

一种基于多传感器多级信息融合的红外目标检测方法¹

李秋华 李吉成 沈振康

(国防科技大学 ATR 重点实验室 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, 该文提出一种基于多传感器多级信息融合的目标检测方法。该算法包括两个部分: 特征级融合和决策级融合。在特征级融合阶段, 首先提取双波段红外图像的各个特征图像; 然后, 采用自适应加权方法对所得到的特征图像进行融合, 得到目标判决置信图; 最后根据置信度最大规则对置信图进行目标位置搜索, 得到各级目标判决结果。在决策级融合阶段, 对各级目标判决结果采用组合逻辑进行融合, 得到系统的目标检测输出。实验结果显示了该算法的有效性。

关键词: 双色红外, 目标检测, 信息融合

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2004)11-1700-06

IR Target Detection Based on Multi-sensor Multi-level Information Fusion

Li Qiu-hua Li Ji-cheng Shen Zhen-kang

(The Key Laboratory for ATR in NUDT, ChangSha 410073, China)

Abstract Aimed at the difficult problem for detecting distant small target with very low SNR, the proposed method of target detection based on multi-sensor multi-level information fusion consists of two parts: The feature level fusion and the decision fusion. On the phase of feature level fusion, first extract all feature images of dual band IR images; then fuse these feature images by using the adaptive weighting method to get the confidence images of target decision; finally scan the confidence images by using the maximum confidence value rule to get result of target detection for all levels. On the phase of decision fusion, fuse the result of target detection for all levels by using the combination logic to get target detection output for the system. The result shows the effectiveness.

Key words Dual band IR, Target detection, Information fusion

1 引言

在双色红外成像系统中, 如何充分利用目标在两个波段的成像信息的互补性和冗余性来去除假目标(如红外诱饵、人为干扰等), 实现真目标的精确检测是提高系统抗干扰能力的关键。而当目标(如飞机、导弹等)距离探测器较远时, 它们在图像传感器中所成的像为一些淹没在噪声和干扰中的低对比度点状物。另外, 由于两个传感器工作在不同的电磁波段, 它们所探测到的目标图像往往在对比度、信噪比和强度等方面存在很大差异。因此, 如果仅采用单一波段的传感器图像或单一的检测算法, 系统将不能有效地去除假目标或很难准确地探测到真目标。另一方面, 一些空中军事目标, 例如飞机、导弹等, 由于它们有动力源, 本身的温度一般高于背景和周围其它物体, 而低于人为干扰源(例如干扰弹), 因而这些目标的光谱特性与周围其它物体及干扰源有明显的差异。如果利用温度不同从而导致双波段的辐射比不同来检测目标, 不仅能从复杂的背景中探测到目标, 而且能防止高温干扰源的干扰。本文所提出的基于多传感器多级信息融合的目标检测算法在对双波段红外图像进行特征级融合的基础上, 采用组合逻辑对各个通道的目标判决结果进行决策级融合, 以提高系统的检测性能。算法流程如图 1 所示。

¹ 2003-05-26 收到, 2004-02-23 改回

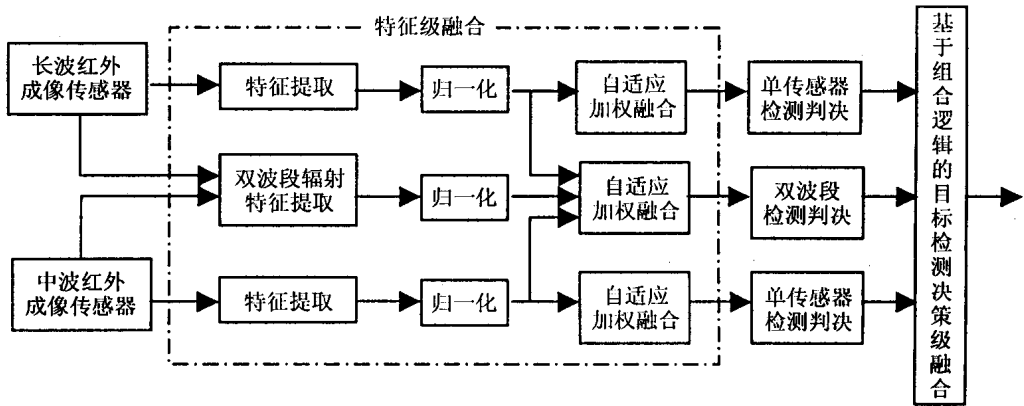


图 1 基于多传感器多级信息融合的红外目标检测框图

2 特征级融合

2.1 特征提取

当目标距离传感器较远时，红外成像传感器所得到的图像中的大部分区域为背景和干扰，目标仅表现为淹没在强杂波图像中的一些斑点状小区域。这时如果仅采用目标的灰度特征将很难区分目标与背景。而另一方面，背景区域由于物理特性的限制在图像中表现出纹理特征的连续性，目标的出现将破坏背景区域的这种连续性^[1]。因此，可以通过对比待处理区域与背景区域的纹理特征参数来确定该区域是否存在目标。本文采用局部梯度均值对比和局部方差偏移来刻画由于目标存在而引起的局部纹理变化。文中的各个目标特征都是在以待处理像素为中心的双矩形窗口内的区域上进行计算的。双矩形窗口的尺寸可根据成像传感器的视场角及目标距离等信息预置一个比目标成像区域稍大的内窗口和一个与内窗口邻近的方框形外窗口，这里分别用 W_{in} 和 W_{out} 来表示。如图 2 所示。

图中的灰色区域为外窗口，用来估计背景纹理特征值；白色区域为内窗口，用来计算待处理像素的目标纹理参数。如果当前像素为目标像素，则内窗口的纹理特征值将偏离所估计的背景纹理特征值。因此可以用在双窗口中计算得到的纹理特征对比值来表示该像素属于目标区域的程度。

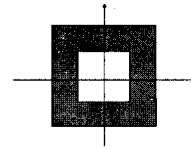


图 2 目标与前景区域示意图

2.1.1 局部梯度均值对比 在红外图像中，目标区域往往表现出与背景区域不同的纹理细节，使得背景区域的纹理存在非连续性，所以可以用目标区域与背景区域的梯度均值对比来检测由于目标的存在而使背景纹理存在突变的区域。图像的局部梯度均值对比特征定义如下：

$$F_g(i, j) = \left| \frac{1}{N_{in}} \sum_{(k,l) \in W_{in}(i,j)} G(k, l) - \frac{1}{N_{out}} \sum_{(k,l) \in W_{out}(i,j)} G(k, l) \right| \quad (1)$$

其中 $F_g(i, j)$ 为局部梯度均值对比特征图； N_{in} 和 N_{out} 分别为待处理像素 $p(i, j)$ 的内窗口 $W_{in}(i, j)$ 和外窗口 $W_{out}(i, j)$ 中所包含的像素数目； $G(k, l)$ 为像素 $p(k, l)$ 的梯度幅度值，其定义如下：

$$G(k, l) = |f(k + 1, l) - f(k - 1, l)| + |f(k, l + 1) - f(k, l - 1)| + |f(k + 1, l + 1) - f(k - 1, l - 1)| + |f(k + 1, l - 1) - f(k - 1, l + 1)| \quad (2)$$

其中 $f(i, j)$ 为图像中第 i 行第 j 列像素 $p(i, j)$ 的灰度值。

2.1.2 局部方差偏移 目标的存在将使得目标区域的灰度分布方差值偏离背景区域的灰度分布方差值, 因此可以采用图像的局部方差偏移值来表示各个像素属于目标区域的程度。图像的局部方差偏移特征定义如下:

$$F_v(i, j) = (|\mu_{in}(i, j) - \mu_{out}(i, j)|) / \delta_{in}(i, j) \delta_{out}(i, j) \quad (3)$$

其中 $F_v(i, j)$ 为局部方差偏移特征图; $\mu_{in}(i, j)$ 、 $\delta_{in}^2(i, j)$ 和 $\mu_{out}(i, j)$ 、 $\delta_{out}^2(i, j)$ 分别为待处理像素 $p(i, j)$ 的内窗口 $W_{in}(i, j)$ 和外窗口 $W_{out}(i, j)$ 中全部像素的灰度均值和方差。

2.1.3 双波段辐射特征 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。此外, 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局部平均灰度 (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 [2]。在目标的温度范围和双波段辐射通量比范围已知的情况下, 可以采用各像素的双波段平均灰度比值与预先设定目标双波段平均灰度比值的相近程度来表示该像素属于目标区域的程度。本文采用图像的双波段辐射特征来表示图像的双波段辐射通量比信息。为了避免系统工作环境和系统内部噪声的影响, 在计算图像的双波段辐射特征之前应对各传感器图像进行归一化和动态范围调整处理。双波段辐射特征定义如下:

$$F_r(i, j) = \begin{cases} 1 - [r_0 - r(i, j)] / r_0, & 0 < r(i, j) < r_0 \\ 1.0, & r_0 < r(i, j) < r_1 \\ 1 - [r(i, j) - r_1] / [r_{max} - r_1], & r_1 < r(i, j) < r_{max} \end{cases} \quad (4)$$

其中 $F_r(i, j)$ 为双波段辐射特征图; $r(i, j) = \mu_{far}(i, j) / \mu_{mid}(i, j)$ 为像素 $p(i, j)$ 的双波段图像局部平均灰度比; $\mu_{far}(i, j) = \frac{1}{N_{in}} \sum_{(k, l) \in W_{in}(i, j)} f_{far}^{NS}(k, l)$ 和 $\mu_{mid}(i, j) = \frac{1}{N_{in}} \sum_{(k, l) \in W_{in}(i, j)} f_{mid}^{NS}(k, l)$ 分别为像素 $p(i, j)$ 在内窗口 $W_{in}(i, j)$ 中的所有远红外和中红外图像像素的灰度均值; $f_{far}^{NS}(k, l)$ 和 $f_{mid}^{NS}(k, l)$ 分别为经过归一化处理后和动态范围调整的远红外和中红外图像; $[r_0, r_1]$ 为目标的双波段图像平均灰度比值范围; r_{max} 为图像的双波段图像局部平均灰度比值的最大值。

2.2 特征图的归一化处理和动态范围特征

为了使特征图中各个像素的强度值能有效表示该像素属于目标区域的置信程度, 在对各特征图进行自适应加权融合前必须对所提取的各特征图进行归一化处理。归一化处理的表达式如下:

$$F^N(i, j) = [F(i, j) - \mu] / \delta \quad (5)$$

其中 μ 和 δ 分别为特征图 $F(i, j)$ 的强度平均值和标准差; $F^N(i, j)$ 为归一化处理后的特征图。

另外, 为了对特征图进行像素级加权融合, 还必须将归一化处理后的特征图的动态范围调整到 $0 \sim 255$ 。动态范围调整的表达式如下:

$$F^{NS}(i, j) = \frac{F^N(i, j) - g_{min}}{g_{max} - g_{min}} \times 255 \quad (6)$$

其中 $F^{NS}(i, j)$ 为动态范围调整后的特征图; g_{min} 和 g_{max} 分别为归一化处理后的特征图 $F^N(i, j)$ 的最大和最小强度值。

2.3 特征级自适应加权融合

在分别提取远红外和中红外图像的局部梯度均值对比、局部方差偏移和双波段辐射特征并

对特征图进行归一化处理和动态范围调整后, 可采用自适应加权方法对各传感器的特征图进行融合得到单传感器目标检测判决置信图和双波段目标检测平均置信图。在进行特征级自适应加权融合前, 为了表述的方便, 这里令

$$\left. \begin{aligned} F_1(i, j) &= F_{g, \text{far}}^{\text{NS}}(i, j) \\ F_2(i, j) &= F_{v, \text{far}}^{\text{NS}}(i, j) \\ F_3(i, j) &= F_{g, \text{mid}}^{\text{NS}}(i, j) \\ F_4(i, j) &= F_{v, \text{mid}}^{\text{NS}}(i, j) \\ F_5(i, j) &= F_r^{\text{NS}}(i, j) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

其中 $F_{g, \text{far}}^{\text{NS}}(i, j)$ 和 $F_{v, \text{far}}^{\text{NS}}(i, j)$ 分别为经过归一化处理和动态范围调整后的远红外图像局部梯度均值对比特征图和局部方差偏移特征图; $F_{g, \text{mid}}^{\text{NS}}(i, j)$ 和 $F_{v, \text{mid}}^{\text{NS}}(i, j)$ 分别为经过归一化处理和动态范围调整后的中红外图像局部梯度均值对比特征图和局部方差偏移特征图; $F_r^{\text{NS}}(i, j)$ 为经过归一化处理和动态范围调整后的双波段辐射特征图; $F_m(i, j)$, $m = 1, 2, 3, 4, 5$ 分别为参加特征级自适应加权融合的各通道特征图。

2.3.1 单传感器特征级融合 单传感器特征级自适应加权融合的公式如下:

$$C_{\text{far}}(i, j) = \omega_1 F_1(i, j) + \omega_2 F_2(i, j) \quad (8)$$

$$C_{\text{mid}}(i, j) = \omega_3 F_3(i, j) + \omega_4 F_4(i, j) \quad (9)$$

其中 ω_m , $m = 1, 2, 3, 4$ 分别为各特征图的融合加权值; $C_{\text{far}}(i, j)$ 和 $C_{\text{mid}}(i, j)$ 分别为远红外和中红外成像传感器的目标决策判决置信图。根据最优融合原理, 权值 ω 应该与目标区域在各特征图中的突出程度成正比。而在特征图像中, 前 N_{in} 个强度最大值一般会出现在目标区域, 因此可以采用以下方法求得权值 ω_m : 搜索整个特征图 $F_m(i, j)$ 得到前 N_{in} 个最大特征值, 并求得它们的平均值 V_m , 然后采用如下公式计算各个加权值:

$$\omega_1 = \frac{V_1}{V_1 + V_2}, \quad \omega_2 = \frac{V_2}{V_1 + V_2}, \quad \omega_3 = \frac{V_3}{V_3 + V_4}, \quad \omega_4 = \frac{V_4}{V_3 + V_4} \quad (10)$$

2.3.2 双波段特征级融合 为了充分利用双波段图像信息的互补性和冗余性, 本文提取了目标的双波段辐射特征, 并将该特征图与所提取的其它特征图进行自适应加权融合, 得到目标检测判决的双波段置信图。具体融合过程与单传感器融合类似, 如下式所示:

$$C_{\text{dual}}(i, j) = \sum_{m=1}^5 \omega_m F_m(i, j) \quad (11)$$

其中 ω_m , $m = 1, 2, 3, 4, 5$ 为各特征图的融合加权值; $C_{\text{dual}}(i, j)$ 为双波段目标判决置信图。

3 决策级融合

在经过特征级融合后, 采用最大置信度规则对各通道的目标判决置信图进行目标位置搜索, 产生目标检测判决结果。为了减少特征级信息融合阶段中由于图像特征误匹配和噪声干扰等原因产生的虚假目标判决对融合检测结果的影响, 本文把双波段融合判决结果和两个波段的目标判决结果作为 3 个通道的决策信息采用组合逻辑进行融合, 获得了良好的目标检测性能^[3]。系统检测输出与各通道的目标判决结果的逻辑关系表示如下:

$$\text{SO} = \text{FD} \& \text{DD} + \text{MD} \& \text{DD} + \text{FD} \& \text{MD} \quad (12)$$

其中 SO 为系统检测输出 (System Output); FD 为远红外成像传感器的目标判决结果 (Far IR Decision); MD 为中红外成像传感器的目标判决结果 (Middle IR Decision); DD 为双波段目标判决结果 (Dual-band Decision)。用 1 表示目标, 0 表示背景, 则上述的逻辑关系如表 1 所示。

表 1 决策级融合组合逻辑关系

FD	0	0	0	0	1	1	1	1
MD	0	0	1	1	0	1	0	1
DD	0	1	0	1	0	0	1	1
SO	0	0	0	1	0	1	1	1

从表中可以看出，只有在两个以上通道被判决为目标的像素才会出现在系统检测输出中。对双波段目标判决结果和各传感器目标判决结果进行“与”逻辑融合可以减少由于特征级融合所引起的误判决。

4 实验结果

根据本文提出的目标融合检测算法，这里采用双色红外成像系统所获得的两个波段的目标图像序列进行了目标检测实验，实验结果如图 3、图 4 和图 5 所示：

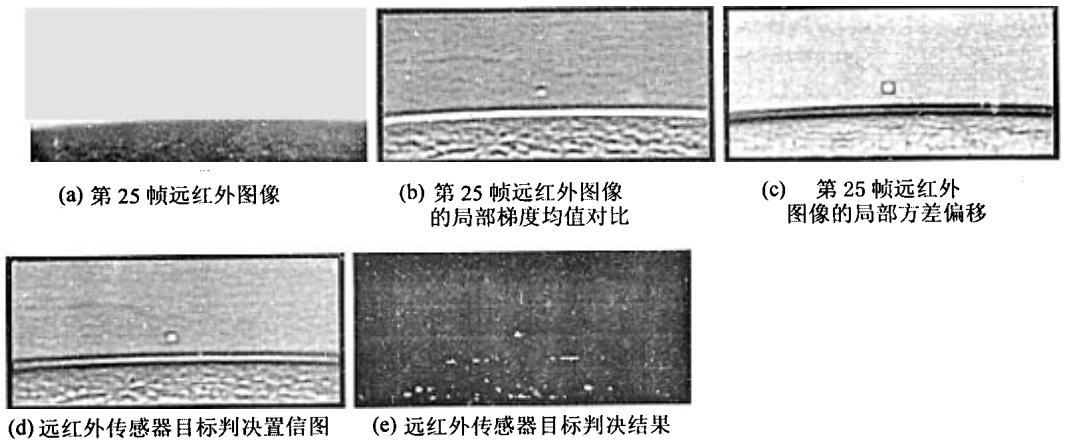


图 3

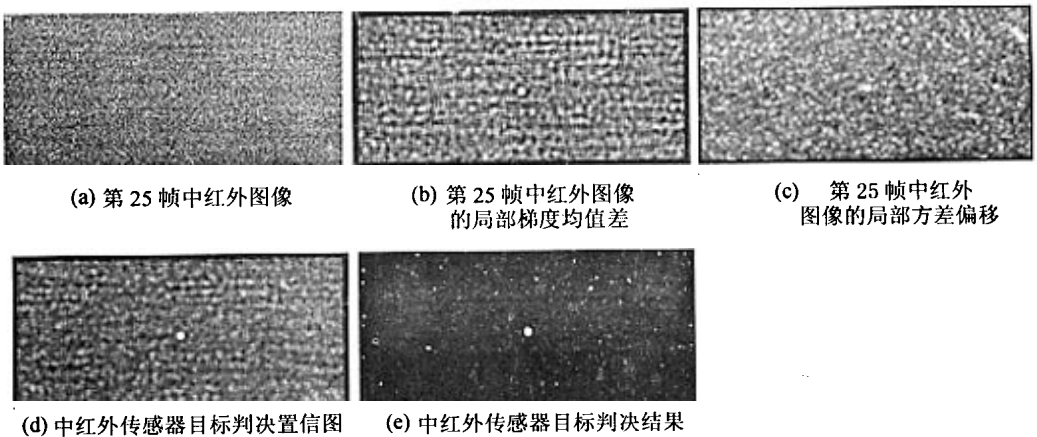


图 4

从以上实验结果可以看到，引入双波段辐射特征的双波段目标判决能去除单传感器目标判决中存在的虚假目标。而采用组合逻辑对各通道判决结果进行融合后，可以进一步减少假目标和噪声干扰的影响，达到信息融合的目的。为了进一步比较单传感器特征级融合检测与双波段融合检测的性能，这里根据本文提出的算法采用存在目标的 100 帧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概率定义如下：

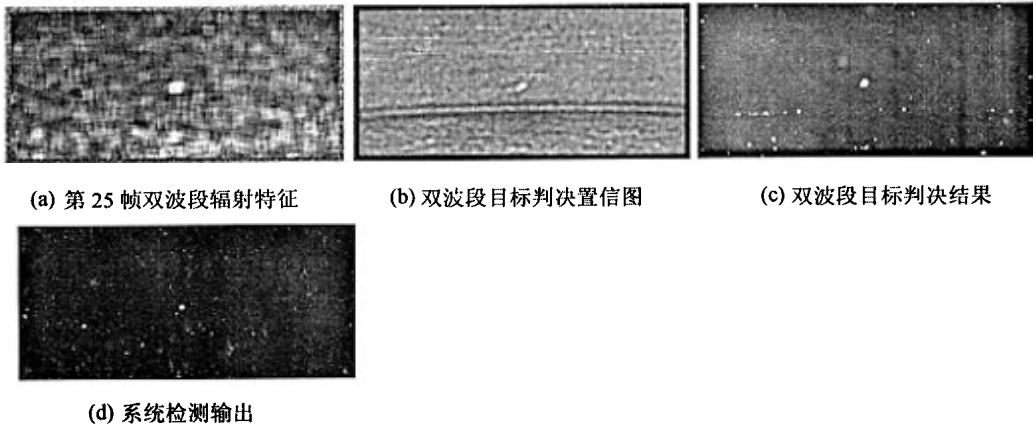


图 5

$$P_d = N_t / N_d \tag{13}$$

$$P_f = (N_c - N_t - N_s) / N_c \tag{14}$$

其中 N_t 为准确给出目标位置并检测到目标存在的图像帧数； N_d 为目标实际存在的图像帧数，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_s 为目标被漏检的图像帧数 $N_p^{[4]}$ 。根据以上公式和实验结果可以画出这 100 帧测试图像的接收器操作特性 (ROC) 曲线如图 6 所示：

5 结论

本文所提出的基于多传感器多级信息融合的目标检测算法在对各传感器图像和双波段信息进行特征级融合的基础上，采用组合逻辑对各通道的目标判决结果进行决策级融合，提高了系统的抗干扰能力和目标检测性能。实验结果证明了该算法的有效性和实用性。

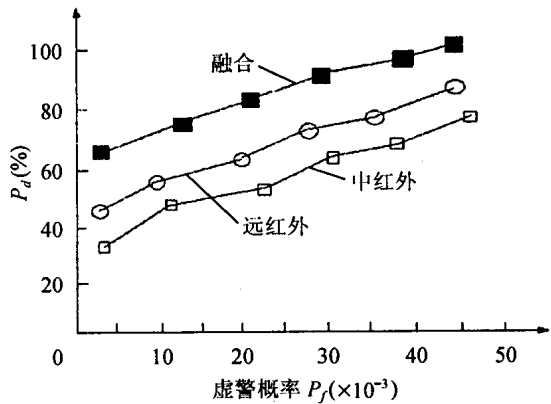


图 6 单传感器特征级融合与双波段融合检测性能比较 ROC 曲线

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. SPIE-USA(Orlando), 1994: 4-8.
- [2] 杜少军, 陆启生. 红外双色探测研究. 红外技术, 2000, 22(2): 36-39.
- [3] Lawrence K. A Boolean algebra approach to multiple sensor voting fusion. IEEE Trans. on AES, 1993, AES-29(2): 54-62.
- [4] Kwon Heesung, Der Sandor Z, Nasrabadi N M. Adaptive multisensor target detection using feature-based fusion. Opt. Eng., 2002, 41(1): 69-80,

李秋华：男，1976 年生，博士生，主要研究方向为红外图像处理、多传感器信息融合与人工智能。
 李吉成：男，1970 年生，副教授，博士，主要研究方向为红外图像制导、遥感图像处理和自动目标识别。
 沈振康：男，1937 年生，教授，博士生导师，主要研究方向为信号处理、光学制导、神经网络应用等。