

红外扫描过采样系统点目标检测性能分析与仿真

林两魁¹ 王少游¹ 王铁兵²

¹上海卫星工程研究所, 上海 201109

²国防科学技术大学电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073

摘要 过采样是为提高遥感扫描图像分辨率而提出的一种新的成像体制, 为将其应用于红外搜索与跟踪系统, 需研究过采样对系统点目标检测性能的影响。从扫描成像原理角度对比分析常规采样和过采样的特点; 基于高分辨率图像退化方式给出扫描图像仿真方法; 通过仿真扫描图像进行单帧目标检测处理, 对比分析两种采样体制下的系统点目标检测性能。结果表明, 在相同条件下, 过采样系统点目标检测性能优于常规采样; 常规采样扫描图像中目标一般呈现 1×1 点状, 而过采样扫描图像中目标呈现斑点状, 利用该特性可进一步提升过采样系统目标检测性能。

关键词 遥感; 图像处理; 过采样; 红外扫描; 图像仿真; 点目标检测

中图分类号 TP75 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.0528001

Simulation and Analysis of Point Target Detection Performance for Infrared Scanning Over-Sampling System

Lin Liangkui¹ Wang Shaoyou¹ Wang Tiebing²

¹Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 201109, China

²School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China

Abstract The over-sampling is a novel imaging scheme for improving resolution of remote sensing scanning images. If the scheme is employed by the infrared search and track system, it is necessary to analyze the effect of the over-sampling on the point target detection performance. The characteristics of over-sampling imaging are compared to those of the standard sampling with respect to the scanning imaging principle. Based on degradation of high-resolution image, a method of scanning image simulation is proposed. The scanning images including objects are simulated and processed by a typical single-frame target detection algorithm, and the detection performance of the two sampling schemes is analyzed. Experimental results show that under the same conditions, the point target detection performance of the over-sampling scheme is better than the standard sampling. The scanning image of standard sampling for target is generally a 1×1 point, while the over-sampling scheme creates pixel-clutter for target. The characteristic can improve the target detection performance further.

Key words remote sensing; image processing; over-sampling; infrared scanning; image simulation; point target detection

OCIS codes 280.4991; 100.4993; 100.6640

1 引 言

扫描相机探测视场大、覆盖范围广、空间分辨率高, 在航空航天遥感领域有广泛应用。为进一步提高扫描相机空间分辨率, 法国研究人员提出了一种新的双向过采样扫描成像体制, 并成功应用于 SPOT 遥感卫星^[1]。该体制不改变光学系统配置, 只在常规一排线阵像元基础上再增加一排像元, 两排像元错开半个像元的距离排列, 扫描方向每隔半个瞬时视场采样一次。对获得的数据进行超分辨处理, 获得分辨率优于常规采

收稿日期: 2015-11-04; **收到修改稿日期:** 2016-01-04

作者简介: 林两魁(1980—), 男, 博士, 工程师, 主要从事光学载荷设计与应用、多传感器多目标跟踪和信息融合等方面的研究。E-mail: gxckk1980@sina.com

样的遥感图像^[1-3]。美国研究人员将过采样成像体制应用于红外搜索与跟踪系统(IRST),例如中段空间实验(MSX)卫星的 SPIRIT III(空间红外成像望远镜)载荷^[4]、新一代空间红外扫描传感器^[5]等。

IRST 系统不仅要具备遥感成像能力,还要实现目标搜索捕获,因此需要分析过采样体制对系统目标探测性能的影响。一般情况下,目标距离探测系统较远,可视为点目标。文献[6]对过采样扫描探测过程进行建模并仿真了点目标过采样图像。文献[7-8]对比分析了常规采样和过采样的点目标响应和背景抑制后杂波泄露问题,但未从整体上分析背景与目标综合情况下的系统目标检测性能。文献[9]从降低单帧检测虚警概率角度分析过采样的优点,但未考虑杂波对目标检测性能的影响。事实上,在 IRST 系统大范围扫描探测目标时,背景杂波对系统目标检测性能的影响往往起决定作用^[1,5,10-14]。

现有研究侧重于分析过采样的点目标响应特点,或仅分析背景抑制残差泄露单一问题,缺乏从整体上考虑过采样在多种因素综合影响下的系统目标探测性能的研究。为此,本文综合考虑强杂波、噪声(时间噪声和空间噪声)、目标响应等因素,通过仿真不同探测体制下的扫描图像并执行目标检测处理,对比分析常规采样和过采样体制对扫描系统目标探测性能的影响。

2 常规采样与过采样的扫描成像原理和特点

扫描相机使用长线列式焦平面对大范围区域进行遥感成像,通过扫描镜摆扫引导不同物空间光线依次进入线阵焦平面,使像元感光成像^[15-16]。常规采样的扫描线阵由单线列像元组成,如图 1 所示。每个像元对应相同的瞬时视场(IFOV),扫描时对应的物空间视场每移动一个瞬时视场间隔,线阵各像元即积分成像一次,通过连续扫描输出二维图像数据。

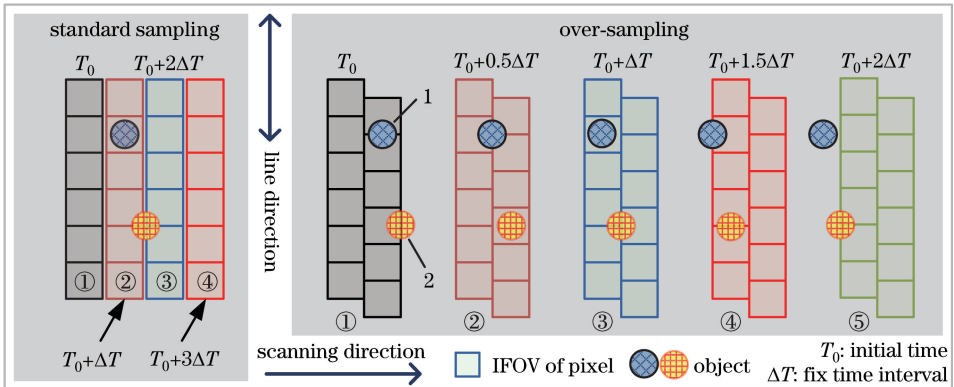


图 1 扫描相机探测成像原理

Fig. 1 Imaging principle of scanning camera

常规采样扫描系统对点目标成像时,由于光学系统点扩展效应,当目标投影偏离像元中心位置时将出现跨像元情况,导致目标能量分散,如图 1 目标 2 所示。为此,引入了时空双向过采样探测体制,不改变光学系统配置,采用两列线阵错开半个像元距离并排的焦平面结构(图 1),这种结构可以实现线列方向的空间过采样。扫描过程中,在扫描方向上每扫过半个瞬时视场间隔,双线列像元即积分成像一次,实现时间过采样。

与常规采样相比,过采样能提高目标点落入像元中心的概率(如目标 2,在第 2 个采样时刻其投影即落于过采样单个像元中心),从而提高目标的响应特性。通过时空双向过采样,将目标点能量以 4 倍的量扩散到邻近像元,使目标在像平面上的成像呈现斑点形状特性。双向过采样也使背景得到一定程度的平滑。

3 基于高分辨率图像退化的扫描图像仿真方法

扫描图像仿真是分析系统点目标检测性能的前提。以高分辨率图像模拟实际场景,针对常规采样和过采样体制的焦平面布局、积分时间,依次对其进行光学点扩展退化、像元离散采样、像元积分过程中的扫描运动模糊退化,最后加入乘性空间噪声和加性时间噪声完成扫描图像仿真。

3.1 光学点扩展模型

光学系统对光线的衍射效应使目标在像平面的响应扩散到邻近像元,描述这种模糊效应的概念是点扩

展函数(PSF)。假设点目标 i 在像平面的投影坐标为 (x_i, y_i) , 则 PSF 为^[17]

$$p(x, y) = 1/(2\pi\sigma_{\text{psf}}^2) \cdot \exp\{-[(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2]/(2\sigma_{\text{psf}}^2)\}, \quad (1)$$

式中 (x, y) 为像元中心坐标, σ_{psf} 为 PSF 标准差。

3.2 像元离散采样

像平面由多个具有相同尺寸的像元组成。不失一般性可假设像元为正方形, 且像元填充率为 100%, 每个像元宽度记为 d , 像元中心记为 (x_c, y_c) 。能量集中度 c_e 是与 σ_{psf} 密切相关的物理概念, 指目标点落于像元中心时, 该像元捕获到的目标能量百分比。 σ_{psf} 由 c_e 确定, 关系为^[17]

$$\sqrt{c_e} = 1/(\sqrt{2\pi}\sigma_{\text{psf}}) \cdot \int_{x-d/2}^{x+d/2} \exp[-(x - x_c)^2/(2\sigma_{\text{psf}}^2)] dx = \Phi[d/(2\sqrt{2}\sigma_{\text{psf}})], \quad (2)$$

$$\sigma_{\text{psf}} = d/(2\sqrt{2}\Phi^{-1}\sqrt{c_e}). \quad (3)$$

将 PSF 在像元上积分可以得到该像元对目标点的响应为

$$g(x_c, y_c) = \int_{x_c-d/2}^{x_c+d/2} \int_{y_c-d/2}^{y_c+d/2} p(x, y) dx dy. \quad (4)$$

3.3 积分时间内的扫描运动模糊

扫描相机在像元积分时间内因扫描镜连续摆扫而引起成像运动模糊, 模糊方向为扫描方向。通过光学点扩展和像元离散采样后的图像为 $g(x, y)$, 在积分时间 T_i 内扫描方向移动 a 个像元, 则运动模糊化后的图像为

$$f(x, y) = \int_0^{T_i} g(x - at/T_i, y) dt. \quad (5)$$

3.4 噪声效应

扫描图像噪声可分为空间噪声和时间噪声。前者由线列像元的非均匀性响应造成, 后者则为相机探测器不同器件引入。扫描方向上的每列图像数据由相同像元感光获得, 线列不同像元感光响应的不一致, 形成扫描图像中的条带状空间噪声。时间噪声则包括热噪声、 $1/f$ 噪声、产生复合噪声、散弹噪声和暗电流噪声等^[15]。空间噪声和时间噪声均采用高斯模型。

考虑噪声效应后的扫描仿真图像为

$$\tilde{f}(x_i, y_i) = f(x_i, y_i) \cdot \beta(x_i) + n(x_i, y_i), \quad (6)$$

$$\beta(x_i) \sim \mathbf{N}(1, \sigma_\beta^2), \quad (7)$$

$$n(x_i, y_i) \sim \mathbf{N}(0, \sigma_n^2), \quad (8)$$

式中 σ_β 和 σ_n 分别为非均匀响应和噪声模型的标准差, $\beta(x_i)$ 为第 i 个像元的非均匀响应因子, 服从均值为 1、方差为 σ_β^2 的高斯分布。各像元的噪声独立, 服从均值为 0、方差为 σ_n^2 的高斯分布。

3.5 扫描图像仿真流程

图 2 为基于上述退化模型与方法的扫描图像仿真流程。以高分辨率图像作为模拟场景, 每个像素映射到实际地理区域, 对每个像素点分别进行退化。根据不同探测体制的焦平面结构, 计算每个高分辨像素点对应地理区域在动态扫描图像中的投影坐标, 进而计算点扩展和像元离散采样值。将所有高分辨像素点的计算结果叠加形成扫描初样图像。点目标的扫描成像退化与上述流程一致, 计算结果叠加到扫描初样图像中。对背景与目标合成的初样图像进行运动模糊模拟和噪声特性模拟, 输出扫描仿真图像。

常规采样和过采样扫描图像的仿真流程一致, 不同之处在于探测体制的焦平面结构、扫描采样间隔和时间噪声特性等。

4 不同探测体制下的点目标检测性能仿真分析

基于第 3 节的仿真模型和方法, 仿真验证过采样目标响应特性, 通过对大量扫描仿真图像进行单帧检测处理, 对比分析常规采样和过采样的点目标检测性能。

4.1 目标响应特性仿真分析

假定相机能量集中度为 80%, 对图 1 中的目标 2 进行常规采样和过采样成像处理(仅考虑光学点扩展

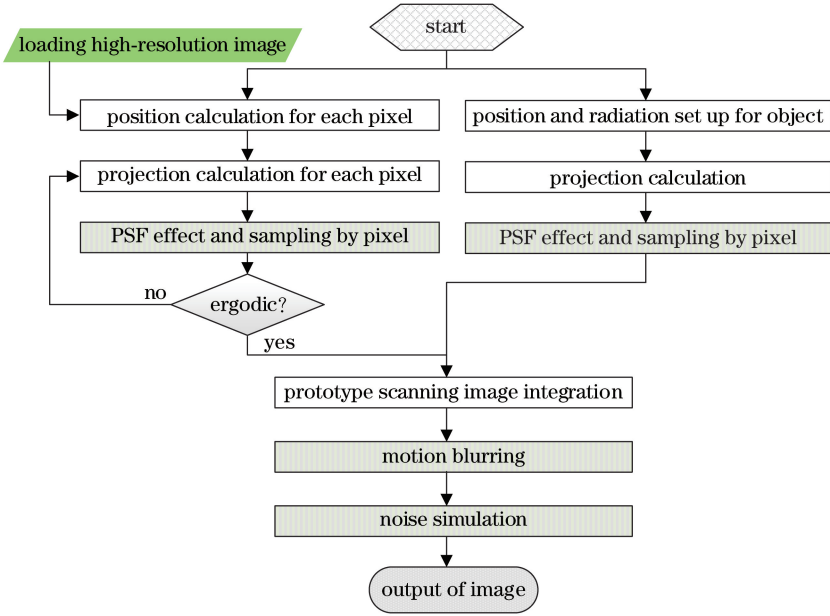


图 2 扫描图像仿真流程

Fig. 2 Flow chart of scanning image simulation

和离散采样)。图 3 为目标 2(能量幅值为 100)成像区域局部像元捕获的能量分布。

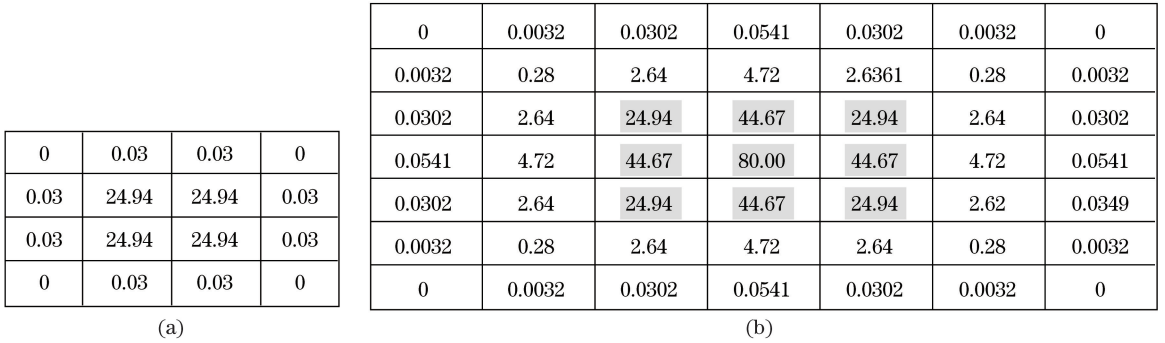


图 3 不同采样体制下目标 2 的离散采样能量分布。(a) 常规采样;(b) 过采样

Fig. 3 Sampling energy distribution of the 2nd object for different sampling methods. (a) Standard sampling; (b) over-sampling

常规采样时目标 2 投影落于 4 个像元对称中心,导致能量分散、最大像元响应为 24.94。而过采样能确保目标 2 的投影落于单个像元内,最大像元响应为 80,且明显具有 3×3 点斑形状。仿真结果验证了第 2 节理论分析结果。

进一步对处于不同投影位置的目标点(1000 个点,能量幅值为 100)进行过采样处理,统计最大响应点的均值和标准差(STD),结果如表 1 所示。

表 1 不同采样体制下的点目标响应统计结果

Table 1 Statistical results of point target response for different sampling schemes

Detection scheme	Mean of maximum response	STD of maximum response
Standard sampling	56.2882	12.4817
Over-sampling	73.2826	4.1918

与常规采样相比,过采样点目标响应均值提高 30%,标准差降低 66.4%。过采样确实提高了点目标响应性能,能稳定捕获大部分目标能量,与文献[8-9]结论类似。

4.2 点目标检测性能仿真分析

IRST 系统为降低通信数据量,提高处理速度,一般先对扫描图像进行单帧背景抑制、门限检测提取备选目标点,然后通过多帧关联方法捕获跟踪目标^[9-10]。因此,扫描图像单帧目标检测是影响整个系统探测性

能的关键要素。

仿真采用 5×5 中值滤波方法执行背景估计和抑制,对抑制后的残差图像采用自适应恒虚警门限方法检测目标,如

$$\hat{B}(x_i, y_i) = \text{media} \{ \tilde{f}(x_u, y_v) \}_{u=i-2, i-1, i, i+1, i+2}^{v=j-2, j-1, j, j+1, j+2}, \quad (9)$$

$$S(x_i, y_i) = \tilde{f}(x_i, y_i) - \hat{B}(x_i, y_i), \quad (10)$$

$$T_{ij} = \mu_{ij} - \sigma_{ij} \cdot \Phi^{-1}(p_f), \quad (11)$$

$$S(x_i, y_i) = \begin{cases} \text{target}, & \text{if } S(x_i, y_i) \geq T_{ij} \\ \text{clutter or noise}, & \text{if } S(x_i, y_i) < T_{ij} \end{cases}, \quad (12)$$

式中 T_{ij} 为门限值, μ_{ij} 和 σ_{ij} 分别为基于残差图像计算的局部均值和标准差, p_f 为单帧虚警概率。

4.2.1 仿真输入参数

两种采样体制的光学系统参数一致,探测器按图 1 方式排列,像元瞬时视场一致。常规采样像元扫描方向上每隔一个瞬时视场积分采样一次,过采样系统的采样间隔为常规采样的一半。

仅分析强杂波和弱小目标条件下的目标检测性能。图 4 为短波红外高分辨图像^[11],是典型的起伏激烈强杂波背景。由于过采样探测器扫描采样间隔为常规采样的 $1/2$,像元积分时间减半,所以其噪声等效辐射强度为常规采样的 $\sqrt{2}$ 倍。

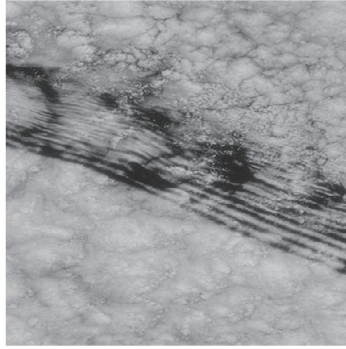


图 4 高分辨率背景图像

Fig. 4 High-resolution background image

4.2.2 仿真结果与分析

执行 1000 次蒙特卡罗仿真。在每次仿真中,在任意位置添加单个目标,生成扫描图像并进行目标检测,门限值分别取 1×10^{-6} 、 5×10^{-6} 、 1×10^{-5} 、 5×10^{-5} 、 1×10^{-4} 、 5×10^{-4} 、 1×10^{-3} 、 5×10^{-3} 、 1×10^{-2} 。

1) 单次仿真结果与分析

图 5 为单次仿真结果。常规采样扫描图像分辨率低、方块效应明显,背景抑制后目标能量集中在单个像元内,呈现 1×1 型态,与噪声点和杂波残差点相似、易混淆。过采样扫描图像清晰、分辨率高,目标点在扫描成像和抑制后的残差图像中,均具有明显斑点形状,与背景的区别度高,有利于目标检出。

2) 蒙特卡罗仿真结果与分析

统计 1000 次蒙特卡罗仿真结果,图 6 为两种情况下的目标检测概率与虚警概率工作曲线。可以看出过采样系统的目标检测性能优于常规采样。进一步统计仿真结果发现:过采样体制的残差背景中目标呈现斑点状,而常规采样虚警率较高,残差背景中目标一般呈现 1×1 点状。

过采样形成的目标斑点状形态隐含有目标特有信息,有望用于进一步剔除虚警。为此,依据图 6 性能曲线,将过采样系统的单帧检测门限值提高到 8×10^{-3} ,对各次仿真得到的备选目标进行形状检验空间相关处理,统计结果中检测概率为 97.2%,虚警概率为 1.1×10^{-4} ,系统的点目标检测性能得到了显著提升。

5 结 论

针对过采样体制在IRST系统方面的应用需求,从原理上分析过采样优于常规采样的特点,进而建立扫

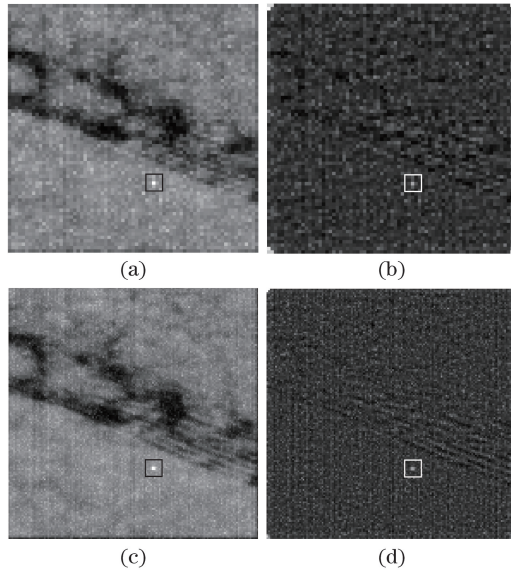


图 5 单次仿真结果。(a) 常规采样扫描图像；(b) 常规采样背景抑制图像；(c) 过采样扫描图像；(d) 过采样背景抑制图像
Fig. 5 Results of once simulation. (a) Scanning image of standard sampling; (b) suppression image of standard sampling; (c) scanning image of over-sampling; (d) suppression image of over-sampling

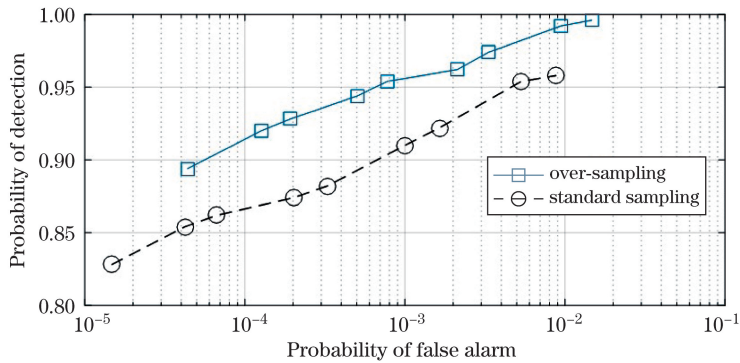


图 6 不同采样体制下的点目标检测性能曲线

Fig. 6 Curves of point target detection performance for different sampling schemes

描图像仿真模型。通过不同采样体制下的扫描图像仿真和点目标检测处理,对比分析过采样和常规采样系统的目标检测性能。结果表明,过采样的系统点目标检测性能优于常规采样。若进一步利用过采样形成的目标斑点特性可抑制大量虚警,并显著提升系统探测性能。在后续工作中,将针对过采样形成的目标斑点,研究过采样系统高检测率、低虚警率单帧目标检测算法以及目标高精度亚像元图像定位技术。

参 考 文 献

- 1 Latry C, Rouge B. In-flight commissioning of SPOT5 THE quincunx sampling mode[C]. SPIE, 2003, 4881: 189-199.
- 2 Zhou Jinghong, Zhou Cui, Zhu Jianjun, *et al.*. A method of super-resolution reconstruction for remote sensing image based on non-subsampled contourlet transform[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1): 0110001.
周靖鸿,周 蕊,朱建军,等. 基于非下采样轮廓波变换遥感影像超分辨重建方法[J]. 光学学报, 2015, 35(1): 0110001.
- 3 Chen Jian, Gao Huibin, Wang Weiguo, *et al.*. Methods and applications of image super-resolution restoration[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(2): 020004.
陈 健,高慧斌,王伟国,等. 图像超分辨率复原方法及应用[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(2): 020004.
- 4 Larsen M F, Tansock J J, Sorenson G, *et al.*. Impact of the SPIRIT III sensor design on algorithm for background removal, object detection, and point source extraction[C]. SPIE, 1996, 2759: 194-204.
- 5 Lomheim T S, Milne E L, Kwok J D, *et al.*. Performance/sizing relationships for a short-wave/mid-wave infrared scanning point-source detection space sensor[C]. IEEE Aerospace Conference, 1999: 113-138.

- 6 Dong Yucui, Su Xiaofeng, Lin Jianchun, *et al.*. Performance simulation of temporal-spatial oversampling system[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(3): 565-568.
董玉翠, 苏晓锋, 林剑春, 等. 时空过采样探测系统性能仿真[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(3): 565-568.
- 7 Yao Peng, Wang Chengliang, Hu Shengmin, *et al.*. Performance comparison of normal sampling and oversampling for point target detection[J]. Infrared, 2013, 34(8): 6-10.
饶 鹏, 王成良, 胡胜敏, 等. 常规采样与过采样点目标检测性能比较分析[J]. 红外, 2013, 34(8): 6-10.
- 8 Lawrie D G, Lomheim T S. Advanced electro-optical space-based systems for missile surveillance[R]. Aerospace Corporation, 2001.
- 9 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, 32(1): 68-72.
王世涛, 张 伟, 金丽花, 等. 基于时一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, 32(1): 68-72.
- 10 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.
- 11 Tartakovsky A G, Brown A P, Brown J. Enhanced algorithms for EOIR electronic stabilization, clutter suppression, and track-before-detect for multiple low observable targets[C]. Proceedings of the 10th Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, 2009.
- 12 Li Andong, Lin Zaiping, An Wei, *et al.*. Infrared small target detection in compressive domain based on self-adaptive parameter configuration[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(10): 1008003.
李安东, 林再平, 安 玮, 等. 基于自适应改进的压缩域红外弱小目标检测[J]. 中国激光, 2015, 42(10): 1008003.
- 13 Yang Linna, An Wei, Lin Zaiping, *et al.*. Small target detection based on visual saliency improved by spatial distance[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(7): 0715004.
杨林娜, 安 玮, 林再平, 等. 基于空间距离改进的视觉显著性弱小目标检测[J]. 光学学报, 2015, 35(7): 0715004.
- 14 Chen Yin, Ren Kan, Gu Guohua, *et al.*. Moving object detection based on improved single Gaussian background model [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(11): 1109002.
陈 银, 任 侃, 顾国华, 等. 基于改进的单高斯背景模型运动目标检测算法[J]. 中国激光, 2014, 41(11): 1109002.
- 15 Zhou Shichun. Introduction to advanced infrared photoelectric engineering[M]. Beijing: Science Press, 2014.
周世椿. 高级红外光电工程导论[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- 16 Schowengerdt R A. Remote sensing: Models and methods for image processing[M]. Amsterdam: Elsevier, 2007.
- 17 Macumber D, Gadaleta S, Floyd A, *et al.*. Hierarchical closely-spaced objects (CSO) resolution for IR sensor surveillance[C]. SPIE, 2005, 5913: 591304.