

采用扩展 MRF 的红外目标自适应检测方法

薛永宏^{1,2}, 安 玮¹, 张 涛², 张寅生²

(1. 国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073; 2. 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094)

摘 要: 针对天基红外监视系统中不同形状目标的联合检测问题, 提出基于扩展马尔可夫随机场的自适应目标检测算法。首先分析了天基红外监视系统中的目标特性, 在此基础上以典型目标形状为模板, 构建了扩展的马尔可夫随机场邻域系统; 其次构建了新的马尔可夫势函数, 并利用红外图像中背景与目标之间的马尔可夫势差异, 将复杂背景中不同形状目标联合检测问题转换为马尔可夫势差异的判别问题, 有效解决了马尔可夫随机场理论框架下混合形状目标检测问题。仿真试验结果表明, 所提出的算法能够根据目标形状的变化自适应地检测各类目标, 并可在不同图像信杂比条件下进行目标检测处理, 具有较强的鲁棒性。

关键词: 扩展马尔可夫随机场; 自适应目标检测; 目标形状

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)08-2288-06

Adaptive detection method for infrared target using extended MRF

Xue Yonghong^{1,2}, An Wei¹, Zhang Tao², Zhang Yinsheng²

(1. College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Beijing Institute of Tracking and Telecommunication Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: Aiming at the problem of combination detection of targets with various shapes in space based infrared surveillance system, an adaptive target detection method based on extended Markov random field (E-MRF) was proposed. First, the target characteristics in space based infrared surveillance system were analyzed and the extended MRF neighborhood system was established by using the typical target shapes as templates. Then the new MRF potential function was constructed. By using the potential differences between the infrared background and target, the detection problem of targets with various shapes under complex background was formulated as a discrimination problem of MRF potential function and finally the problem of mixed shape targets detection under MRF theory framework was efficiently solved. Simulation and experimental results show that the proposed method can adaptively adjust the operator according to the target shapes and perfectly detect targets with different shapes under various image SCRs. So the proposed method has a stabile performance.

Key words: extended Markov random field; adaptive target detection; target shape

收稿日期: 2012-12-14; 修订日期: 2013-01-16

基金项目: 武器装备预研基金

作者简介: 薛永宏(1985-), 男, 博士生, 主要从事空间信息处理等方面的研究。Email: sanger_xue@126.com

导师简介: 安玮(1969-), 女, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事综合电子战系统与应用、空间信息对抗技术等方面的研究。

Email: nudtanwei@tom.com

0 引言

红外监视系统具有隐身性强、作用距离远等优点,因而被广泛应用于国防军事等领域。目标检测技术是红外监视系统的核心关键技术之一,常见的目标检测算法有时域处理和空域滤波两类。其中时域处理算法,如基于序列图像的目标检测算法等,主要利用背景随时间的缓变特性和目标的运动特性进行目标检测;而空域滤波算法,如形态学滤波法^[1-2]、基于马尔可夫随机场(MRF, Markov Random Field)的检测方法^[3-6]等,则主要利用相邻像素间背景的相关性、以及背景与目标之间的非相关特性进行目标检测。

由于传感器与目标间的距离较远,一般假设红外图像中的目标为没有形状信息的点目标^[4,7]。实际应用中,随着红外传感器探测信噪比的提高、新探测体制(如过采样)等的采用,目标在红外图像中将呈现一定的形状,即由通常认为的点目标变为块目标,基于点目标假设设计的检测算法易于导致块目标的丢失。

文中以典型块目标形状为模板,通过对标准 MRF(S-MRF, Standard-MRF)邻域系统进行扩展,提出基于扩展 MRF(E-MRF, Extended-MRF)的自适应目标检测算法,可有效解决实际应用中不同形状目标的联合检测问题,提高了算法的自适应性能。

1 马尔可夫随机场模型

用 $S = \{(i, j) | 1 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq N\}$ 表示具有 MN 个像素点的图像, M, N 分别对应图像的高度和宽度。 $X = \{x_s | s \in S\}$ 表示定义在 S 上的随机场,它的一个实现记为 $x = \{x_{1,1}, x_{1,2}, \dots, x_{M,N}\}$ 代表图像的灰度值。 $\eta = \{\eta(s) | s \in S\}$ 为定义在 S 上的邻域系统,它描述了图像上像素间的相关性。若随机场 X 满足正概率性和马尔可夫性,则称为马尔可夫随机场(MRF)^[8],定义如下:

$$\begin{cases} P(X=x_s) \geq 0, \forall s \in S \\ P(X=x_s | X=x_{S-(s)}) = P(X=x_s | X=x_{\eta(s)}, \forall s \in S \end{cases} \quad (1)$$

根据 Hammersley-Clifford 定理, MRF 与 Gibbs 分布具有等价关系,即一个随机场是关于邻域系统的马尔可夫随机场,当且仅当这个随机场是关于邻域系统的 Gibbs 分布。关于邻域系统 $\eta(s)$ 的马尔可夫随机场 X 与 Gibbs 分布的等价形式可表示为:

$$P(x_s | x_r, r \in \eta(s)) = \frac{1}{Z} \exp(-U(x)) \quad (2)$$

其中, $Z = \sum_{x \in \Omega} \exp(-U(x))$ 为归一化函数, Ω 为随机场所

有可能结构 x 构成的集合。 $U(x) = \sum_{c \in C} V_c(x)$ 为能量函数,表征像素间的相关程度, $V_c(x)$ 为势函数, c 为格子-邻域系统 (S, η) 的簇(Clique),表示图像像素间的相互作用和纹理构成。典型的 MRF 二阶邻域系统及其簇类型如图 1 所示。

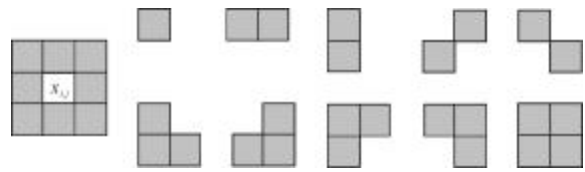


图 1 二阶邻域簇的类型

Fig.1 Cliques of second order neighborhood

2 基于 E-MRF 的自适应目标检测算法

2.1 红外图像中的目标形状分析

红外监视系统主要利用目标红外辐射信号达到探测发现目标的目的。影响目标在红外图像中形状的主要因素有光学传感器点扩散函数和传感器探测体制等。其中,点扩散函数主要描述目标能量向相邻像素的扩散过程,由下式表示

$$p_{(i_0, j_0)}(i, j) = \frac{1}{2\pi\sigma_{psf}^2} e^{-\frac{(i-i_0)^2 + (j-j_0)^2}{2\sigma_{psf}^2}} \quad (3)$$

式中: (i_0, j_0) 为连续值,表示目标在红外图像中投影点的坐标; (i, j) 为量化值,表示红外图像中像素点的坐标; σ_{psf} 为扩散函数的标准差。

由公式(3)可知,目标能量在红外图像中的分布与投影点位置、扩散函数标准差密切相关。当投影点落入两行(列)之间时,目标能量将分布在多个像元,而使其呈现块状。

传感器探测体制也是影响目标在图像中呈现形状的主要因素。以过采样为例,探测器奇偶阵列分别对目标红外辐射信号进行采样,由于探测器奇偶阵列间相差 0.5 个像元,在经过超分辨率处理、形成高分辨率图像后,目标能量将分布在至少两个以上的像素中,因而亦呈现块状。

综合分析影响目标红外图像中形状的各项因

素, 通过仿真得出目标在红外图像中的典型形状有四种, 如图 2 所示。

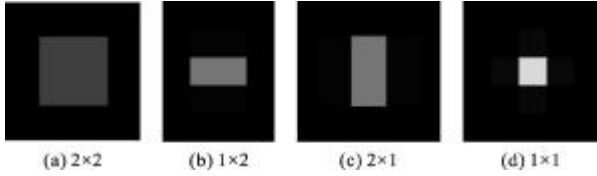


图 2 典型的形状
Fig.2 Typical target shapes

从图 2 可以看出, 仅图 2(d) 中目标呈现点状, 这是由于目标恰好落在像元中心, 扩散到相邻像元的目标能量很少的缘故; 在图 2(a)~(c) 中, 目标形状都呈现块状。目标形状的扩展丰富了目标检测、跟踪、识别所需的信息。文中将以上四种典型目标形状为模板研究其检测算法。

2.2 目标检测算法原理

红外监视系统的探测图像一般可表示为^[9]:

$$x(i, j) = \sum_{n=1}^{N_t} I_n S(i - i_n, j - j_n) + b(i, j) + w(i, j) \quad (4)$$

式中: $x(i, j)$ 为探测图像, 表示像素在 (i, j) 的灰度值; N_t 为目标数; $I_n S(i - i_n, j - j_n)$ 表示第 n 个目标的灰度值, (i_n, j_n) 为目标在图像中的位置, I_n 为目标强度; $S(\cdot)$ 为传感器成像系统函数; $b(i, j)$ 为背景杂波; $w(i, j)$ 为高斯噪声。

Tzannes 等人的研究^[10]表明, 在空域上目标表现为二维点扩散 (PSF) 脉冲信号, 而背景则表现为二阶 AR 模型:

$$\begin{cases} b(i, j) = \sum_{m=-L/2}^{L/2} \sum_{n=-L/2}^{L/2} a_{m,n} b(i-m, j-n) + w(i, j) \\ \sum_{m=-L/2}^{L/2} \sum_{n=-L/2}^{L/2} a_{m,n} = 1, (m, n) \neq 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: L 为窗口参数 (取偶); $a_{m,n}$ 为归一化系数。

由于背景和背景空间分布的不同, 且由公式 (5) 可知背景仅与其相邻的像素相关, 因此可采用马尔可夫随机场模型进行目标的检测处理:

$$P(x_{i,j}) = \frac{1}{Z} \exp \left(- \sum_{c \in C} V_c(x_{i,j}) \right) \quad (6)$$

公式 (6) 描述了图像在 (i, j) 处灰度取 $x_{i,j}$ 值的概率。通常势函数 $V_c(x_{i,j})$ 的取值应具有以下特点: 当像素点 (i, j) 为背景时应具有较大的势, 而 $P(x_{i,j})$ 较小, 即该像素属于目标的可能性小; 反之, 当 (i, j) 为目标

时, $V_c(x_{i,j})$ 应具有较小的势, 而 $P(x_{i,j})$ 较大, 即该像素属于目标的可能性大。因此, 通过设置概率门限 T_p 即可进行目标与背景的判别, 即当 $P(x_{i,j}) > T_p$ 时, 认为像素点 (i, j) 为目标; 反之则认为是背景。

根据上述分析, 文中采用有限差分算子^[3,5]对像素点 (i, j) 处的势函数进行建模:

$$V_c(x_{i,j}) = -dx_{i,j} / \sqrt{\text{var}(\eta(x_{i,j}))} \quad (7)$$

式中: $\text{var}(\cdot)$ 为方差函数; $dx_{i,j}$ 为差分算子。定义如下:

$$dx_{i,j} = \begin{cases} x_{i,j} - x_{(c-(i,j))} & c \in C_1 \\ x_{i,j} - \frac{1}{2} \sum_{(m,n) \in \{c-(i,j)\}} x_{m,n}, & c \in C_2 \\ x_{i,j} - \frac{1}{3} \sum_{(m,n) \in \{c-(i,j)\}} x_{m,n}, & c \in C_3 \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (8)$$

式中: C_1 表示包含两个像素且 $(i, j) \in c$ 的簇集合; C_2 表示包含三个像素且 $(i, j) \in c$ 的簇集合; C_3 表示包含四个像素且 $(i, j) \in c$ 的簇集合。

由公式 (8) 可知, 对点目标而言, 其邻域像素全属于背景, 差分算子 $dx_{i,j}$ 可完全反应目标与背景间的灰度差异, 势函数取值小而 $P(x_{i,j})$ 大, 可较好地行目标的判别; 但是对块目标而言, 像素点 (i, j) 的邻域既包含背景信息, 又包含目标信息, 差分算子 $dx_{i,j}$ 不能完全反应目标与背景间的灰度差异, 势函数取值将变大, $P(x_{i,j})$ 变小而使目标检测性能下降, 易于导致块目标丢失。

2.3 扩展的 MRF 邻域系统

针对基于点目标假设算法的不足, 以典型目标形状 (如图 2) 为模板, 对 S-MRF 邻域系统进行了扩展, 利用扩展的 MRF 邻域系统描述块目标区域内像素与其邻域像素间的关系。

首先, 给出 E-MRF 邻域系统的约束条件: 假设块区域 B 由像素点 $x_{i,j}, x_{i,j+1}$ 等组成, 则对任意的 $x_{i,j} \in B$ 和 $x_{i,j+1} \in B$, 有 $x_{i,j} \in \eta(x_{i,j+1})$, 即块区域 B 中的任意两个像素互为邻域。该条件约定了块区域内像素点间必须具备的相互作用关系; 否则将导致块区域与其邻域间相互作用变弱, 从而违背 MRF 的基本原则。扩展的 MRF 二阶邻域系统及其簇类型如图 3 所示。

图 3 依据典型目标形状 (如图 2) 给出了四类邻域系统, 自左向右设其编号分别为 NA、NB、NC 和 ND。由图 3 可知, E-MRF 邻域系统包含 S-MRF 邻

域系统,具有较好的兼容性。

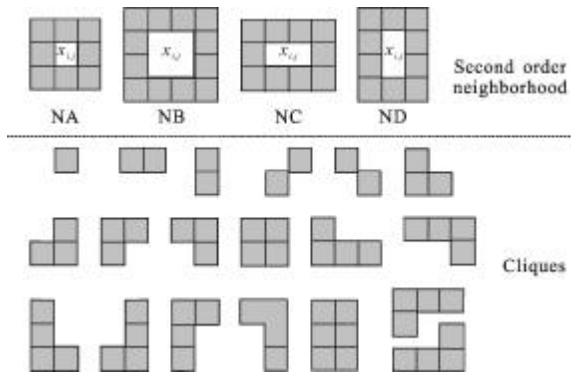


图 3 扩展的 MRF 二阶邻域系统及其簇类型

Fig.3 Second order neighborhood of E-MRF and its cliques

其次,给出基于 E-MRF 邻域系统的随机场模型:

$$p(x_B') = \frac{1}{Z} \exp\left(-\sum_{c \in C} V_c(x_B')\right) \quad (9)$$

式中:令 $x_B' = g(B)$ 表示块区域 B 的灰度取值,根据不同的应用场景,取值函数 $g(\cdot)$ 可为均值、中值或极值运算等。

最后,对公式(9)随机场模型的正定性和马尔可夫性进行简要说明。

(1) 正定性。由公式(9)的表达式可知 $p(x_B') > 0$ 必然成立,因此满足正定性要求。

(2) 马尔可夫性。假定块区域 B 仅包含两个像素 $B = \{x_{i,j}, x_{i,j+1}\}$,则由 MRF 基本原理可知公式(10)成立,即

$$\begin{cases} p(x_{i,j} | x_{1,1}, \dots, x_{m,n}, \dots) = p(x_{i,j} | \eta(x_{i,j})), (m, n) \neq (i, j) \\ p(x_{i,j+1} | x_{1,1}, \dots, x_{m,n}, \dots) = p(x_{i,j+1} | \eta(x_{i,j+1})), (m, n) \neq (i, j) \end{cases} \quad (10)$$

由于 $x_B' = g(B) = g(\{x_{i,j}, x_{i,j+1}\})$,且根据 E-MRF 邻域系统的约束条件 $x_{i,j} \in \eta(x_{i,j+1})$, $p(x_B')$ 当且仅当与 $\eta(x_{i,j})$ 和 $\eta(x_{i,j+1})$ 相关,即

$$p(x_B' | x_{1,1}, \dots, x_{m,n}, \dots) = p(x_B' | \eta(B)) \quad (11)$$

成立。式中: $\eta(B) = \eta(x_{i,j}) \cup \eta(x_{i,j+1}) / B$ 表示块区域 B 的邻域。

同理,可证明当块区域 B 包含两个以上的像素时,公式(11)也是成立的。因此,公式(9)随机场模型满足马尔可夫性要求。

2.4 算法实现

块区域一般由多个像素点组成,实际处理过程中,块区域内的像素点既可能属于目标,也可能属于背景,因此,构造合适的取值函数 $g(\cdot)$ 对算法性能有

着重要的作用。

为兼容处理点目标和块目标,避免目标与背景的误判或漏判,取值函数 $g(\cdot)$ 应满足:当块区域内多数像素属于目标时, $g(\cdot)$ 的输出应体现目标高灰度值的特点;反之,当块区域内多数像素属于背景时, $g(\cdot)$ 的输出应与背景灰度相匹配。根据上述分析,文中 $g(\cdot)$ 取中值运算,即

$$x_B' = \text{Median}(B) \quad (12)$$

则公式(8)的差分算子 $dx_{i,j}$ 可改写为:

$$dx_{i,j} = \begin{cases} x_B' - x_{\{c-B\}} & c \in C_1 \\ x_B' - \frac{1}{2} \sum_{(m,n) \in \{c-B\}} x_{m,n}, & c \in C_2 \\ x_B' - \frac{1}{3} \sum_{(m,n) \in \{c-B\}} x_{m,n}, & c \in C_3 \\ x_B' - \frac{1}{4} \sum_{(m,n) \in \{c-B\}} x_{m,n}, & c \in C_4 \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (13)$$

式中: C_4 表示包含五个像素且 $(i, j) \in c$ 的簇集合。

下面给出文中所提算法的实现步骤。

Step 1: 设当前处理图像像素的行和列编号分别为 i 和 j ,依据公式(13)和图 3 中编号为 NA 的邻域系统,计算差分算子 $dx_{i,j}$;

Step 2: 依据像素 (i, j) 的邻域,计算红外图像的局部杂波强度(包括传感器噪声强度和杂波残差强度) $\sigma_{clutter} = \sqrt{\text{var}(\eta(B))}$ 和检验统计量 $T = \sum_{c \in C} dx_{i,j}$;

Step 3: 根据单帧图像的虚警率 p_f 和局部杂波强度 $\sigma_{clutter}$,计算算法的检测门限 $T_p' = \ln(Z \cdot T_p) \sqrt{\text{var}(\eta(B))} = \sqrt{n_c} \sigma_{clutter} \Phi^{-1}(p_f)$,其中 n_c 为 NA 邻域系统中簇单元总个数;

Step 4: 根据 Step 2 和 Step 3 中计算的检验统计量 T 和检测门限 T_p' 对像素点 (i, j) 的类型进行判别,若判别为背景则记为 0,反之则记为 1;

Step 5: 分别利用图 3 中编号为 NB、NC 和 ND 的邻域系统,按 Step 1~Step 4 的步骤对像素点 (i, j) 进行处理,并对多次处理结果取或运算;

Step 6: 按照 Step 1~Step 5 的步骤对下一像素点进行处理,直至所有像素处理完毕。

从 Step 5 和 Step 6 可知,实际处理中,算法可通过多路并行运算实现,从而可以提高算法的实时处理速度。

3 仿真试验与分析

采用不同场景下的红外图像(如图 4(a1)~(c1)),通过嵌入不同形状和不同信号强度的目标(见表 1),仿真合成待处理图像(如图 4(a2)~(c2)),分别采用基于 S-MRF 和 E-MRF 的检测算法对待处理图像进行处理,对比验证两类算法的处理性能,处理结果分别见图 4(a3)~(c3)、(a4)~(c4)。仿真采用的软件环境为 Matlab R2007a,硬件环境为 Core2@2.9 GHz。仿真中假设目标与相机噪声的能量比值为 4,单帧图像虚警率 $p_f=1 \times 10^{-4}$,局部杂波强度见表 1。

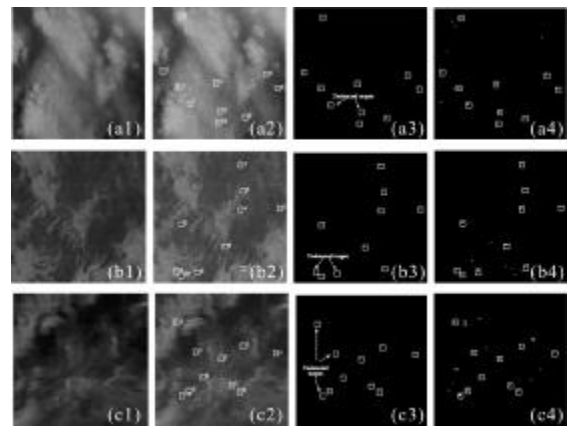


图 4 两种算法试验结果

Fig.4 Experiment results of two different algorithms

表 1 目标信杂比

Tab.1 SCR of various targets

Target No.		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	S-MRF		E-MRF	
												ρ	κ	ρ	κ
a2	$\sigma_{clutter}$	23.3	27.5	24.0	26.7	36.0	26.9	19.6	19.3	32.2	26.8				
	μ_t	264.4	203.6	167.9	238.5	290.8	175.3	205.1	187.2	243.1	251.1				
	μ_b	173.9	78.4	89.3	123.6	156.2	64.1	148.1	118.8	91.0	134.9	0.2	0.35	0	0.83
	SCR	3.9	4.6	3.3	4.3	3.7	4.1	2.9	3.5	4.7	4.3				
b2	$\sigma_{clutter}$	25.9	28.9	30.5	22.8	23.4	35.1	30	19.4	22.2	25.1				
	μ_t	189.6	207.8	224.6	174.5	171.4	250.7	216.8	172.3	146	192.5				
	μ_b	79.9	85.8	80.1	81.8	83	96.2	101.2	119	86.7	93.8	0.2	0.33	0	0.79
	SCR	4.2	4.2	4.7	4.1	3.8	4.4	3.9	2.7	2.7	3.9				
c2	$\sigma_{clutter}$	23.9	29.2	20.3	23.1	23.3	25.3	22.3	27.5	24.5	20.3				
	μ_t	168.1	196.1	123.1	131.9	172.8	179.9	198.1	181.9	194.2	130.9				
	μ_b	110.8	62.9	50.3	56.0	80.7	72.2	107.2	73.1	88.4	70.1	0.3	0.35	0	0.96
	SCR	2.4	4.6	3.6	3.3	4.0	4.3	4.1	4.0	4.3	3.0				

注: μ_t 为目标块灰度峰值; μ_b 为目标块邻域内背景灰度的均值; $SCR=(\mu_t - \mu_b) / \sigma_{clutter}$ 表示目标信杂比。

从图 4 的仿真结果可以看出,基于 S-MRF 的检测算法会导致目标的丢失;对比表 1 中目标信杂比数据可知,由于能量的扩散,单个像素中目标能量降低,导致目标信杂比(SCR)降低,使块目标具有类背景的性质而难以检测出来。

文中所提基于 E-MRF 的检测算法以典型目标形状为模板,可根据不同的目标形状自适应地在相应的滤波结构中产生输出,因而可得到稳定的目标

检测性能。另外,由图 4(a4)~(c4)的处理结果可知,文中所提算法会导致虚警点的产生,这是由于图像背景起伏大,尤其是背景边缘变化剧烈,产生类似目标形状分布的背景块所致。实际应用中,可结合目标的运动特性,通过进一步的时域滤波(序列图像分析)予以消除。对诸如 SBIRS 等系统而言,漏警导致的后果更加严重;因此,对于单帧图像的目标检测算法而言,适当的虚警是可以接受的。

目标形状的扩展为目标与虚警的判别提供了丰富的信息。因此,好的目标检测算法不仅要目标从背景中检测出来,而且应尽可能地保留目标的原始形状信息,为虚警的剔除提供支持。为进一步说明文中所提算法的性能,采用目标丢失率 ρ 和有效目标检测面积比率 κ 两个评价因子对算法性能进行量化分析,计算结果见表 1。

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho = \frac{N_{\text{Loss}}^T}{N_{\text{Total}}^T} \\ \kappa = \frac{\sum_{j=1}^{N_D^T} A_j^D}{\sum_{i=1}^{N_{\text{Total}}^T} A_i} \end{array} \right. \quad (14)$$

式中: N_{Loss}^T 和 N_{Total}^T 分别表示丢失的目标个数和总目标个数, N_D^T 表示检测出的目标个数,三者间的相互关系为 $N_{\text{Total}}^T = N_{\text{Loss}}^T + N_D^T$; A_j^D 和 A_i 分别表示检测(标记)出的目标(不包含虚警)形状的总面积和添加目标形状的原始总面积。

ρ 和 κ 分别从不同的角度对算法的检测能力进行描述, ρ 越小、 κ 越大说明算法对目标的检测能力越强。从表 1、 ρ 和 κ 两项指标的对比中可以看出,在文中设定的仿真场景下, E-MRF 算法较 S-MRF 算法不仅具有更低的目标丢失率,而且对目标形状信息的保护也更强。此外,对比表 1 中不同的目标信杂比可知,文中所提算法的检测性能随信杂比变化的差异小,鲁棒性更强。

4 结 论

文中对目标在红外监视系统探测图像中呈现的形状进行了分析,在此基础上,以典型的目标形状为模板对 S-MRF 邻域系统进行扩展,创建了 E-MRF 邻域系统,提出基于 E-MRF 的红外目标检测处理新算法。仿真结果表明,文中所提算法在不同的信杂比条件下对不同形状的目标不仅具有稳定的检测性能,而且可较好地保留目标的原始形状信息;算法的实现为天基红外监视系统目标与虚警的判别提供了有力支撑。

参考文献:

[1] Yu Nong, Wu Changyong, Tang Xinyi, et al. Adaptive

background perception algorithm for infrared target detection [J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(2): 200-204. (in Chinese)

余农, 吴长泳, 汤心溢, 等. 红外目标检测的自适应背景感知算法[J]. 电子学报, 2005, 33(2): 200-204.

[2] Luo Yougan, Yang Degui, Zhuang Zhaowen. Application of temporal-spatial domain filter in infrared small and dim targets detection system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(3): 571-575. (in Chinese)

罗有敢, 杨德贵, 庄钊文. 时空域滤波方法在红外弱小目标检测系统中的应用 [J]. 红外与激光工程, 2010, 39(3): 571-575.

[3] Sun Xinde, Fang Guizhen. Infrared small targets detection based on MRF model [J]. Procedia Engineering, 2012, 29: 420-424.

[4] Zaveri M A, Merchant S N, Desai U B. Tracking of point targets in IR image sequence using multiple model based particle filtering and MRF based data association [C]//IEEE Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition, 2004, 4: 729-732.

[5] Wang Dabao, Liu Shangqian, Kou Xiaoming, et al. Infrared background clutter suppression algorithm of adaptive regularization based on MRF [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2009, 28(6): 440-444. (in Chinese)

汪大宝, 刘上乾, 寇小明, 等. 基于 MRF 的自适应正规化红外背景杂波抑制算法 [J]. 红外与毫米波学报, 2009, 28(6): 440-444.

[6] Parag T. Coupled label and intensity MRF models for IR target detection [C]//IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW), 2011: 7-13.

[7] Zhang Wei, Meng Xianglong, Cong Mingyu, et al. Algorithm of space point target detection for IR scan images [J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38(5): 921-925. (in Chinese)

张伟, 孟祥龙, 丛明煜, 等. 天基红外扫描图像点目标检测算法[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(5): 921-925.

[8] Li Stan Z. Markov Random Field Modeling in Image Analysis[M]. Berlin: Springer, 2009: 1-30.

[9] Tartakovsky A G, Brown J. Adaptive spatial temporal filtering methods for clutter removal and target tracking [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2008, 44(4): 1522-1537.

[10] Tzannes A P, Brooks D H. Detecting small moving objects using temporal hypothesis testing [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2002, 38(2): 570-586.