块的置信度依据,则定义  $\vartheta(Z_i^{k,T}) = \frac{1}{\rho} \xi_i(k)$ ,其中  $\frac{1}{\rho}$  为置信度归一化参数。

通过以上置信度的计算方法的讨论,具体可以知道当空中出现多个干扰时,即通过上述方法找到稳定跟踪时候的目标,对于某个目标的继承,只要计算这个目标的所有继承的置信度,将置信度大于阈值  $\vartheta_m$  的测量作为目标进行跟踪,从而排除干扰。最恶劣的情况下,即在目标被遮挡情况下,则是先将目标定位在目标被遮挡的测量块,当目标与干扰分离的瞬间,将置信度最高的作为待定目标。此时有可能目标在遮挡过程中自身做大幅度机动动作,因此,在目标与干扰分离时,运动特征可能会影响似然概率的计算,但是其他特征仍然是可用的,所得待定目标的概率将低于阈值,然后随着分离过程的进行,真实目标的似然概率将会越来越大,最终超过阈值。所以,只要真实目标和假目标在视场范围内,算法都可以将其有效辨识。

由于文中抗干扰算法是联合概率密度算法的扩展,本质上是多目标跟踪的抗干扰,这样就将稳定跟踪时候的目标信息作为先验信息来区别目标和诱

饵干扰。然后,采用了置信度的计算策略,利用后验信息来更新跟踪的数据状态和置信度,使区别目标与干扰更准确。

## 4 实验结果与分析

为了验证文中的算法对红外目标和诱饵干扰的分辨能力,采用了实验模拟仿真了算法在红外图像中抗干扰的过程,经过多次实验证明算法的可靠性,最后将本算法与人工神经网络方法在强干扰的情况下做了相应比较。通过大量的仿真实验,算法采用的置信度阈值的经验值  $\vartheta_m=0.8$ 。

### (1) 诱骗式干扰的辨别

首先,实验模拟了一种目标处于远距离亚成像阶段的诱骗式干扰,即投放与目标极其相似的干扰,如图 2 所示。图 2 中,图(a)为正常跟踪;图(b)为检测出干扰出现;图(c)为初步辨别目标与干扰;图(d)成功辨别出目标;图(e)最终稳定跟踪目标;由于干扰的温度与目标极为相似,所以无法通过传统的红外辐射的强度的方法来判断干扰的存在,但是利用其他特征如图(b)中所示检测出干扰,然后进一步辨别目标。

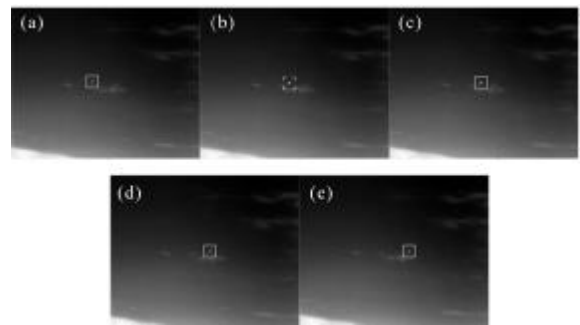


图 2 利用文中算法对抗诱骗式干扰跟踪的实验仿真

Fig.2 Simulation results of target and tricked decoys discrimination using the proposed algorithm

表 1 图 2 中目标和干扰的置信度

Tab.1 Degree of confidence in Fig.2

| Confidence | (a) | (b) | (c)   | (d)   | (e)   |
|------------|-----|-----|-------|-------|-------|
| Target     | 1   | 1   | 0.627 | 0.758 | 0.887 |
| Decoy      | 1   | 1   | 0.373 | 0.242 | 0.113 |

由于(a)和(b)中目标与干扰未分离,作为一个数据块,所以其置信度都为 1。

从图 2 和表 1 中可以看出,算法在图 2(b)中检

测出干扰,在图 2(c)中辨别出干扰与目标,到图 2(e)中目标置信度大于阈值,转入稳定跟踪模块,最终成功地排除干扰跟踪目标。

(2) 遮挡式干扰的辨别以及与其他算法的比较

遮挡式的燃烧型干扰是目标投放出来的强干扰,干扰能够将目标遮住。虽然此种干扰的热辐射特征较目标有很大不同,很容易检测出来,但是由于干扰直接将目标遮挡,当目标与干扰分离的时候,其辐射又会变得与目标相似,所以较难识别出目标。图 3 中,图(a)为正常跟踪状态;图(b)、(e)和(h)为检测到干扰出现且目标被遮挡;图(c)和(f)为目标部分被遮挡并初步辨别目标与干扰;图(d)、(g)和(i)为抗干扰跟踪模块对目标跟踪。在文中的方法中,当目标被遮挡时,将跟

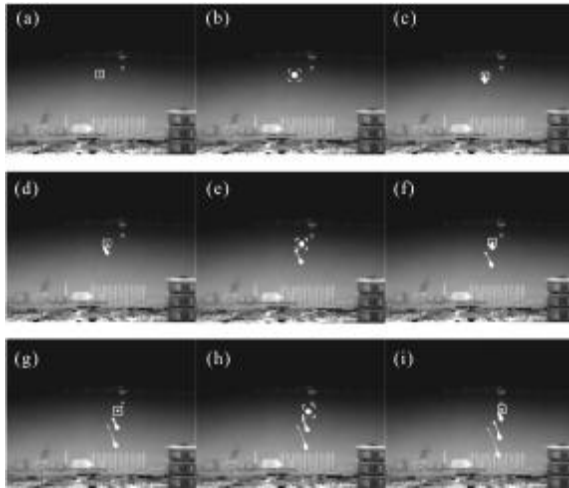


图 3 利用文中算法对抗遮挡式干扰跟踪的实验仿真  
Fig.3 Simulation results of target and sheltered decoys discrimination using the proposed algorithm

踪门始终锁定在测量块,如图(b)、(e)和(h)。此时,测量块的置信度也置为 1,因为此时可以确定目标就在测量块中。当目标与干扰分离时,算法再通过计算各个分离得到的测量块的置信度,从而达到始终锁定目标的目的。目标和干扰的置信度如下表所示。

表 2 图 3 中目标和干扰的置信度

Tab.2 Degree of confidence in Fig.3

| Confidence | (a) | (b) | (c)   | (d)   | (e) | (f)   | (g)   | (h) | (i)   |
|------------|-----|-----|-------|-------|-----|-------|-------|-----|-------|
| Target     | 1   | 1   | 0.602 | 0.911 | 1   | 0.721 | 0.955 | 1   | 0.846 |
| Decoy1     | 0   | 1   | 0.398 | 0.089 | 0   | 0     | 0     | 0   | 0     |
| Decoy2     | 0   | 0   | 0     | 0     | 1   | 0.279 | 0.045 | 0   | 0     |
| Decoy3     | 0   | 0   | 0     | 0     | 0   | 0     | 0     | 1   | 0.154 |

同时,为了验证文中算法的可靠性,将参考文献中采用人工神经网络的算法和文中算法做了相应的比较,图 4 所示为人工神经网络法辨别目标和干扰的实验仿真过程。

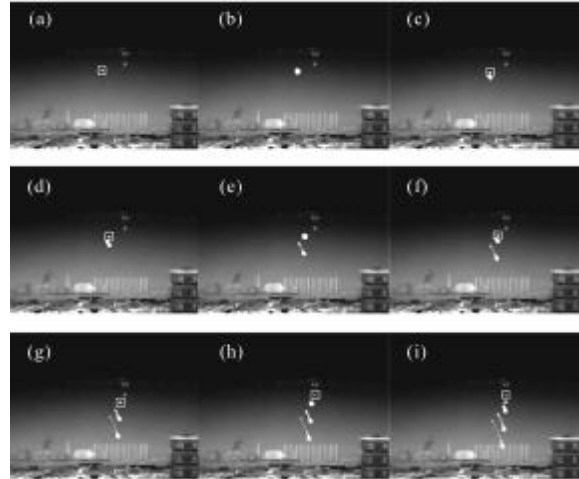


图 4 人工神经网络法辨别目标和干扰的仿真效果

Fig.4 Simulation results of target and decoys discrimination using artificial neural networks

可以看出,人工神经网络法虽然在一定条件下也能辨别红外目标与干扰,但是当目标被干扰完全遮挡的情况下无法对目标定位,图(a)为正常跟踪状态;图(c)、(d)、(f)和(g)为目标与干扰分离时候勉强能够辨别出目标;图(b)和(e)中算法没办法识别目标。当环境中出现了多个干扰,如图(h)中,目标被遮挡后,人工神经网络法出现了错误的识别,将目标定位在了错误地方;因而,图(i)出现了错误跟踪。

通过比较可以看到,文中基于改进的 JPDA 的算法能够非常有效的分辨干扰和目标,特别是当目标被遮挡等复杂情况下,文中算法明显优于其他算法,有很好的抗干扰跟踪效果。

5 结 论

分析了红外目标和干扰的特性,然后基于改进

联合概率数据关联算法建立了抗干扰跟踪模型,将目标的多个特征信息融合作为识别目标和干扰的基础,模拟了红外目标释放干扰的过程,实验仿真证明在存在红外干扰的环境中,运用文中算法能够有效实时地识别出目标和干扰,从而稳定地跟踪目标,为红外抗干扰研究提供了一条新的思路和方法。

#### 参考文献:

- [1] Sebastiaan P Van den Broek, Eric J Bakker, Dirk-Jan de Lange, et al. Detection and classification of infrared decoys and small targets in a sea Background [C]//SPIE, 2000, 4029: 70-80.
- [2] KC Stengel. Discrimination of closely spaced objects using infrared sensors[C]//SPIE, 1994, 2232: 340-348.
- [3] Fang Youpei, Qian Jianping. Jamming technology research to the imaging IR guidance missile [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2000, 29(3). (in Chinese)  
方有培, 钱建平. 对红外成像制导导弹的干扰技术研究[J]. *红外与激光工程*, 2000, 29(3).
- [4] Wang Chaoqun. Some characteristics of infrared jam and its simulation technique on infrared guided missile [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2001, 30(4): 163-167. (in Chinese)  
汪朝群. 红外诱饵对红外制导导弹的干扰特性及仿真. *红外与激光工程*, 2001, 30(4): 163-167.
- [5] Zhu Mengyu, Zhao Baojun, Han Yueqiu. IR point target recognition from the bait by the signal processor of two waveband[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2003, (32)1: 78-81. (in Chinese)  
朱梦宇, 赵保军, 韩月秋. 红外双波段信号处理器对目标和诱饵的识别[J]. *红外与激光工程*, 2003, (32)1: 78-81.
- [6] Zeng Xianwei, Fang Yangwang, Wang Hongqiang, et al. Technology of Radar/IR dual-mode seeker against infrared decoy jamming [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(6): 1054-1058. (in Chinese)  
曾宪伟, 方洋旺, 王洪强, 等. 雷达/红外双模导引头抗红外诱饵干扰[J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(6): 1054-1058.
- [7] Gilles Labonte, Deck W C. Infrared target-are discrimination using a ZISC hardware neural network [J]. *Journal of real-time image processing*, 5(1): 2010, 11-32.
- [8] Labonte G. On the efficiency of OLS reduced probabilistic neural networks for aircraft-flare discrimination [C]// *Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks*, Portland, 2003, 3: 2306-2311.
- [9] ROECKER J A. A class of near optimal JPDA algorithms[J]. *Aerospace and Electronic Systems*, 1994, 2(4): 504-510.
- [10] Zhao Fengwei, Shen Zhenkang, Li Jicheng. Study on simulation of infrared decoy recognition Part1:gray-scale time sequence analysis [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2002, 31(4) :286-289. (in Chinese)  
赵锋伟, 沈振康, 李吉成. 红外诱饵辨识的仿真研究(一)灰度时间序列分析 [J]. *红外与激光工程*, 2002, 31 (4) :286-289.
- [11] Zhao Fengwei, Shen Zhenkang, Li Jicheng. Study on simulation of infrared decoy recognition part2: movement feature analysis [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2002, 31(5): 395-398. (in Chinese)  
赵锋伟, 沈振康, 李吉成. 红外目标与诱饵辨识的仿真研究(二)运动特征分析[J]. *红外与激光工程*, 2002, 31(5): 395-398.