

文章编号:1001-9014(2006)01-0041-05

海空复杂背景中基于自适应局部能量阈值的 红外小目标检测

杨磊, 杨杰, 郑忠龙

(上海交通大学 图像处理与模式识别研究所, 上海 200240)

摘要: 自适应 Butterworth 高通滤波是一种有效的海空复杂背景下红外小目标检测方法, 但其在序列图像检测中不可避免地存在虚警。该研究通过估计因前后帧间不同截止频率导致 Butterworth 高通滤波后红外图像中小目标局部能量值的变化情况, 可实现对滤波后图像中小目标检测阈值的自适应调整。实验结果表明该算法不仅可很好解决上述虚警问题, 而且对跟踪过程中可能出现的目标消失或背景突然变化的情况也有良好的适应性。

关键词: 信息处理技术; 红外小目标检测; 局部能量阈值; 复杂背景

中图分类号: TP391.41 **文献标识码:** A

DETECTING INFRARED SMALL TARGETS BASED ON ADAPTIVE LOCAL ENERGY THRESHOLD UNDER SEA-SKY COMPLEX BACKGROUNDS

YANG Lei, YANG Jie, ZHENG Zhong-Long

(Institute of Image Processing and Pattern Recognition, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The adaptive Butterworth high pass filter (BHPF) is an effective method for detecting infrared small targets under sea-sky complex backgrounds. However, false alarms will inevitably exist when this approach is used to detect infrared video sequences images. Through estimating the local energy difference of small target regions in the filter images, which is directly caused by the different cutoff frequencies of BHPFs in consecutive two frames, an adaptive method for conducting the detection threshold of small targets in the filtered images was proposed here. Experimental results confirm that our algorithm can not only solve the problem of false alarms mentioned above, but also is effectively adapted to the conditions that the target is temporarily lost or the backgrounds are suddenly changed.

Key words: information processing technology; infrared small target detection; local energy threshold; complex background

引言

为了拦截低空来袭目标, 导弹的红外导引头在飞行过程中会面对不断变化的多种复杂背景, 例如平缓的天空背景和灰度值剧烈变化的海杂波背景等。在不考虑背景数学模型的情况下, 彭等提出了一类基于 5×5 空域高通滤波模板的实时目标检测方法^[1]; 孙等提出了基于形态学运算的目标分割方法^[2], 这两种方法都具有较强的实用性。Leung 等学者分析并验证了雷达海杂波信号的混沌性^[3,4], 进而提出了一种基于混沌特征预测海杂波中信号的检测办法。而今, 伴随着硬件技术的发展, 以往制约我们探

索更加精细和直接的频域滤波方法的瓶颈正在逐渐消失。叶等提出了基于小波变换模极大值的红外小目标检测方法^[5]; 杨等在文[6]中提出了一种基于自适应频域 Butterworth 高通滤波的红外小目标检测方法。此方法可根据图像背景的变化对滤波特性做实时调整, 所以其效果要比只用一个固定参数的滤波器好。本文在文[6]的基础上, 通过估计由于前后帧间不同截止频率导致 Butterworth 高通滤波后图像中小目标局部能量值的变化量, 实现了对滤波后图像中红外小目标检测阈值的自适应调整, 解决了文[6]所提方法在序列图像检测中不可避免存在的虚警问题。实验证明本方法可有效处理检测过程中出现的目标消失或

收稿日期: 2005-04-13, 修回日期: 2005-10-16

Received date: 2005-04-13, revised date: 2005-10-16

基金项目: 国防 973 项目基金(JC2000020100104), 航空科学基金(04F57004)

作者简介: 杨磊(1977-), 男, 江西上高人, 博士研究生, 主要研究方向为模式识别、图像处理及控制理论等。

背景突然变化的情况。

1 简要回顾:自适应 Butterworth 高通滤波

文[6]提出了一种基于自适应 Butterworth 高通滤波的红外小目标检测方法。首先我们对此方法做一简要回顾。一个具有良好滤波性能的 2 阶频域 Butterworth 高通滤波器(后称 BHPF),其传递函数可写为

$$H(u, v) = \frac{1}{1 + [\sqrt{2} - 1][D_0/D(u, v)]^4}, \quad (1)$$

式中 $D(u, v) = \sqrt{u^2 + v^2}$, 通过调节截止频率 D_0 可改变滤波特性以满足不同的滤波需求。文[6]提出了一种基于加权信息熵的红外图像背景复杂程度描述办法,即对于具有 256 个灰度阶的红外图像,设 S 是图像中所含各种灰度值的集合, p_s 是其中灰度值 s 出现的概率,则图像的加权信息熵的定义可写为:

$$H(S) = - \sum_{s=0}^{255} p_s \cdot \log p_s, \quad (2)$$

式中规定当 $p_s = 0$ 时 $p_s \cdot \log p_s = 0$ 。

公式(2)可以有效描述红外图像的不同背景。再使用简单的分段线性插值方法就可实现加权信息熵值与式(1)中由先验知识得到的截止频率 D_0 值的对应,从而实现了由一个滤波器就可以对不同背景中具有高频性质的红外小目标的自适应增强。此部分的结构框图见图 1 中虚线框内。

2 海空复杂背景条件下的红外小目标自适应检测

红外图像经上述 Butterworth 高通滤波后,图像中的低频成分被不同程度地滤除,这将降低处理后图像的整体灰度值。文[6]中作者选取滤波后图像中像素最大值的 0.95 倍作为二值化阈值来检测小目标,显然这种方法对于存在严重干扰的图像序列将引入较大虚警。为了使该检测算法能够稳健地适应场景变化,我们提出了基于自适应局部能量阈值的小目标检测算法。

2.1 基于局部能量阈值的小目标检测

对于某大小为 $M \times N$ 的红外小目标图像 $f(x, y)$, 设其傅立叶变换为 $F(u, v)$, 经式(1)所示 Butterworth 高通滤波后,可得到图像 $g(x, y)$, 则此图像对应的频域分布 $G(u, v)$ 由下式决定

$$G(u, v) = H(u, v) \cdot F(u, v) \quad (3)$$

变换前后的空频域关系满足:

$$\sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} [g(x, y)]^2 =$$

$$\frac{1}{MN} \sum_{u=-M/2}^{M/2} \sum_{v=-N/2}^{N/2} |G(u, v)|^2, \quad (4)$$

式(4)即所谓离散傅立叶变换的 Parseval's (能量)定理。注意,此处已将频域的原点移到了频谱的中心。应用此定理,我们提出了一种有效的自适应目标检测办法。

定义 1. 设 $g(x, y)$ 为红外图像中象素点 (x, y) 处的灰度值,若此图像大小为 $M \times N (M, N \in \mathbb{N})$, 则此图像的整体能量可被定义为

$$ET_g = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} [g(x, y)]^2 \quad (5)$$

同理,我们定义图像中大小为 $m \times n (m, n \in \mathbb{N}, m \leq M, n \leq N)$, 以象素点 $(i, j) (i, j \in \mathbb{N}, 0 \leq i \leq M-m, 0 \leq j \leq N-n)$ 为起始点的图像窗口的局部能量为

$$EL_{(i,j)} = \sum_{x=i}^{i+m-1} \sum_{y=j}^{j+n-1} [g(x, y)]^2 \quad (6)$$

为了能检测到 5~6 个象素的小目标,我们选取 $m \times n = 2 \times 2$ 的滑窗来计算各象素的局部能量值。设在实时序列的第 k 帧已检测到目标,则可在第 k 帧滤波后图像中目标区域的局部能量最大值 $EL_{\max}(k)$ 的基础上,再保留一定裕量作为第 $k+1$ 帧的局部能量域值 $\Theta(k+1)$, 即目标检测判据为

$$EL_{(i,j)}(k+1) \geq \Theta(k+1) \quad (7)$$

其中 $\Theta(k+1) = (1 - \varepsilon) \cdot EL_{\max}(k)$, 此处 ε 为根据实际情况设定的局部能量裕量因子。式(7)适于干扰不太严重的场景下的目标检测。但当场景或跟踪器件受到一些严重干扰时,如突然出现的阳光折射或导弹在飞行中出现的颤动等,都可能引起实时图像前后帧间背景出现较大差异,由此上面提到的加权信息熵和 BHPF 截止频率也将随之发生突然改变,显然这时图像的滤波效果将相应地变暗或变亮,这就可能导致式(7)失效或引入较多虚警。为了估计这种局部能量的突然变化,我们提出了基于自适应局部能量阈值的小目标检测算法。

2.2 局部能量差异的估计

设某红外图像 $f(x, y)$ 分别由截止频率为 D_0 和 D_1 的 BHPF 进行处理,则滤波后图像 $g_0(x, y)$ 和 $g_1(x, y)$ 的整体能量差异可写为

$$\Delta ET = ET_{g_0} - ET_{g_1} = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} [g_0(x, y)]^2 - \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} [g_1(x, y)]^2 \quad (8)$$

由式(3), (4), (5), 可得

$$\Delta ET = \frac{1}{MN} \sum_{u=-M/2}^{M/2} \sum_{v=-N/2}^{N/2} [|G_1(u, v)|^2 - |G_2(u, v)|^2] = \frac{1}{MN} \sum_{u=-M/2}^{M/2} \sum_{v=-N/2}^{N/2} [|H_0(u, v)|^2 - |H_1(u, v)|^2] \cdot |F(u, v)|^2 =$$

$$\frac{1}{MN} \sum_{u=-M/2}^{M/2} \sum_{v=-N/2}^{N/2} \eta(u,v) \cdot |F(u,v)|^2, \quad (9)$$

这里定义 $\eta(u,v) = |H_0(u,v)|^2 - |H_1(u,v)|^2$ 为滤波整体能量差异因子; $|F(u,v)|$ 为原图像 $f(x,y)$ 经傅里叶变换得到的幅值谱. 显然, 不同截止频率所对应的滤波器传递函数间的差异性产生能量差异的直接原因. 由于 BHPF 传递函数式(1)以及滤波整体能量差异因子是圆对称的, 所以可以仅从二维空间上对滤波特性进行分析, 图 2 为截止频率为 $D_0 = 12$ 和 $D_1 = 9$ 时, 令 $v = 0$, 投影到二维空间上的 BHPF 和滤波整体能量差异因子 $\eta(u,v)$ 的幅频响应.

不妨设前后帧间图像由文[6]中方法求得的截止频率分别为 D_0 和 D_1 , 前一帧图像中目标区域分别由这两个截止频率处理导致的滤波局部能量差异为 ΔEL , 前后两帧图像中目标区域分别由这两个截止频率处理后得到的滤波局部能量差异为 $\Delta EL'$. 由于前后帧之间目标特性不会有太大的变化, 可以认为 $\Delta EL'$ 近似等于 ΔEL . 同时, 由于低频成分在红外图像中几乎是均匀分布的, 所以可得估计式

$$\Delta EL' \approx \Delta EL \approx \frac{2 \times 2}{M \times N} \cdot \Delta ET, \quad (10)$$

式(10)描述了一种通过求取前一帧图像由不同截止频率导致的滤波整体能量差异来估计帧间滤波局部能量差异的办法. 由于前一帧图像的频谱我们在前面的工作中已经得到了, 这也就使得求取滤波整体能量差异变得非常的方便.

考虑到红外小目标图像频谱的主要能量集中于频域低端, 可仅对能量变化剧烈的低频区域做较为精确的估计(即认为能量变化的主要部分集中在一个以原点为中心, 半径为 R 的圆形区间内, 其 2 维投影见图 2 中阴影部分), 而对其他区域作保留一定的裕量的处理. 回到图 1 对应的三维空间中, 可以用半径为 R 的圆环中的能量差异因子的体积 V_R 占总能量差异因子体积 V_∞ 的比例因子 $\beta (0 \leq \beta < 1)$ 来作为选取 R 值的准则, 即可设

$$\frac{V_R}{V_\infty} = \frac{\int_{-R}^R \int_{-R}^R |\eta(u,v)| dudv}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |\eta(u,v)| dudv} = \beta, \quad (11)$$

式(11)中令 $u = r \cdot \cos\theta, v = r \cdot \sin\theta$, 分子部分由二重积分的极坐标方法有

$$V_R = \int_{-R}^R \int_{-R}^R |\eta(u,v)| dudv = \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^R \left| \left(\frac{1}{1+0.414(D_0/r)^4} \right)^2 - \left(\frac{1}{1+0.414(D_1/r)^4} \right)^2 \right| \cdot r dr = \pi \cdot \left[0.965 \left(D_1^2 \cdot \arctan\left(\frac{R^2}{0.643D_1^2} \right) - D_0^2 \cdot \arctan\left(\frac{R^2}{0.643D_0^2} \right) \right) + 0.207R^2 \left(\frac{D_0^4}{R^4 + 0.414D_0^4} - \frac{D_1^4}{R^4 + 0.414D_1^4} \right) \right] \quad (12)$$

同理可得式(11)中分母部分值为

$$V_\infty = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |\eta(u,v)| dudv = 0.483\pi^2 \cdot |D_1^2 - D_0^2| \quad (13)$$

在实际系统中可由如下程序求得值:

```

R = 0;
While (V_R ≤ β · 0.483π² · |D₁² - D₀²|)
R = R + 1;
End
    
```

由于原始图像可被看成一个实函数, 所以其傅里叶幅值谱必然是对称的. 又由式(1)的圆对称性, 仅需对一半的傅里叶幅值谱计算即可. 设 $w = \lceil \sqrt{R^2 - u^2} \rceil$ (“ $\lceil \cdot \rceil$ ”为向上取整), 则不同截止频率导致的滤波整体能量差异为:

$$\Delta ET \approx \frac{2}{MN} \sum_{u=0}^R \sum_{v=-w}^w \eta(u,v) \cdot |F(u,v)|^2, \quad (14)$$

将式(14)代入式(10), 即可得不同截止频率值导致的前后帧间滤波局部能量差异的估计值 ΔEL .

2.3 实现自适应检测

在系统的实时运行中, 设第 k 帧已检测到目标, 且此帧的 BHPF 截止频率为 $D(k)$, 则目标检测判据式(7)被修改为

$$EL_{(i,j)} \geq \Theta(k+1), \text{ 其中 } \Theta(k+1) = (1 - \varepsilon) \cdot EL_{\max}(k) - \Delta EL(k), \quad (15)$$

式中 $\Delta EL(k)$ 是经估计得到的前后帧间滤波局部能量差异值. 检测过程的实现步骤可归纳为:

Step1. 由文[6]方法求取第 $k+1$ 帧图像的截止频率 $D(k+1)$, 并对该帧图像实施 Butterworth 高通滤波(图 1 虚线框内部分);

Step2. 由式(14)求取将第 k 帧图像由于第 k 帧和第 $k+1$ 帧的不同截止频率导致的滤波整体能量

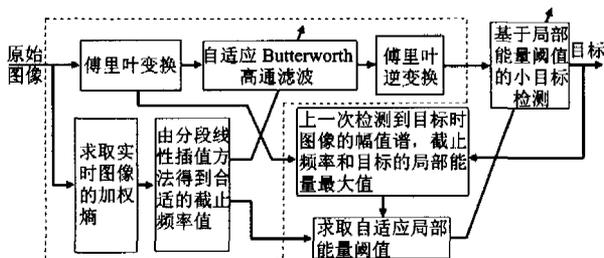


图 1 红外小目标自适应检测结构框图
Fig. 1 Block diagram of adaptive detection of IR small targets

差异 $\Delta ET(k)$, 再由式(10)估计出前后帧间的滤波局部能量差异 $\Delta EL(k)$;

Step3. 更新参数. 判断第 $k+1$ 帧滤波后图像中是否有局部能量区域满足式(15), 若有即为目标所在区域, 同时将目标区域的局部能量最大值 $EL_{\max}(k+1)$ 、截止频率值 $D(k+1)$ 以及频谱保留以为后续帧继续使用; 如果没有任何局部区域满足式(15), 须令 $EL_{\max}(k+1) = EL_{\max}(k)$ 及 $D(k+1) = D(k)$; 并用第 k 帧的频谱覆盖掉第 $k+1$ 帧的频谱以使检测过程得以继续;

Step4. $k = k+1$, 返回第一步继续执行;

整个红外小目标自适应检测过程如图 1 所示:

3 实验结果及其评价

我们选取一个主要背景为天空和海杂波的实验序列来验证算法. 在此仅截取试验序列中存在目标消失和背景剧烈变化的几帧来说明, 这是因为对于前后帧间背景变化不太剧烈的情况, 本算法检测的有效性很容易得到保证. 我们取式(11)中的比例因子 $\beta = 0.85$, 式(15)中的局部能量裕量因子 $\varepsilon = 0.1$. 图 3 中列 A ~ D 对应于序列中的第 36 ~ 39 帧, 其背景为平缓的天空, 目标在第 38 帧中暂时丢失; 列 E ~ H 对应于序列中的第 86 ~ 89 帧, 其背景为变化较为剧烈的海杂波. 同样, 第 88 帧目标暂时丢失. 设在第 35 帧和第 85 帧(图 3 中未列出)都已检测到目标, 且此两帧的截止频率分别为 6.60 和 14.26, 滤波后图像中目标区域的局部能量最大值 EL_{\max} 分别为 33494 和 16874. 检测结果显示, 本算法可以适

应目标的暂时丢失而不引入虚警. 为了模拟目标背景突变的情形, 我们人为将序列中第 38 帧和 88 帧互换, 检测结果见列 I 和 J; 与此类似, 列 K 是人为将第 88 帧由其它杂波图像来替换的检测情况. 检测结果表明, 本算法也可以有效地适应背景的剧烈变化, 目标检测过程的鲁棒性得以体现. 表 1 为对应图 3 所示检测过程的相关参数, 其中“ $H(S)$ ”是原始图像的加权信息熵值; “ D ”是 BHPF 截止频率值; “ R ”是估计滤波整体能量差异时的积分半径; “ ΔET ”是滤波整体能量差异值; “ Θ ”是滤波后图像的局部能量检测阈值; “ D' ”和 “ EL_{\max} ” 分别是经(2.3)中“Step3”更新了的截止频率值和滤波后图像中目标区域的局部能量最大值.

若将图 3 序列中各滤波后图像由文[6]所述“取滤波后图像中像素最大值的 0.95 倍作为阈值”的方法来实施目标检测, 显然序列中第 38 和 88 帧将会产生大量的虚警, 但是事实上这两帧中目标暂时丢失. 所以对比实验结果可知, 本文算法比文[6]所述算法更加鲁棒. 此外, 较之文[1,5]提出的小目标检测算法, 基于加权信息熵的自适应 BHPF 可以更好地提高滤波图像的信杂比. 由于本算法是对文[6]方法的完善, 所以检测算法的有效性是显而易见的. 关于基于加权信息熵的自适应 Butterworth 高通滤波方法与文[1,5]所提方法的效果比较请参见文献[6].

4 结语

本文通过估计由于前后帧间不同截止频率导致的 Butterworth 高通滤波后图像中小目标局部能量值的变化, 实现了对滤波后图像中红外小目标检测阈值的自适应调整, 解决了文[6]所提方法在序列图像检测中不可避免存在的虚警问题. 使整个小目标

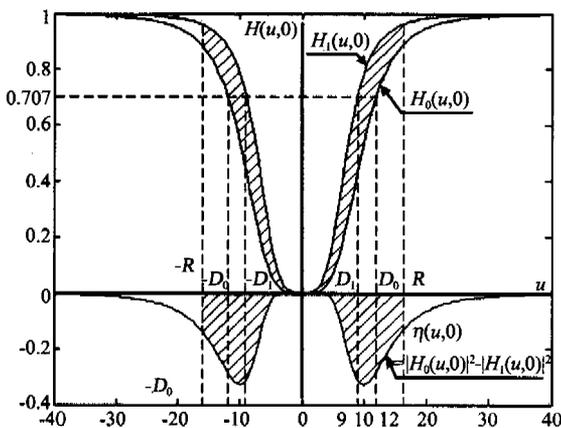


图 2 $v=0$ 时 BHPF ($D_0=12, D_1=9$) 和滤波整体能量差异因子的幅频响应

Fig. 2 The profile of amplitude-frequency response of the BHPFs ($D_0=12, D_1=9$) and the filtered total energy difference factor

表 1 对应图 3 检测过程的相关参数

Table 1 The relative parameters corresponding to the detective process shown in Fig. 3

帧代号	参数	$H(S)$	D	R	ΔET	Θ	D'	EL_{\max}
A	36	606.16	8.79	21	44929.4	30122	8.79	32239
B	37	630.56	9.55	25	12861.5	29008	9.55	36486
C	38	606.78	8.81	25	-17017.3	32845	9.55	36486
D	39	598.53	6.76	23	-61456.6	32867	6.76	33307
E	86	859.79	15.49	41	65260.81	15154	15.49	16061
F	87	812.08	13.48	40	-103140.90	14505	13.48	20257
G	88	862.41	15.64	40	138837.4	18163	13.48	20257
H	89	807.84	12.27	35	-90234.5	18275	12.27	20262
I	38	862.41	15.64	35	156570.8	32760	9.55	36486
J	88	606.78	8.81	31	-480699.5	18466	13.48	20257
K	88	879.42	16.76	41	198716.3	18134	13.48	20257

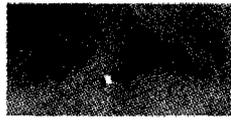
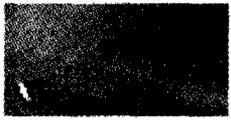
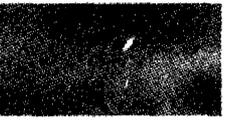
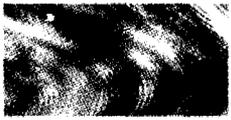
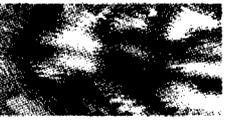
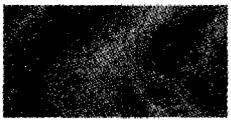
帧代号	A	B	C	D
帧序号	36	37	38	39
原始红外图像				
滤波结果图像及检测结果				
帧代号	E	F	G	H
帧序号	86	87	88	89
原始红外图像				
滤波结果图像及检测结果				
帧代号	I	J	K	
帧序号	38	88	88	
原始红外图像				
滤波结果图像及检测结果				

图3 序列图像的目标检测实例

Fig.3 Illustrations of targets detection in serial frames

检测过程在一个完整的自适应框架下得以实现. 实验结果证实了本方法可以很好地处理跟踪过程中可能出现的目标消失或背景突然变化的情况. 此外, 为了满足算法运行的实时性要求, 可以根据前后帧间目标位置的相邻性来确定一个更小的检测窗口(如 32×32 , 64×64 等), 这样该算法的复杂程度将得以大大降低, 从而检测过程的实时性可得到保证.

REFERENCES

- [1] PENG Jia-Xiong, ZHOU Wen-Lin. Infrared background suppression for segmenting and detecting small target [J]. *Acta Electronica Sinica* (彭嘉雄, 周文琳. 红外背景抑制与小目标分割检测. *电子学报*), 1999, 27(12): 47—51.
- [2] SUN Wei, XIA Liang-Zheng. Infrared target segmentation algorithm based on morphological method [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (孙伟, 夏良正. 一种基于形态学的红外目标分割方法. *红外与毫米波学报*), 2004, 23(3): 233—236.
- [3] Nan He, Haykin S. Chaotic modeling of sea clutter [J]. *Electron. Lett.*, 1992, 28(22): 2076—2077.
- [4] Leung Henry, Lo Titus. Chaotic radar signal processing over the sea [J]. *IEEE J. Oceanic Eng.*, 1993, 18(3): 287—295.
- [5] YE Zeng-Jun, WANG Jiang-An. Detection algorithm of weak infrared point targets under complicated background of sea and sky [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (叶增军, 王江安. 海空复杂背景下红外弱点目标的检测算法. *红外与毫米波学报*), 2000, 19(2): 121—124.
- [6] Yang L, Yang J, Yang K. Adaptive detection for infrared small target under sea-sky complex background [J]. *Electron. Lett.*, 2004, 40(17): 1083—1085.