

双向过采样系统点目标采样模型与检出方法

杨天远,周 峰,王怀义,童锡良
(北京空间机电研究所,北京 100094)

摘 要:传统的采样系统对点目标的能量收集能力差,图像信噪比低,像斑面积小。为了克服传统采样的缺点,在对弱点目标进行探测时可以采用双向过采样技术。建立了点目标采样系统的数学模型,分析了双向过采样系统对点目标的检测性能。通过点目标采样系统的数学模型,得到了双向过采样系统点目标像斑分布均匀、灰度梯度小、有一定的面积的特点。从而设计出针对双向过采样系统的点目标检出方法。采样模型得到的像斑能量分布表明,双向过采样系统对点目标的能量收集能力强,点目标像斑面积大,信噪比稳定,采样系统对点目标的空间相对位置有很强的适应能力。仿真分析表明,目标检出方法能够有效提高点目标图像的信噪比。

关键词:双向过采样;点目标采样模型;点目标检测

中图分类号:TP391 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2016.11.025

Sampling model and detection method of point target based on bidirectional over-sampling system

YANG Tian-yuan, ZHOU Feng, WANG Huai-yi, TONG Xi-liang
(Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China)

Abstract: The traditional sampling system is not able to collect the energy of point target effectively, which leads to low SNR of the image and small image spot. To solve these problems, the bidirectional over-sampling system was used to detect weak point target. The model of point target sampling system was built, and the detecting ability of bidirectional over-sampling system for point target was analyzed. According to the model of point target sampling system, the distribution of the obtained point target on the image is uniform, the gray gradient is small, and point target has a certain area. The energy distribution of the target obtained by the sampling model shows that the bidirectional over-sampling system is able to collect the energy of point target effectively, the SNR is stable, and the area of target is larger. The sampling system has strong adaptability to the relative position of the point target. The simulation result shows that detection method can effectively improve the SNR of the point target image.

Key words: bidirectional over-sampling; sampling model of point target; point target detection

1 引 言

扫描型红外系统的视场较大,覆盖范围宽,广泛应用于天基大范围搜索与跟踪系统^[1]。导弹等目标在红外系统成像平面内表现为弱点目标。天基预

警系统需要对目标进行准确、高效、连续、稳定的探测,从而完成对目标的及时确认和追踪。

传统探测器多采用单列探测器扫描成像,扫描方向上的采样间隔与瞬时视场基本相等。这种采样

作者简介:杨天远(1990-),男,硕士研究生,主要从事红外目标检测与识别方面的研究工作。E-mail: yangtianyuan@163.com

导师简介:周 峰(1974-),男,博士生导师,博士,主要从事红外遥感器总体设计方面的研究工作。E-mail: zfsimon@163.com

收稿日期:2016-02-16; **修订日期:**2016-03-23

系统对点目标的能量收集能力差,图像信噪比低,容易出现点目标跨像元的情况,导致能量分散。点目标在每帧图像之间不稳定、不连续,不利于图像的关联,容易产生漏警。而且点目标在图像上的像斑分布面积小,容易与随机噪声混淆。不能满足天基预警系统对点目标探测的要求。

双向过采样技术是一种探测弱点目标的技术,已经在美国中段太空试验卫星(MSX)、天基红外预警系统大椭圆轨道卫星(SBIRS-HEO)等卫星上得到了应用^[2]。相比于传统采样系统,双向过采样系统对点目标的能量收集能力强,点目标像斑面积大,信噪比稳定^[3-4],采样系统对点目标的大小和空间相对位置有很强的适应能力,具有明显的应用优势。

本文分析了双向过采样对点目标的采样过程,建立了点目标采样系统的数学模型,并分析了双向过采样系统对点目标的检测性能。利用双向过采样系统点目标像斑的特点,可以设计出针对双向过采样系统的点目标检出方法。通过中值滤波、最小相对灰度梯度滤波和局部对比度均值反差滤波三个步骤,完成对双向过采样点目标图像背景杂波和噪声的抑制。仿真结果表明,经过图像处理,双向过采样系统点目标探测信噪比很高,有利于天基预警系统对点目标探测。

2 点目标采样系统数学模型

2.1 双向过采样原理

双向过采样系统通过两排探测器扫描成像,二维方向上采样间隔等于瞬时视场的一半。线列方向通过两排探测器错位实现加密采样,扫描方向通过时间实现加密采样,因此称这种采样模式为双向过采样,也有文章称之为“时一空”过采样^[5]。如图1所示。

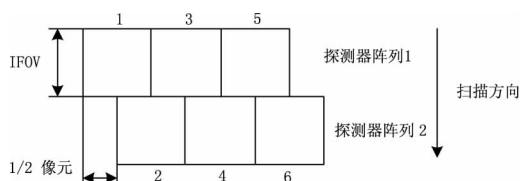


图1 双向过采样系统探测器阵列

Fig.1 The detector of bidirectional over-sampling system

双向过采样的输出结果是两列探测器输出数据的融合。能量采集数据采用隔行存储的方式,第一列探测器的数据存储在奇数列的数据单元中,第二列探测器的数据存储在偶数列的单元中,同一行的数据奇数列数据比偶数列滞后两个采样周期,第一

列探测器第 N 次采样时与第二列探测器第 $(N+2)$ 次采样时的数据存储在同行中。

2.2 点目标采样系统数学模型

点目标采样模型的建立是对采样系统性能进行分析的基础。美国 Casey E J^[6] 等人从频域的角度建立了探测器单元的点目标采样模型,但是模型的输出并不是探测器阵列在一个扫描周期内的输出,而且也没有考虑采样时点目标与探测器的相对位置对采样结果的影响。本文从空域的角度,增加了梳状函数进行离散采样,使模型的输出为探测器阵列在一个扫描周期内的输出;并且在模型中考虑了采样时点目标与探测器阵列的相对位置关系,得到了随机位置下的采样结果;还考虑了探测器的单元间距和行间距,使模型的输出更符合实际情况。

对于双向过采样系统,在扫描方向上探测器每前进半个像元,输出一组数据。近似认为探测器相对于点目标的像在采样时间内匀速运动,探测器在运动中连续对覆盖区域进行能量采集,所以对先覆盖到的部分采集时间长,后覆盖到的部分采集时间短,对于像元尺寸(感光部分)为 $2a \times 2a$ 的双向过采样系统,积分时间为 T ,则平行于运动方向(x 方向)采样函数:

$$f_x(x) = \begin{cases} T & |x| \leq a/2 \\ \left(1 - \frac{|x| - a/2}{a}\right)T & a/2 < |x| \leq 3a/2 \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (1)$$

垂直于运动方向(y 方向)采样函数:

$$f_y(y) = \begin{cases} 1 & |y| \leq a \\ 0 & |y| > a \end{cases} \quad (2)$$

实际中的采样函数为两个方向上采样函数的乘积:

$$F(x, y) = f_x(x)f_y(y) \quad (3)$$

点目标在焦平面上的辐射能量近似服从二维高斯分布^[7],其表达式为:

$$E(x, y) = \frac{A_0}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (4)$$

式中, (x_0, y_0) 为点目标能量分布的中心位置,本文为了方便计算,取为坐标原点。 A_0 反映了目标的能量强弱。本文取 $A_0 = 1$ 。 σ 为能量分布的标准差,点目标在焦面上的能量分布和光学系统有关,本文取 $3\sigma = a/2$ 。

如图2所示,像元从位置1移动到位置2,图左侧的梯形函数代表了扫描方向上的采样函数,下方的矩形函数代表了垂直于扫描方向上的采样函数。采样函数与点目标在区间上乘积的积分表示了一个单元在一个采样周期内的输出结果。采样函数 $F(x, y)$ 中心点坐标为 (p_1, p_2) , 探测器单元的能量收集结果:

$$C(p_1, p_2) = \int_{p_2-a}^{p_2+a} \int_{p_1-3a/2}^{p_1+3a/2} F(x-p_1, y-p_2) E(x, y) dx dy \quad (5)$$

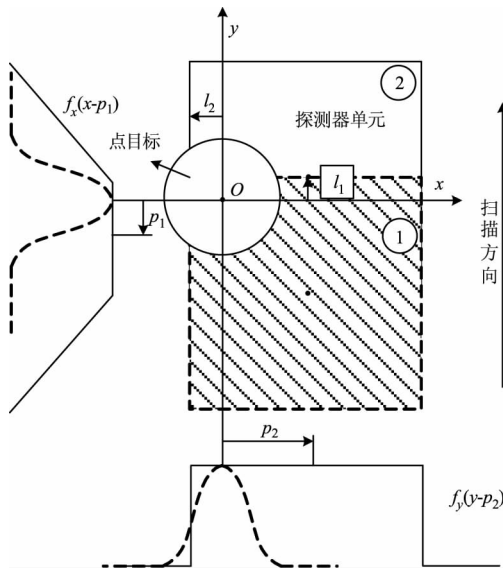


图2 双向过采样系统采样过程

Fig. 2 The process of bidirectional over-sampling

$C(p_1, p_2)$ 为一个探测器单元从不同位置 (p_1, p_2) 开始一个采样周期后的采样结果。对于探测器阵列, 对点目标采样的输出结果为梳状函数与 $C(p_1, p_2)$ 的乘积。在对点目标进行能量采集的过程中, 探测器单元与目标的初始相对位置是随机的, 图2中 l_1 为第一次能量收集时点目标中心距探测器单元上边缘的距离, l_2 为第一次能量收集时点目标中心距探测器单元左边缘的距离。实际的采样过程中, 由于点目标是时刻运动的, 造成点目标与探测器的空间相对位置会发生变化, 每次扫描成像时的 l_1, l_2 会发生变化, 从而得到不同的采样结果。考虑到探测器单元有一定的非感光区域, 如果探测器单元非感光部分和感光部分的长度比为 ε (本文取 $\varepsilon = a/10$), 则在第 n 次扫描成像的过程中, 探测器对点目标的采样结果为:

$$S(p_1, p_2, n) = \text{comb}\left(\frac{p_1 - l_1(n) + a/2 + \xi(p_1)}{a}\right) \text{comb}\left(\frac{p_2 - l_2(n)}{a + a\varepsilon}\right) C(p_1, p_2) \quad (6)$$

式中, $\xi(p_1)$ 与两列探测器之间的空隙有关。本文取两列探测器间的间隔为 $2a$, 此时 $\xi(p_1) = 0$ 。 l_1, l_2 的取值范围为:

$$l_1 \in (-a/2, a/2)$$

$$l_2 \in (-(a + a\varepsilon)/2, (a + a\varepsilon)/2)$$

对于像元感光尺寸 $a \times a$ 为常规采样系统, 探测器单元非感光部分和感光部分的长度比为 ε , 其探测器单元的采样函数在扫描方向上是长度为 $2a$ 的三角形窗口, 在垂直于探测器方向上是长度为 a 的矩形窗口, 其梳状函数的采样间隔与双向过采样系统相同。对于常规采样系统, 探测器对点目标的采样结果为:

$$S'(p_1, p_2, n) = \text{comb}\left(\frac{p_1 - l_1(n)}{a}\right) \text{comb}\left(\frac{p_2 - l_2(n) - (a + a\varepsilon)/2}{a + a\varepsilon}\right) C'(p_1, p_2) \quad (7)$$

l_1, l_2 的取值范围与式(6)相同。对于双向过采样系统, 在光学系统、探测器条件已知的情况下, 式(6)、式(7)中的 σ, a, ε 都已经确定, 影响 S, S' 的条件只有 l_1, l_2 , 即点目标与探测器的空间相对位置。

图3列举了在两种空间相对位置下双向过采样系统和传统采样系统的采样结果。图3(a)、图3(b)为 $l_1 = (a + \varepsilon)/2, l_2 = a/2$ 时式(6)、式(7)的输出情况, 图3(c)、图3(d)为 $l_1 = 0, l_2 = a/2$ 时式(6)、式(7)的输出情况。

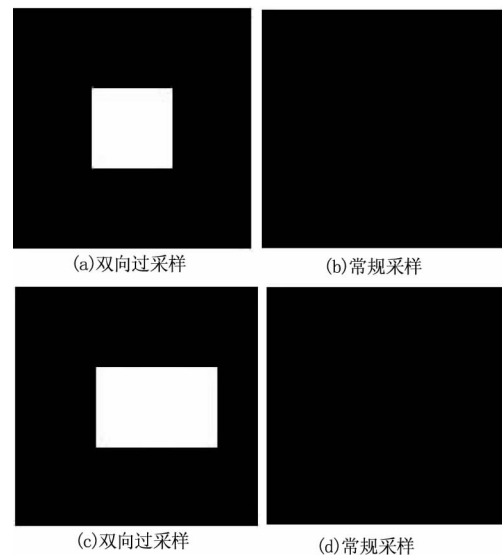


图3 点目标采样结果

Fig. 3 The sampling results of point target

对两种采样系统的采样结果进行初步分析, 可以发现双向过采样系统点目标的采样结果面积更大, 能量值更高。常规采样系统点目标的面积小, 而且由于存在点目标“跨像元”和落入非感光

区域的可能性,导致能量被分散,能量收集能力差。

2.3 点目标采样结果能量分布特点

按双向过采样目标采样结果能量最大值为1,将能量值进行归一化,图4(a)、4(b)分别是双向过采样系统 $\sigma = a/3$ 情况下 l_1 、 l_2 变化时点目标像斑能量值中四点能量的最大值、均值的变化结果。图4(c)、4(d)分别是常规采样系统 l_1 、 l_2 变化时点目标像斑能量值中四点能量的最大值、均值的变化结果。从图中可以看出双向过采样系统采样结果能量最大值的变化非常小,均值的变化也很小,有稳定的采样输出。这保证了在对点目标进行连续观测的过程中每一帧图像中点目标像斑的能量均匀,差异很小,这不仅有利于单帧图像中图像噪声的抑制和目标检出,也给图像的多帧关联带来便利,为点目标的快速识别和稳定追踪奠定了基础。而常规采样系统的最大值变化很大,均值能量很低。点目标的连续性得不到保证,容易丢失目标。

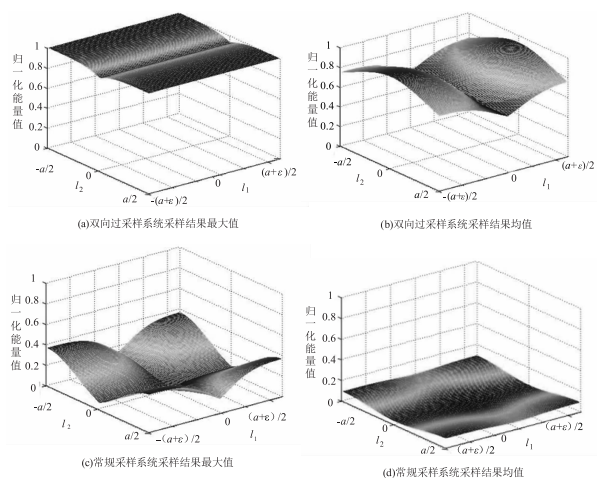


图4 点目标采样结果最大值和能量均值随空间相对位置的变化

Fig.4 The maximum and average of sampling results with different point positions

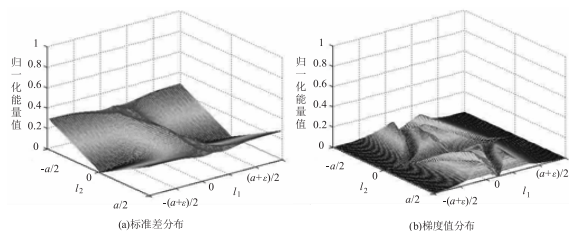


图5 双向过采样系统点目标采样结果标准差和梯度值分布

Fig.5 The standard deviation and gradient of sampling results of bidirectional over-sampling system

图5(a)、5(b)是双向过采样系统采样结果的

标准差和最小相对梯度随点目标空间相对位置的变化情况。双向过采样结果的能量均值和标准差分布,说明双向过采样结果具有一定的面积。梯度值小,说明能量分布比较均匀,起伏很小。

3 双向过采样系统点目标检出方法

从双向过采样系统点目标采样模型的输出得到了点目标采样结果的像斑特点。可以根据像斑特点设计出相应的点目标检出方法。双向过采样体制下点目标采样结果最小相对梯度一般不会大于0.2,像斑能量分布均匀,利用这个特点,可以采用最小相对灰度梯度滤波;点目标像斑有一定的面积,能量主要集中在四个像素中,可以利用局部对比度均值反差滤波。本文通过中值滤波、最小相对灰度梯度滤波和局部对比度均值反差滤波三个步骤,完成对双向过采样点目标图像背景杂波和噪声的抑制。

3.1 中值滤波

首先采用中值滤波的方法,对平滑的背景杂波进行抑制,同时可以保留点目标的特征。

设 $I_1(i,j)$ 是输入图像,取 $I_1(i,j)$ 为中心的 5×5 区域进行中值滤波,结果为:

$$I_1'(i,j) = \text{med}\{I_1(i-m, j-n), -2 \leq m, n \leq 2\} \quad (8)$$

获得的残差图像为:

$$I_2(i,j) = I_1(i,j) - I_1'(i,j) \quad (9)$$

3.2 最小相对灰度梯度滤波

最小相对灰度梯度滤波的目的是滤除高强度的噪点和剧烈变化的背景杂波。相对灰度梯度定义为像素 (i,j) 的八邻域灰度梯度^[8]与像素 (i,j) 的灰度值之比。高强度的噪点表现为周围八个方向的相对梯度都很大,而双向过采样目标图像总会有一个方向相对梯度比较小。利用这个特点,可以计算中心像素在各个方向上的相对梯度,求各个方向上相对梯度的最小值,比较最小值和门限的大小。然后对最小相对梯度值较高位置进行灰度值的替换。这样可以抑制大部分的高强度的噪点和剧烈变化的背景杂波。 $I_2(i,j)$ 像素的八邻域灰度梯度为:

$$\begin{cases} D_1 = |I_2(i-1, j-1) - I_2(i, j)| \\ D_2 = |I_2(i-1, j) - I_2(i, j)| \\ D_3 = |I_2(i-1, j+1) - I_2(i, j)| \\ D_4 = |I_2(i, j-1) - I_2(i, j)| \\ D_5 = |I_2(i, j+1) - I_2(i, j)| \\ D_6 = |I_2(i+1, j-1) - I_2(i, j)| \\ D_7 = |I_2(i+1, j) - I_2(i, j)| \\ D_8 = |I_2(i+1, j+1) - I_2(i, j)| \end{cases} \quad (10)$$

则最小相对灰度梯度为:

$$D(i, j) = \frac{\min(D_1, D_2, D_3, D_4, D_5, D_6, D_7, D_8)}{I_2(i, j)} \quad (11)$$

将最小相对灰度梯度较高的像素进行灰度值的替换,得到的图像处理结果为:

$$I_3(i, j) = \begin{cases} I_2(i, j) & D(i, j) < TH \\ \min(I_2(i-m, j-n), -1 \leq m, n \leq 1) & D(i, j) \geq TH \end{cases} \quad (12)$$

TH 为梯度值的判决门限。经过处理后的图像为 $I_3(i, j)$ 。

3.3 局部对比度均值反差滤波

对图像的噪声进行抑制之后,还需要对云层边缘等背景杂波进行进一步的抑制。由于云层边缘信号等背景杂波相对于点目标有一定的连续性,因此可以利用局部对比度均值反差^[9-11]这个特征,对图像进行处理。图像的处理结果为:

$$I_4(i, j) = \frac{1}{n_{in}(k, l) \in N_{in}(i, j)} \sum I_3(k, l) - \frac{A}{n_{out}(k, l) \in N_{out}(i, j)} \sum I_3(k, l) \quad (13)$$

N_{in} 表示以像素 (i, j) 为中心、大小与目标相近的模板,本文选用 3×3 的模板,这样可以保证点目标四个能量较高的位置都可以取到高值。 N_{out} 为以像素 (i, j) 为中心更大的模板(除去 N_{in}),本文选用 $7 \times 7 - 3 \times 3$ 的模板。 n_{in} 、 n_{out} 为 N_{in} 、 N_{out} 中的像素数。 A 为背景抑制系数,反映出对背景的抑制程度。

选用图像信噪比来评价图像的处理效果,定义为目标强度 S_{target} 和噪声标准差 σ_{noise} 的比值^[11]:

$$\text{SNR} = \frac{S_{\text{target}}}{\sigma_{\text{noise}}} \quad (14)$$

4 仿真分析

为了验证点目标检出方法的性能,进行了双向过采样系统下的点目标检出仿真。仿真条件为:空间相机轨道高度为 10000 km,焦距为 600 mm,扫描速度为 $5^\circ/\text{s}$,像元尺寸为 $32 \mu\text{m} \times 32 \mu\text{m}$ 。目标辐射强度 $3.1 \times 10^3 \text{ W/sr}$,背景辐亮度均值 $6.9 \times 10^{-3} \text{ W/(m}^2 \cdot \text{sr)}$ 。采用本文方法进行图像处理,统计 100 次随机空间位置时点目标的图像信噪比均值,并与均值滤波、高通滤波、中值滤波的滤波结果进行比较,得出的结果如表 1 所示(原始图像的均值信噪比为 7)。

表 1 不同检出方法点目标图像信噪比

Tab. 1 SNR of point target image with different detection methods

目标检出方法	均值滤波	高通滤波	中值滤波	本文方法
SNR	11.0910	12.2555	25.1880	45.8464

从统计结果可以看出,相比于传统的点目标检出方法,由于有效利用了点目标在双向过采样系统下的像斑特点,本文方法可以更有效地提高双向过采样系统点目标图像的信噪比。

选取一次仿真结果进行显示和分析。图 6 为原始的仿真图像,图 7(a)~(d)分别为经过均值滤波、高通滤波、中值滤波^[12]和本文方法后的图像处理结果。可以看出,对于图 6 而言,中值滤波方法优于均值滤波和高通滤波,本文方法优于中值滤波。而且本文方法能够很好地抑制高频噪声点。图 8 是经过本文方法滤波后的点目标图像灰度值分布。可以看出,本文方法对于大部分的高频、低频噪声有很好地抑制效果,有利于对点目标进行准确、快速的检出。

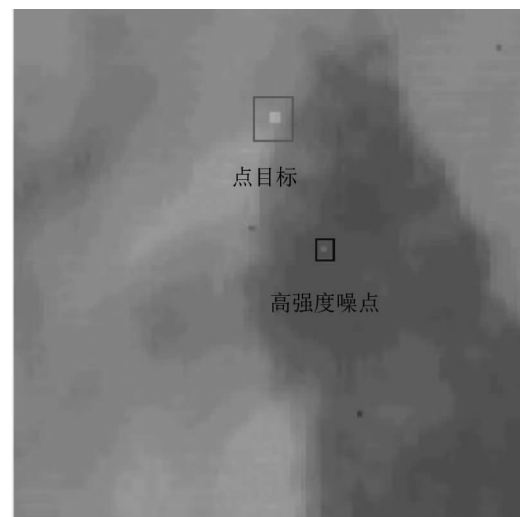


图 6 仿真图像

Fig. 6 Simulated image

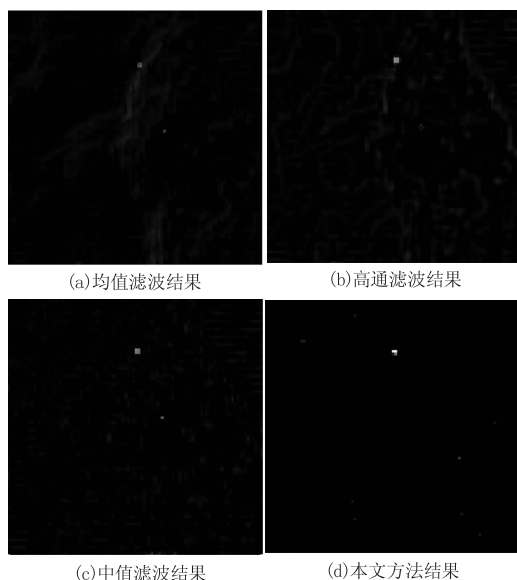


图7 不同检出方法获得的点目标图像处理结果
Fig.7 Point target image processing results obtained by different detection methods

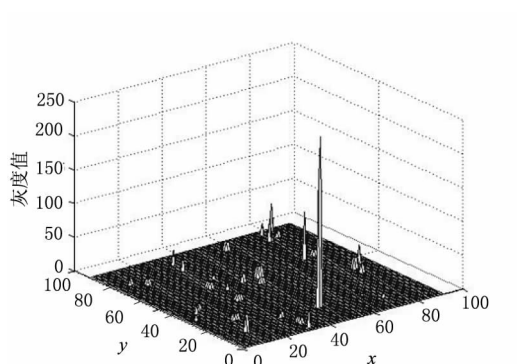


图8 经过本文方法滤波后的点目标图像灰度值分布
Fig.8 Gray value distribution of the point target image after filtering presented in this paper

5 结 论

本文分析了双向过采样对点目标的采样过程,建立了点目标采样系统的数学模型,并分析了双向过采样系统对点目标的检测性能。通过分析点目标在双向过采样系统下的像斑特点,与点目标的常规采样结果进行对比,得出双向过采样系统的应用优势。利用双向过采样系统点目标像斑面积稳定、能量均匀的特点设计出适用于双向过采样系统的点目标检出方法。仿真结果表明,本文方法对于大部分噪声有很好的抑制效果,可以更有效地提高双向过采样系统点目标图像的信噪比,有利于对点目标进行准确、快速的检出。

参考文献:

- [1] MAO Yifan, ZHANG Duolin, WANG Lu. Analysis on early warning capability of USA's SBIRS-HEO satellite[J]. Infrared Technology, 2014, 36(6): 467-470. (in Chinese)
毛艺帆, 张多林, 王路. 美国 SBIRS-HEO 卫星预警能力分析[J]. 红外技术, 2014, 36(6): 467-470.
- [2] O'Neil R R, Gardiner H A B, Gibson J J. MSX: Remotely sensed observations of atmospheric infrared radiance and spatial structure [C]//International Symposium on Remote Sensing. International Society for Optics and Photonics, 2002: 446-453.
- [3] DOGN Yucui, CHEN Fansheng, SU Xiaofeng, et al. Temporal-spatial oversampling system and its performance analysis in point target detection[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(9): 2498-2507. (in Chinese)
董玉翠, 陈凡胜, 苏晓峰, 等. 时空过采样系统在点目标检测中的性能仿真[J]. 光学精密工程, 2014, 22(9): 2498-2507.
- [4] LI Zhiguo, SHUN Xin, ZHU Shusheng, et al. Target tracking algorithm based on certainty measurement of the feature[J]. Laser & Infrared, 2015, 45(5): 576-579. (in Chinese)
李志国, 顾鑫, 祝树生, 等. 基于特征确定性的目标跟踪算法[J]. 激光与红外, 2015, 45(5): 576-579.
- [5] WANG Shitao, ZHANG Wei, JIN Lihua, et al. Point target detection based on temporal-spatial over-sampling system [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2013, (1): 68-72. (in Chinese)
王世涛, 张伟, 金丽花, 等. 基于时-空过采样系统的点目标检测性能分析[J]. 红外与毫米波学报, 2013, (1): 68-72.
- [6] Casey E J, Kafesjian S L. Infrared sensor modeling for improved system design [C]//Aerospace/Defense Sensing and Controls. International Society for Optics and Photonics, 1996: 23-34.
- [7] Blackman S, Popoli R. Design and analysis of modern tracking systems [M]. Boston: Artech House, 1999: 99-100.
- [8] ZHANG Laixian, SUN Huayan, GUO Huichao, et al. Auto focusing algorithm based on largest gray gradient summation[J]. Acta Photonica Sinica, 2013, 42(5): 615-610.

- (in Chinese)
- 张来线,孙华燕,郭惠超,等. 基于图像灰度梯度最大值累加的自动调焦算法[J]. 光子学报,2013,42(5): 615-620.
- [9] LI Wei, LI Hui. Infrared target tracking based on multiple features fusion and weight selected particle filter[J]. Laser & Infrared, 2014, 44(1): 35-40. (in Chinese)
- 李蔚,李辉. 多特征融合的优化粒子滤波红外目标跟踪[J]. 激光与红外, 2014, 44(1): 35-40.
- [10] LI Ping, WEI Zhonghui, HE Xin, et al. Object recognition based on shape feature fusion under multi-views[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(12): 3368-3376. (in Chinese)
- 李平,魏仲慧,何昕,等. 采用多形状特征融合的多视点目标识别[J]. 光学精密工程, 2014, 22(12): 3368-3376.
- [11] ZHU Xiangling, WU Qinzhang, CHEN Hong. Fusion algorithm of dual waveband infrared images based on wavelet transformation[J]. Laser & Infrared, 2014, 44(5): 572-576. (in Chinese)
- 朱祥玲,吴钦章,陈洪. 基于小波变换的双波段红外图像融合方法[J]. 激光与红外, 2014, 44(5): 572-576.
- [12] HE Haiming, QI Donglian, ZHANG Guoyue, et al. Fast and efficient mean filtering algorithm for removing the salt and pepper noise[J]. Laser & Infrared, 2014, 44(4): 469-472. (in Chinese)
- 何海明,齐冬莲,张国月,等. 快速高效去除图像椒盐噪声的均值滤波算法[J]. 激光与红外, 2014, 44(4): 469-472.