

## 基于 Top-Hat 变换和马尔可夫随机场相结合的背景抑制算法

李炎冰<sup>1,2</sup>, 吕健<sup>3</sup>, 仇振安<sup>4</sup>, 陈洪亮<sup>2</sup>

(1. 光电控制技术重点实验室, 河南 洛阳 471000; 2. 中国航空工业集团公司洛阳光电设备研究所, 河南 洛阳 471000;  
3. 陆航驻北京地区军代室, 北京 100176; 4. 陆航驻洛阳地区军代表机构, 河南 洛阳 471000)

**摘要:** 空中远距离目标在红外探测器上表现为弱小目标, 其在图像中灰度和面积特征均不明显。由于天空中云层的影响, 图像背景可能存在大面积的高亮区域或者复杂的纹理结构, 影响检测系统的检测概率和虚警率, 因此必须对图像进行背景抑制。将 Top-Hat 算法和基于马尔可夫随机场(MRF)的图像分割算法相结合来对图像进行处理。仿真结果表明, 该方法能在有效抑制背景的同时保留真实目标, 达到预想效果。

**关键词:** 弱小目标; 目标探测; 图像处理; 背景抑制; 马尔可夫随机场

**中图分类号:** TP317.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2015)11-0048-04

## A Background Suppression Algorithm Based on Top-Hat Transform and Markov Random Field

LI Yan-bing<sup>1,2</sup>, LYU Jian<sup>3</sup>, QIU Zhen-an<sup>4</sup>, CHEN Hong-liang<sup>2</sup>

(1. Science and Technology on Electro-Optic Control Laboratory, Luoyang 471000, China; 2. Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment Institute, AVIC, Luoyang 471000, China; 3. Military Representative Office of Army Aviation in Beijing District, Beijing 100176, China; 4. Military Representative Office of Army Aviation in Luoyang District, Luoyang 471000, China; )

**Abstract:** The long-range targets in the sky appear as dim and small targets in the infrared detector, which have unobvious gray scale and area characteristics in the image. Due to the influence of the clouds in the sky, the image background may include large areas with high brightness or complex texture structure, which may affect the detection probability and false alarm rate of the system. Therefore, the background of image must be suppressed. In this paper, Top-Hat transform is used together with the image segmentation algorithm based on Markov random field for image processing. The simulation results show that this method can effectively restrain the background while retaining the real targets.

**Key words:** dim and small target; target detection; image processing; background suppression; Markov random field

### 0 引言

光电探测系统在对空中目标进行搜索跟踪时, 由于远距离目标的弱小性以及天空中云层的存在, 系统有可能将云层反射太阳光形成的闪烁点或者大面积高亮区域中的某些点当作目标检出, 引起虚警。为了能稳定准确地检出目标, 必须对红外弱小目标图像进行预处理, 其目的就是抑制背景、提高图像的信噪比, 即“背景抑制”技术<sup>[1]</sup>。

目前, 国内外已经有许多红外弱小目标图像背景

抑制算法。在早期, 由于研究的局限性, 研究者经常假设背景较为平缓, 加上当时受计算机处理能力的限制, 提出的背景抑制算法较为简单, 代表性的有巴特沃斯高通滤波法、中值滤波法、形态学滤波法等。然而随着研究的不断深入, 人们意识到红外弱小目标在空中最大的干扰来自云层背景, 上述算法在云层背景的抑制方面明显不足, 因此大量更为有效和复杂的背景抑制算法顺势而出。文献[2]利用非参数统计的方法构造出了针对云层边缘的陷波滤波器, 实现了对天空背景中强云边缘的有效抑制; 文献[3]提出了一种根据目标形态特征抑制云层区域的算法, 该方法首先采用形态学滤波进行预处理, 然后利用目标信号特征将潜在目标从干扰中分离出来; 文献[4]设计了利用最大平

均相关高度 (MACH) 算法对云层背景目标进行识别的匹配滤波器。

本文的主要工作在于将 Top-Hat 变换和基于马尔可夫随机场 (Markov Random Field, MRF) 的图像分割算法组合应用到红外弱小目标的云层背景抑制问题上, 并利用试飞图像进行了各种背景下的仿真分析。首先, 介绍了几种常用的图像预处理算法, 根据仿真结果及信噪比采用 Top-Hat 算法对原始图像进行预处理, 然后利用基于马尔可夫随机场的图像分割算法对预处理后的图像进行阈值分割。仿真结果表明, 该方法能有效抑制背景, 增强目标, 且易于硬件实时实现, 具有良好的工程价值。

## 1 常用的图像预处理算法

### 1.1 频域图像预处理算法

红外弱小目标图像中背景区域的灰度分布呈现大面积渐变状态, 而弱小目标区域和背景区域不同, 其灰度分布呈现突变状态。从频域角度来看, 背景区域对应于频谱的低频分量, 弱小目标区域对应于频谱的高频分量, 因此, 可以使用频域高通滤波器区分图像背景和背景, 这就是频域预处理算法的基本原理<sup>[5]</sup>。经频域预处理算法中的理想高通滤波法和巴特沃斯高通滤波法处理后的图像如图 1 所示。

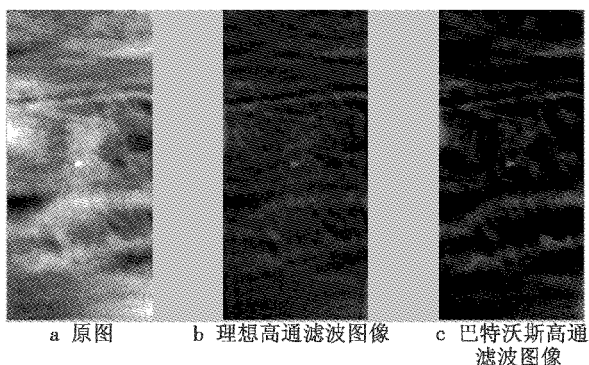


图 1 理想高通滤波和巴特沃斯高通滤波预处理图像  
Fig. 1 The preprocessed images of ideal high-pass filter and Butterworth high-pass filter

从图 1 中可以看出, 由于背景中含有大量云层, 得到的滤波图像中没有将云区域全部抑制掉, 这是因为在天空背景中云区域通常也存在着高频分量, 仅从高通滤波角度无法取得理想效果。

### 1.2 空域图像预处理算法

#### 1.2.1 中值滤波法

中值滤波法是利用背景区域的相似性和弱小目标区域的极值特性构造的一种预处理方法。下面利用不同模板对同一幅红外弱小目标图像进行预处理仿真, 仿真结果如图 2 所示。

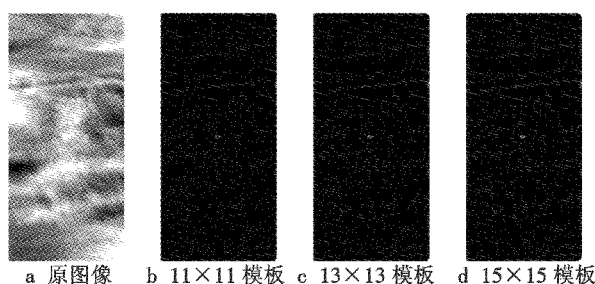


图 2 不同模板中值滤波预处理图像

Fig. 2 The preprocessed images of different template median filters

从图 2 中可以看到, 图像经过不同模板中值滤波后, 背景部分噪声得到不同程度的抑制。但是当中值滤波模板较小时, 预处理图像中弱小目标区域也受到了抑制, 出现了空洞, 背景抑制效果较差。当模板增大时, 参与运算的像素增多, 预处理图像中弱小目标区域得到了较好的增强。从视觉效果来看, 15 × 15 模板的预处理效果较好, 但这与图像中的干扰有关。中值滤波法结构简单, 易于实现, 但它所使用的窗口尺寸和形状对背景抑制效果影响较大。

#### 1.2.2 数学形态学预处理算法

数学形态学是一种非常有效的图像预处理算法。由形态学运算衍生出来的 Top-Hat 运算就是用原始图像与开运算后的图像做差, 即

$$\text{hat}[f] = f - (f \circ g) \quad (1)$$

式中:  $f$  为原始图像;  $g$  为结构元素。经过形态学开运算以及 Top-Hat 运算得到的图像如图 3 所示。

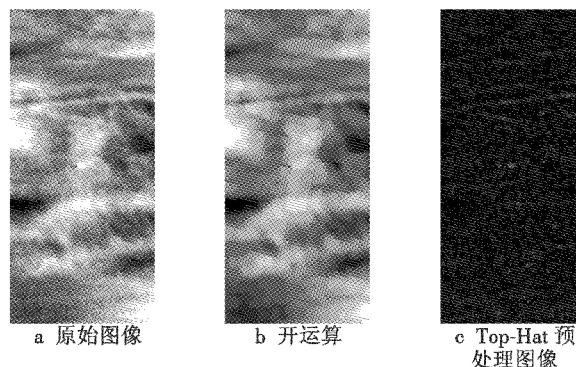


图 3 形态学开运算及 Top-Hat 算法预处理图像

Fig. 3 The preprocessed images of morphological open operation and Top-Hat algorithm

从图 3 中可以看出, 经过形态学开运算后图像中弱小目标消失而背景区域基本保持初始状态, 这就使得预处理结果中弱小目标区域得到了增强, 背景区域受到了抑制, 从而达到了较好的背景抑制效果。

可以采用均方信噪比 SNR 对上述几种图像预处理方法进行评价, 即

$$R_{s,N} = 10 \lg \left\{ \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N f(i,j)^2}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [f(i,j) - g(i,j)]^2} \right\} \quad (2)$$

式中:  $f(i,j)$  表示原始图像;  $g(i,j)$  表示预处理后图像;  $M \times N$  表示图像大小。

图像信噪比比较结果如表 1 所示。从表 1 中可以看出, 经理想高通滤波器处理后的图像信噪比最高, 但在实际应用中是不可能实现的; 中值滤波法处理后的图像信噪比随模板的增大而增大; 除理想高通滤波器外, 经 Top-Hat 变换后图像的信噪比最高, 由此可见, 该方法对信噪比的提升比其他方法更为有效, 因此本文选用 Top-Hat 法作为图像预处理算法。

表 1 图像信噪比比

Table 1 SNR of different images

	理想高通滤波	Butterworth 高通滤波	11 × 11 模板中值滤波	13 × 13 模板中值滤波	15 × 15 模板中值滤波	Top-Hat 变换
SNR 值	2.0297	1.0129	0.3435	0.3739	0.4070	1.0324

图像经过预处理后, 背景仍然没有得到完全抑制。为了进一步区分目标与背景, 还需要采用图像分割技术, 本文采用基于马尔可夫随机场的图像分割算法, 以下做简要介绍。

## 2 基于马尔可夫随机场的图像分割算法

### 2.1 马尔可夫随机场模型

MRF 模型是由随机场的局部马尔可夫性来描述的, 但是由局部特性来定义整个随机场有一些固有的困难。而 Gibbs 模型是由随机场的全局性质来描述的。Hammersley-Cliford 定理说明马尔可夫随机场总是满足吉布斯 (GIBBS) 分布的, 它使得 MRF 可以使用 GIBBS 分布的联合概率表达形式, 如此一来就可以利用随机场局部的 MRF 性来定义整个随机场。

常用的 MRF 模型有 Ising 模型、MLL 模型、Potts 模型和四叉树模型等。为了计算方便, 本文采用简单的 Ising 模型。

1925 年 ISING E 提出了 Ising 模型<sup>[6]</sup>, 该模型定义在有限图上, 并且图像中每个顶点只取两个值。这种模型一般采用一阶邻域系统, 如图 4 所示。

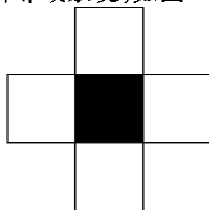


图 4 Ising 模型的数据结构

Fig. 4 Data structure of Ising model

它的能量函数为

$$U(x) = \alpha \sum_{i \in S} x_i + \beta \sum_{i \in S} \sum_{j \in N_i} x_i x_j \quad (3)$$

式中,  $\alpha$  和  $\beta$  分别表示单点基团和双点基团的势函数所对应的值。那么局部概率可以表示为

$$P(x_i | x_{N_i}) = \frac{\exp(-\alpha x_i - \beta \sum_{j \in N_i} x_i x_j)}{\sum_{x_i \in L} \exp(-\alpha x_i - \beta \sum_{j \in N_i} x_i x_j)} \quad (4)$$

### 2.2 MAP-MRF 分割准则

最大后验概率准则 (MAP) 是最优化准则中应用最为广泛的一种算法, 也是 MRF 建模中最常用的分割准则。将 MRF 模型与 MAP 准则相结合就是 MAP-MRF 体系<sup>[7]</sup>。

设观测的图像数据为  $F$ ,  $\omega$  为图像的标记场,  $P(\omega)$  是标记场  $\omega$  的先验概率,  $P(F|\omega)$  是观察值  $F$  的条件概率分布 (也称为似然函数)。MAP 准则把图像分割问题转化为计算最大后验概率的解

$$\bar{\omega} = \underset{\omega}{\operatorname{argmax}} (P(\omega)P(F|\omega)) \quad (5)$$

式中: 当前的分割结果为  $\omega$ ; 期望的分割结果为  $\bar{\omega}$ 。则 MAP 估计的代价函数表示为

$$\operatorname{cost}(\omega, \bar{\omega}) = 1 - \delta(\omega, \bar{\omega}) \quad (6)$$

式中,

$$\delta(\omega, \bar{\omega}) = \prod_{i \in S} \delta(\omega_i, \bar{\omega}_i) = \begin{cases} 0 & \omega \neq \bar{\omega} \\ 1 & \omega = \bar{\omega} \end{cases} \quad (7)$$

将当前分割结果与期望分割结果相比较, 如果有一个像素标记不一致, 其代价函数  $\operatorname{cost}(\omega, \bar{\omega})$  取 1, 都一致才能取 0。可以看出, 这样得到的分割结果精确度最高。

## 3 仿真结果及分析

本文算法流程如图 5 所示。

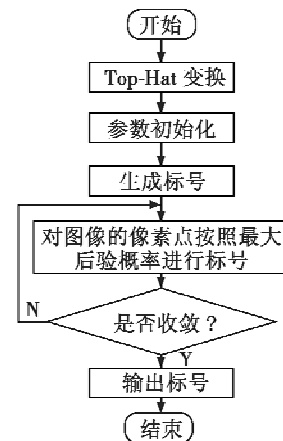


图 5 算法流程图

Fig. 5 Flowchart of the algorithm

分别采用不同背景下真实的红外弱小目标试飞图

像对本算法进行实验验证,图像像素大小为  $480 \times 220$ ,目标尺寸约为  $7 \times 11$ 。作为对比,给出了常用的直方图双峰法分割结果。实验中,图像首先经过 Top-Hat 算法背景抑制,然后分别进行直方图双峰法阈值分割与 MRF 图像分割,仿真结果如图 6 ~ 图 8 所示。

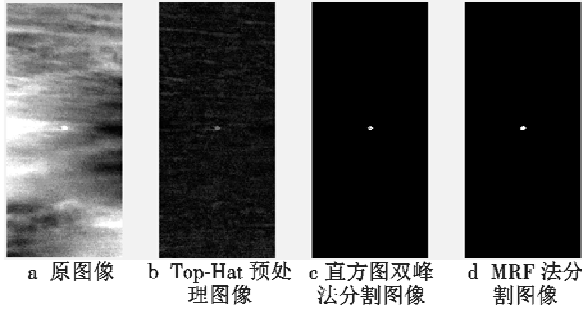


图 6 目标在复杂背景中飞行图像

Fig. 6 Images of target flying in complex background

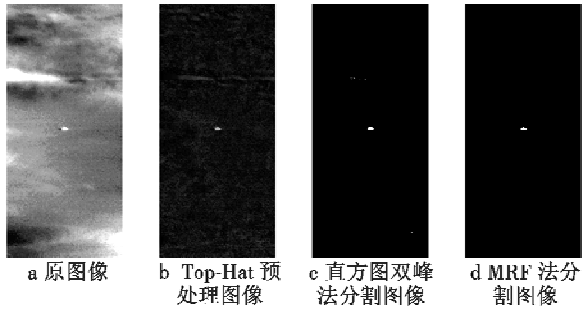


图 7 目标在有高亮度云层背景中飞行图像

Fig. 7 Images of target flying in the background with high-brightness cloud

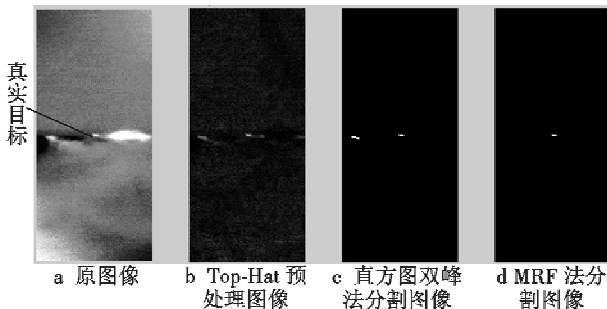


图 8 目标在高亮度云层边缘飞行图像

Fig. 8 Images of target flying on the edge of high-brightness cloud

本文采用算法平均耗时及分割误差  $P_e$  来比较直方图双峰法和 MRF 算法的分割效果,分割误差算式为

$$P_e = N_e / N_p \quad (8)$$

式中: $N_e$  为分类错误像素个数; $N_p$  为整体像素个数,误差越小说明分割越准确。对比结果如表 2 所示。

从仿真结果可以看出,两种图像分割方法均能对背景起到一定的抑制作用,当背景较为平缓、信噪比较高的情况下(图 6),经直方图双峰分割法处理过的图

像中真实目标的一小部分也被当作背景抑制掉了,目标中有空洞,而经 MRF 分割法处理后的图像中目标被完整地保留,背景得到了抑制;当背景中含有大面积高亮区域时(图 7、图 8),经直方图双峰分割法处理后的图像有背景残留,效果不理想,而 MRF 算法对于背景中大面积的云层及强边缘均具有良好的抑制性。从表 2 可以看出,MRF 分割算法的平均耗时较传统的直方图双峰法略有增加,主要是由于预处理、条件迭代过程的耗时,而分割误差比直方图双峰法减少 2 ~ 5 倍,分割结果更为准确。由此可见,基于 MRF 的图像分割算法牺牲少量时间却大大提高分割精度,表现出了比直方图双峰法更好的滤波效果。

表 2 两种分割方法的实验数据对比

Table 2 Experimental data of two segmentation methods

方法	平均耗时/s	分割误差/%		
		图 6	图 7	图 8
直方图双峰法	0.3020	0.01639	0.01607	0.05080
MRF 算法	0.3158	0.007713	0.007560	0.01035

#### 4 结束语

背景抑制技术是红外弱小目标检测和跟踪的基础,直接影响着后续检测和跟踪算法的性能。本文的主要工作在于将经典的 Top-Hat 变换和基于 MRF 的图像分割技术相结合,并利用真实的试飞图像进行了多种情况的仿真分析,仿真结果表明,该方法在增强目标的同时,抑制了背景,很好地解决了云层背景干扰的问题。同时该方法简单可行,易于硬件实现,具有一定的应用价值。

#### 参考文献

[1] 汪大宝. 复杂背景下的红外弱小目标检测与跟踪技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2010. (WANG D B. Research on infrared weak small targets detection and tracking technology under complex backgrounds[D]. Xi'an:Xiidian University, 2010. )

[2] 郭伟,赵亦工,谢振华,等. 基于非参数统计的云层背景描述与红外弱小目标检测[J]. 红外与毫米波学报, 2008, 27 (5): 383-388. (GUO W, ZHAO Y G, XIE Z H, et al. New method for cloud description and dim small infrared target detection based on nonparametric statistics [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2008, 27 (5):383-388. )

[3] 李鹏,陈钱,郑海鸥,等. 一种降低红外小目标图像中云干扰的算法[J]. 解放军理工大学学报, 2011, 12 (6):588-592. (LI P, CHEN Q, ZHENG H O, et al. Anti-interference algorithm for clouds based on infrared small