

采用 D-S 证据理论的双色红外小目标融合检测*

李秋华, 李吉成, 沈振康

(国防科技大学 ATR 重点实验室, 湖南长沙 410073)

摘要:针对远距离低信噪比条件下目标检测难的实际问题,提出采用 D-S 证据理论的双色红外小目标融合检测方法。该方法首先采用统计检测方法对各传感器图像进行目标检测处理;接着采用“或”逻辑对各传感器的目标检测结果进行融合,以降低目标漏检的可能性;然后在各传感器图像中提取融合检测结果中各候选目标区域的多个图像特征作为进一步消除虚警的证据;最后采用 D-S 证据理论对各候选目标区进行基于多特征的目标融合识别处理,并将识别结果作为整个系统最终的目标检测输出。实验结果证明了该算法的有效性。

关键词:双色红外; 目标检测; 信息融合; D-S 证据理论

中图分类号:TP391 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-2276(2005)03-0266-06

Dual band IR small target fusion detection using the D-S evidence theory*

LI Qiu-hua, LI Ji-cheng, SHEN Zhen-kang

(The Key Laboratory for ATR in National University of Defence Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Aim at the problem of detecting for distant small target with very low SNR, a method of two color IR small target fusion detection using D-S evidence theory is proposed. The algorithm firstly detects targets from each sensor using statistics detection method and fuses the results using “OR” logic to reduce the probability of being missed. Then extracts the multiple image features of these target candidate areas in fusion detection result from the two sensor images as the evidence to eliminate false detection. Finally, distinguishes the false target from real target using the D-S evidence theory based on multiple features, and sends the recognition result to the target detection output of the whole system.

Key words: Dual band IR; Target detection; Information fusion; D-S evidence theory

0 引言

近年来,随着基于多传感器系统的军事作战平台

的形成和发展,多传感器信息融合已成为信息处理技术领域的研究热点问题。对于多传感器的分布式检测,人们已经做了大量的研究^[1]。而在双色红外成像系

收稿日期:2004-07-05; 修订日期:2004-10-08

* 基金项目:武器装备预研基金项目(514830202,5147064003KG0101)

作者简介:李秋华(1976-),男,广西桂林人,博士生,主要从事红外成像制导、目标识别及 DSP 开发等研究。

统中,如何充分利用双色红外传感器获得的图像信息来提高目标的检测概率是实现远距离探测和抗干扰能力的关键。其中,实现双色红外成像系统中远距离弱目标检测的一种有效途径就是通过对目标在两个不同红外波段的成像信息进行融合处理。这里所涉及的图像信息融合根据信息表征层次的不同,可以分为像素级融合、特征级融合和决策级融合。像素级融合是直接对各传感器图像的像素点灰度信息进行综合的过程。特征级融合是对图像进行特征提取后,对各传感器图像的特征信息进行综合处理的过程。而在进行决策级融合之前,各传感器已独立地完成了决策或分类任务,融合工作实质上是根据各局部判决做出全局的最优决策。

决策级融合检测的核心思想是:各传感器根据各自的观测结果做出局部判决(硬判决或软判决),然后将判决结果由通信信道传送到融合中心,再由融合中心对各局部判决进行综合处理做出最终判决。对于局部判决为“硬”判决(非“0”即“1”)的情况,典型的融合规则有“与”、“或”逻辑和“K秩”方法。“与”逻辑的意义为:当所有传感器都判决为目标点时,融合中心才将该像素判决为目标点;“或”逻辑的意义为:只要有一个传感器判决为目标点,融合中心就将该像素判决为目标点;“K秩”方法则是当N个传感器中有多于K个判决为目标点时,融合中心才将该像素判决为目标点。另外还有些方法采用各个传感器的性能参数对局部二值判决结果进行自适应加权处理^[2]等。不难看出,以上方法都是针对融合规则的研究,前提是各传感器给出明确的二值判决,但是各局部传感器的决策过程本身就是一个信息损失的过程。而且经过简单的分析就可以发现“与”逻辑融合检测虽然可以在很大程度上降低目标检测过程中的虚警概率,但是却要求各局部传感器对目标的检测率达到100%,否则将导致系统检测效率的极大下降,因此不具备抗干扰与传感器故障容忍性能;另一方面,“或”逻辑融合检测虽然可以在局部传感器发生故障或受到干扰等条件下保证较高的目标检测率,但是却带来了更高的虚警率,增加了后续处理的困难。为了在提高系统的目标检测概率的同时尽可能地降低虚警概率,本文提出了一种采用D-S证据理论的双色红外小目标融合检测

方法。

1 红外图像中小目标统计检测方法

在远距离空中小目标成像的红外场景中,各像素的灰度值可采用如下公式表示:

$$z(i,j)=tW+n(i,j)(1-W) \quad (1)$$

式中 $z(i,j)$ 为像素点 (i,j) 的灰度值; t 为目标信号,可假设为均值 μ_t 方差 δ_t^2 的高斯随机变量; $n(i,j)$ 为背景杂波,其取值为满足均值 μ_b 方差 δ_b^2 的正态分布随机变量; $W=\sum_{(m,n)\in T}\delta(m,n)$,为目标在图像平面中的成像区域, T 是目标在当前帧图像中所占的像素集。根据经典统计判决理论,红外小目标检测可以描述为一个二元假设检验问题:

$$\begin{cases} z=n, H_0 \\ z=t, H_1 \end{cases} \quad (2)$$

式中 H_0 表示当前像素为背景点; H_1 表示当前像素为目标点。根据以上假设可以得到在两个假设条件下各像素点的灰度分布概率,分别表示为:

$$p(z/H_0)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta_b}\exp\left(-\frac{(z-m_b)^2}{2\delta_b^2}\right) \quad (3)$$

$$p(z/H_1)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta_t}\exp\left(-\frac{(z-m_t)^2}{2\delta_t^2}\right) \quad (4)$$

当目标距离传感器较远时,目标为淹没在背景杂波与噪声中的点状物,所占图像平面中的像素数比例不超过1%。因此,目标的存在对整个图像的像数灰度分布的影响可以忽略。所以可采用整个图像的灰度均值和方差对背景杂波的灰度分布进行估计。另一方面,对目标灰度分布的估计采用图像中灰度值最高的前1%个像素的灰度均值与方差来估计。在得到目标与背景的灰度分布估计后,根据似然比检测理论有:

$$l(z)=\frac{p(z/H_0)}{p(z/H_1)} \quad (5)$$

$$d(z)=\begin{cases} H_1, l(z)\geq\lambda \\ H_0, l(z)<\lambda \end{cases} \quad (6)$$

式中 λ 为决策。这里选择 $\lambda=0.01$ ，即认为目标像素与背景像素在图像中出现的先验概率之比为 1:100。

2 红外双波段“或”逻辑融合检测

在双色红外成像系统中,首先采用统计检测方法对各传感器获得的图像进行目标检测判决得到表示局部检测结果的二值图(采用 0 表示背景点,1 表示目标点),然后将该二值图通信到中心处理器。在中心处理器中,采用“或”逻辑^[3]对两个局部传感器的检测结果进行融合处理,得到双波段融合检测结果。具体逻辑关系如表 1 所示。

表 1 双波段“或”逻辑融合检测关系表

Tab.1 Relation of “OR” logic fusion detection for the dual band

Long IR sensor decision	Middle IR sensor decision	Fusion center decision
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

从表 1 可以看出,融合中心将完全保留各传感器所得到的目标候选点,这样就可可在最大程度上降低目标漏检的可能性,为提高目标检测概率提供了条件。

3 目标特征提取

在融合中心,首先对双波段融合检测结果进行聚类得到多个目标候选区域;然后再提取各候选区域在各传感器图像中的灰度均值、方差、对比度以及双色比等特征作为小目标识别的证据。目标的各个特征定义如下:

(1) 灰度均值

$$\mu_s = \frac{\sum_{(i,j) \in \Theta} f_s(i,j)}{|\Theta|} \quad (7)$$

式中 μ_s 为候选区域在第 $s(s=1,2)$ 个传感器图像(分别为长波和中波红外图像)中的灰度均值; Θ 为候选区域在图像中所占的像素集; $|\Theta|$ 表示该候选区域所包含的像素数; $f_s(i,j)$ 为第 $s(s=1,2)$ 个传感器图像,

这里分别为长波和中波红外图像。

(2) 方差

$$\delta_s^2 = \frac{\sum_{(i,j) \in T} (f_s(i,j) - m_s)^2}{|\Theta|} \quad (8)$$

式中 δ_s^2 为候选区域在第 $s(s=1,2)$ 个传感器图像中的灰度方差。

(3) 对比度

$$C_s = \frac{\mu_s}{\mu'_s} \quad (9)$$

$$\mu'_s = \frac{\sum_{(i,j) \in T'} f_s(i,j)}{|\Theta'|} \quad (10)$$

式中 C_s 为候选区域在第 $s(s=1,2)$ 个传感器图像中的对比度; Θ' 为与该候选区域相邻的图像方框区域,用来估计该候选区域附近的局部背景灰度均值; $|\Theta'|$ 表示该图像方框区域所包含的像素数,这里取 $|\Theta'| = 2\Theta$ 。

(4) 双色比

人为干扰物由于需要较大的辐射强度其温度将远高于目标和背景,而目标的温度又高于背景,而固定温度的物体在双波段红外成像传感器中的辐射通量之比是固定的,因此可以根据目标与干扰物及背景在双波段图像中的平均灰度(与辐射通量成正比)比值的差异来区别目标与干扰物及背景^[4,5]。目标的双色比定义为:

$$R = \mu_1 / \mu_2 \quad (11)$$

式中 R 为候选区域在两个波段的红外图像中的灰度均值比,即双色比; μ_1 和 μ_2 分别为该候选区域在长波与中波红外图像中的灰度均值。

4 采用 D-S 证据理论的多特征目标融合识别

在得到某个候选区域的多个特征之后,首先,根据该区域的多个特征值采用相应的基本概率分配函数计算该候选区域基于各个特征的属于目标和背景的基本可信度及不确定度;然后,应用 D-S 正交和规则对来自多个特征的证据进行综合,得到该候选区域

属于目标和背景的信任度和不否定度,即置信区间;最后,根据决策规则对该候选区域进行判决得到目标识别结果。具体过程简述如下:

(1) 确定基本概率分配函数

在应用D-S证据理论对所得到的候选区域进行基于多特征的融合识别,消除背景杂波和人为干扰对目标检测的影响之前,必须确定候选区域基于各个特征的基本概率分配函数。采用高斯函数来拟合基于各个特征的基本概率分配函数获得了良好的识别效果,具体方法如下(为方便叙述,对候选区域的各个特征进行编号,即令 $F_k, k=1, \dots, 7$ 分别为 $\mu_1, \delta_1^2, C_1, \mu_2, \delta_2^2, C_2, R$):

首先,在对各种背景条件下的样本红外图像进行处理得到多个目标候选区域后,分别统计属于目标的所有候选区域和属于背景的所有候选区域的各个特征的平均值和方差,具体公式如下:

$$m_k(T) = \frac{\sum_{i=1}^M F_k}{M} \quad (12)$$

$$v_k(T) = \frac{\sum_{i=1}^M (F_k - m_k(T))^2}{M} \quad (13)$$

式中 $m_k(T)$ 和 $v_k(T)$ 分别为属于目标的所有候选区域的第 k 特征 F_k 的平均值和方差; M 为属于目标的所有候选区域的个数。属于背景的所有候选区域的第 k 特征 F_k 的平均值 $m_k(B)$ 和方差 $v_k(B)$ 的定义与 $m_k(T)$ 和 $v_k(T)$ 类似,这里不再赘述。

然后,采用高斯函数对基于各个特征的基本概率分配函数进行拟合,采用公式表示为:

$$m_k(T) = \frac{1}{\sqrt{2\pi v_k(T)}} \exp\left(-\frac{(F_k - m_k(T))^2}{2v_k(T)}\right) \quad (14)$$

$$m_k(B) = \frac{1}{\sqrt{2\pi v_k(B)}} \exp\left(-\frac{(F_k - m_k(B))^2}{2v_k(B)}\right) \quad (15)$$

式中 $m_k(T)$ 和 $m_k(B)$ 分别为某候选区域在第 k 特征量为 F_k 时该候选目标区域为目标和背景的基本可信度,即基本概率分配函数。

(2) 计算信任度和不否定度

在目标检测应用中,D-S证据理论的识别框架包括两个元素,即 $\Omega = \{T, B\}$,其中 T 表示目标, B 表示背景。对于采用单一特征 $F_k(k=1, \dots, 7)$ 的候选区域识别算法,可以采用相应的基本概率分配函数来描述它在目标识别过程中的不确定性。定义基本概率分配函数 m_k 为 $m_k: 2^\Omega \rightarrow [0, 1]$ 的映射,必须满足如下条件:

$$m_k(\phi) = 0 \quad (16)$$

$$m_k(T) + m_k(B) + m_k(\Omega) = 1 \quad (17)$$

式中 $m_k(T)$ 和 $m_k(B)$ 分别为仅依据特征 F_k 判决某候选区域为目标和背景的基本可信度; $m_k(\Omega)$ 为该判决过程中的不确定度。采用D-S证据理论中的正交和规则对基于各个特征的多个基本可信度进行复合得到基于特征融合的基本可信度。复合规则表示为:

$$m(A) = (m_1 \oplus m_2 \oplus \dots \oplus m_7)(A) = K^{-1} \sum_{\cap A_i = A} \left[\prod_{1 \leq k \leq 7} m_k(A_i) \right] \quad (18)$$

式中 $A, A_i = \{T, B, \Omega\} \subseteq \Omega$; m 为多证据复合后的基本概率分配函数; $K = 1 - Conflict$,是反映证据冲突程度的加权系数。而多证据冲突程度的计算公式可表示为:

$$Conflict = \sum_{\cap A_i = \phi} \left[\prod_{1 \leq k \leq 7} m_k(A_i) \right] \quad (19)$$

在得到复合基本概率分配函数后,可以根据以下公式计算得到多证据复合判决的信任度函数和不否定度函数:

$$bel(A) = \sum_{A_i \subseteq A} m(A_i) \quad (20)$$

$$pl(A) = \sum_{A_i \cap A \neq \phi} m(A_i) \quad (21)$$

式中 $\{A, A_i = T, B\} \subseteq \Omega$; $bel(A)$ 和 $pl(A)$ 分别表示事件 A 为真的信任度和不否定度;对于 $\forall A \subseteq \Omega, A$ 的信任度等于 A 中所有子集的基本可信度之和。在目标检测应用中,信任度函数和不否定度函数可简化为:

$$\left. \begin{aligned} bel(T) &= m(T) \\ bel(B) &= m(B) \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

$$\left. \begin{aligned} pl(T) &= m(T) + m(\Omega) \\ pl(B) &= m(B) + m(\Omega) \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

从上式可以看出,某候选区域被判决为目标或背景的信任度是复合基本可信度,而不否定度为基本可信度与不确定度之和,即 $bel(A) \leq pl(A), \forall A \subseteq \Omega$ 。 $bel(A)$ 和 $pl(A)$ 分别表示在给定条件下该候选区域为目标或背景的最小概率和最大概率,即该区域为目标或背景的概率区间即不确定区间为 $[bel(A), pl(A)]$ 。

(3) 决策规则

在证据理论应用中,一般可以根据最大信任度和最大不否定度原则做出最悲观和最乐观的决策。但为了进一步反映决策中的不确定性,根据非充分推理原理^[6]可建立一个博弈概率分布 $BetP(A)$, 然后根据最大概率原则做出即反映信任度又反映不确定度的决策。博弈概率分布 $BetP(A)$ 的定义为:

$$BetP(T) = m(T) + \alpha m(\Omega) \quad (24)$$

$$BetP(B) = m(B) + \beta m(\Omega) \quad (25)$$

式中 $\alpha + \beta = 1$; α 和 β 分别表示图像中目标和背景区域的出现概率,可根据先验知识确定(这里假设图像中目标和背景像素出现的比例为 1:10, 即 $\alpha = 0.09, \beta = 0.91$)。在定义博弈概率分布 $BetP(A)$ 后,最大概率决策规则可表示为:

$$DO = \begin{cases} T; BetP(T) > BetP(B) \\ B; BetP(B) > BetP(T) \end{cases} \quad (26)$$

式中 DO 为目标识别结果。

5 实验结果

本文采用双色红外成像系统中的实际图像对所提出的算法进行验证,得到的结果如图 1 所示。

从图 1 的结果可以看出,“或”逻辑融合虽然可以降低强杂波中目标被漏检的可能性,但是却保留了太多的杂波干扰,为后续的处理带来了困难;“与”逻辑融合虽然能去掉大部分杂波与噪声,但却容易造成目标漏检;而采用本文的算法在“或”逻辑融合的基础上对目标候选区域进行基于 D-S 证据理论的多特征融

合识别既降低目标检测的虚警率又能准确地检测到目标,具有较好的稳健性和检测效率。

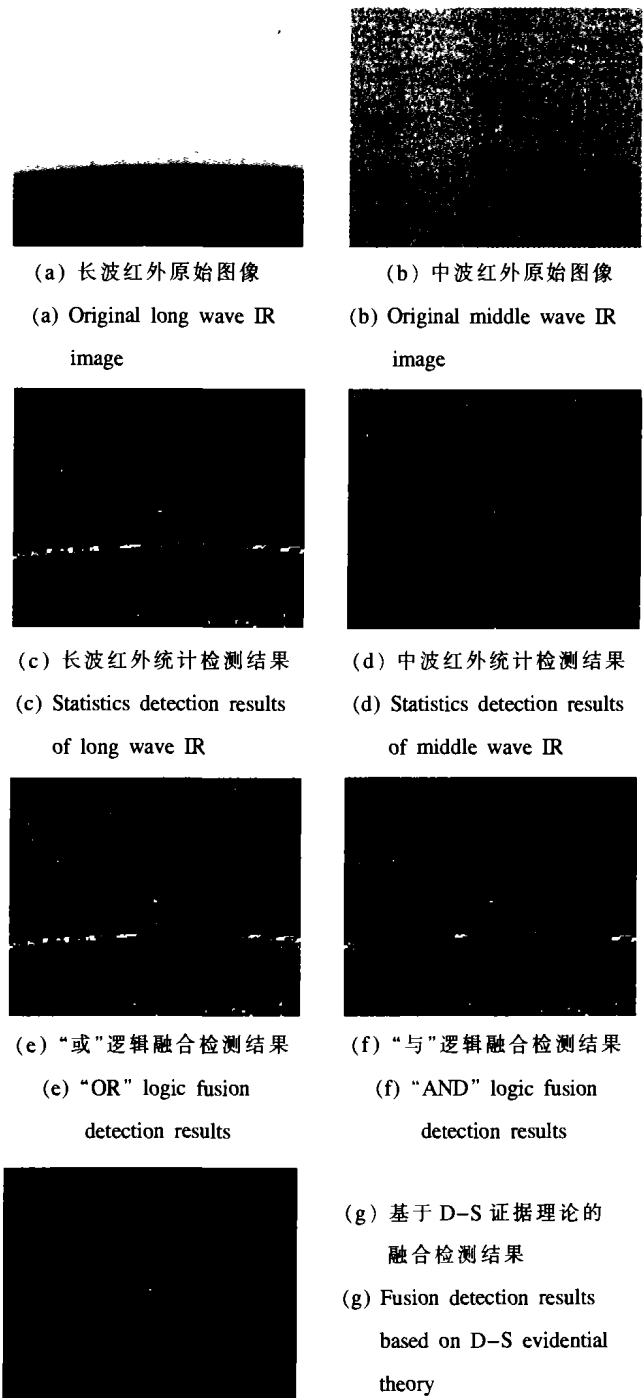


图 1 对实际红外双波段图像进行目标检测的结果
Fig.1 Results of target detection for the real IR dual band images

为了进一步比较基于简单逻辑融合的目标检测算法与该算法的性能,这里根据本文提出的算法采用 100 帧实际双波段红外图像进行了目标检测实验。目标的检测概率和虚警率定义如下:

$$P_d = \frac{N_t}{N_d} \quad (27)$$

$$P_f = \frac{N_c - N_t}{N_p - N_d} \quad (28)$$

式中 N_t 为目标存在且检测算法准确给出目标位置的图像帧数; N_d 为实际存在目标的图像帧数, 这里 $N_d=85$, 即 100 帧图像中只有 85 帧图像探测到了目标; N_c 为作出目标检测判决的图像帧数; N_p 为实验中所采用的图像帧数。根据以上公式和实验结果可以画出这 100 帧测试图像的 ROC 曲线, 如图 2 所示。

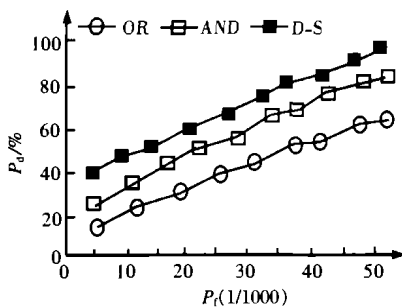


图2 基于简单逻辑融合的检测与双波段多特征融合检测性能比较 ROC 曲线

Fig.2 ROC performance comparison curves of the detection based on simple logic and dual band multiple features fusion

6 结论

本文所提的采用 D-S 证据理论的双色红外小目标融合检测方法在对两个传感器的检测结果进行简

单的“或”逻辑融合的基础上, 采用 D-S 证据理论对目标候选区域进行基于特征级融合的目标识别, 在保证目标检测率的同时极大地降低了目标检测中的虚警和误检概率。实验结果表明, 该算法在较大程度上降低了目标检测过程中的不确定性, 提高了系统的检测性能。

参考文献:

- [1] Borghys D, Perneel C, Acheroy M. Long range automatic detection of small targets in sequences of noisy thermal infrared images[A]. Proceeding on Signal and Data Processing of Small Targets-SPIE [C]. 1994, 2235:264-275.
- [2] Lawrence A K. A boolean algebra approach to multiple sensor voting fusion[J]. IEEE Transactions on AES, 1993, 29(2):317-327.
- [3] Dasarthy B V. Decision fusion strategies in multi-sensor environments[J]. IEEE Transaction On Systems, Man, and Cybernetics (Special Issue on Distributed Sensor Networks), 1991, 21(5):1140-1154.
- [4] 杜少军, 陆启生. 红外双色探测研究[J]. 红外技术, 2000, 22(2):36-38.
- [5] 汪涛, 樊详. 双色导引头的光电对抗与双色干扰诱饵[J]. 红外与激光工程, 1999, 28(2):28-32.
- [6] Denoeux T. A neural network classifier based on dempster-shafer theory[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1997, 45:210-231.

书 讯

《熵与信息光学》简介

《熵与信息光学》由美籍华人杨振寰教授著, 哈尔滨工业大学陈历学教授、宋瑛林教授等人翻译, 《红外与激光工程》编辑部编辑, 天津科学技术出版社出版。内容包括: 信息传输导论; 衍射与信号分析; 光学空间信道与编码原理; 熵与信息; 伏魔师与熵耗费; 观测和信息; 像恢复与信息; 信息传播的量子效应; 光学相干理论; 光学小波变换; 光学模式识别; 光学计算和纤维光学通信。

全书共计 20 余万字, 314 页, 定价 46 元。有需求者请与《红外与激光工程》编辑部联系, 电话: (022)23009840。