

过采样扫描探测性能对比分析

王铁兵*, 李淼, 林再平, 安玮, 周一宇
(国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:分析了单采样和过采样两种扫描探测体制的成像原理,并建立了扫描图像仿真模型.在不同云层杂波场景下从目标能量收集、背景杂波抑制和弱小目标检测三个方面对单采样和过采样扫描图像进行了对比分析.理论分析和仿真结果表明:过采样扫描探测体制更有利于收集目标能量,杂波抑制能力较优,对弱小目标的探测能力更强.

关键词:扫描系统;过采样;杂波抑制;目标检测

中图分类号:TN957.51 文献标识码:A

Comparative Performance Analysis of Over-Sampling Scanning

WANG Tie-Bing*, LI Miao, LIN Zai-Ping, AN Wei, ZHOU Yi-Yu

(College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Based on the analysis of the scanning procedure of single-sampling and over-sampling systems, we proposed a novel scanning image simulation method. The target energy gathering, clutter suppression, and dim target detection of single and over-sampling systems were performed in 3 different scenes, mild-cloudy, severe-cloudy, and cirrus-cloudy. Analysis and experiments indicate that over-sampling system has better performance at target energy gathering, clutter suppression, and dim target detection.

Key words: scanning system, over-sampling, clutter suppression, target detection

PACS: 42.30. Va

引言

天基红外监视系统利用扫描型传感器对所监视区域进行实时、连续扫描成像,通过探测助推段导弹尾焰的红外辐射信号,对导弹等目标进行早期发现与跟踪.扫描型探测器具有视场宽、覆盖范围大的特点,是天基红外监视系统的重要组成部分^[1-2].对远距离目标微弱信号的探测能力是决定扫描型传感器性能的关键.

感光线阵是扫描型传感器的重要器件之一,其感光元尺寸直接决定了扫描相机的瞬时视场(Instantaneous Field Of View, IFOV)和空间分辨率^[3],进而影响对微弱点目标信号的探测能力.在不改变感光元尺寸和光学系统的前提下,过采样(Over-Sampling)排列的感光线阵设计形式可以同时减小瞬时视场和提高空间分辨率^[4-5],美国天基红外监视

系统中扫描传感器即采用了过采样的设计模式^[6].文献[5]从对点目标检测和抗虚警性能方面分析了过采样系统的优势;文献[6]从系统设计的角度给出了过采样扫描系统的优势与弊端;文献[7]从匹配滤波的角度设计了一种适合过采样体制的目标检测算法.

天基红外扫描传感器的首要任务是从复杂的背景杂波中探测微弱的目标辐射信号,本文着重从目标能量收集和背景杂波抑制方面对过采样扫描探测体制进行对比分析.首先分析了单采样(Single-Sampling)和过采样排列形式感光线阵的扫描成像原理,并建立了扫描成像系统的数学模型及相应的图像仿真方法;然后在特定背景杂波场景下进行单采样和过采样扫描成像仿真,从目标能量收集、背景杂波抑制、弱小目标检测性能三个方面对比分析了两种扫描探测体制的特点;最后给出分析结论.

收稿日期:2014-07-08,修回日期:2014-10-05

基金项目:十二国防预研基金项目(113010203)

Foundation items: Supported by the "Twelve-Fifth" National Defense Advanced Research Foundation Of China(113010203)

作者简介(Biography):王铁兵(1986-),男,河北冀州人,博士研究生,主要研究领域为空间信息获取与处理.

* 通讯作者(Corresponding author);E-mail: wangtiebing117@126.com

Received date: 2014-07-08, revised date: 2014-10-05

1 扫描探测体制分析

1.1 单采样、过采样扫描成像原理

单采样扫描感光线阵由一行整齐排列的感光元组成,如图 1(a),每个感光元对应一定的瞬时视场角.在进行扫描成像时,通过转动扫描摆镜,使感光线阵对应的空间视场在垂直于线阵方向上(即扫描方向)上下移动.空间视场每移动一个单位 IFOV 时,完成一次曝光成像,输出一行图像数据.图 1(b)给出了单采样扫描探测器对点目标的成像过程,由

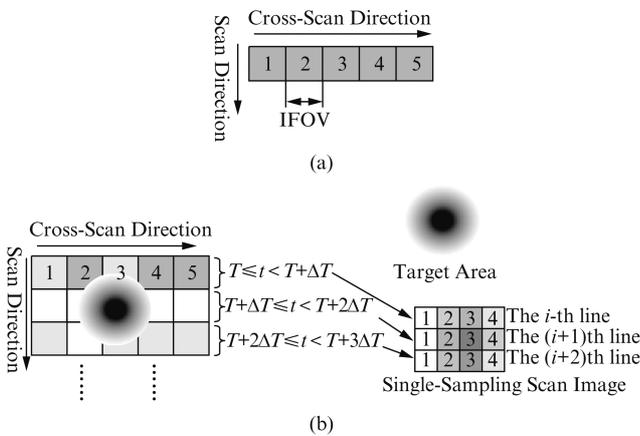


图 1 单采样扫描探测原理图
Fig. 1 Structure of single-sampling scan system

该成像过程可知,单采样扫描图像是对空间均匀采样成像的结果.

与单采样不同,过采样扫描探测体制下感光线阵结构如图 2(a)所示,其奇、偶数感光元分为两行排列.奇偶行感光线阵内部相邻感光元紧密相邻,奇偶行在垂直扫描方向上错开半像元宽度.在进行扫描成像时,空间视场在扫描方向上每移动 0.5 个单位 IFOV 时,完成一次曝光成像.由于过采样扫描探测线阵特殊的排列方式,在每次曝光成像时需要利用读出电路数据延迟技术将图像数据按照空间位置关系拼接成一幅整齐图像.仍以对点目标扫描成像为例,过采样扫描过程如图 2(b)所示.

过采样扫描图像在扫描和垂直扫描方向上均是对空间场景的两倍过采样.垂直扫描方向上的空间过采样:通过感光线阵奇偶行错开排列,图像中任意左右相邻像元对应的空间范围重叠半个像元宽度;扫描方向上的时间过采样:通过控制曝光成像时间,在每扫描半个单位 IFOV 时完成一次,图像中任意相邻两行之间重叠半个像元宽度.因此上述过采样探测体制又称“时-空双向过采样”^[5],简称过采样.

1.2 单采样、过采样扫描图像仿真方法

图像仿真是对其进行性能分析的前提与基础.

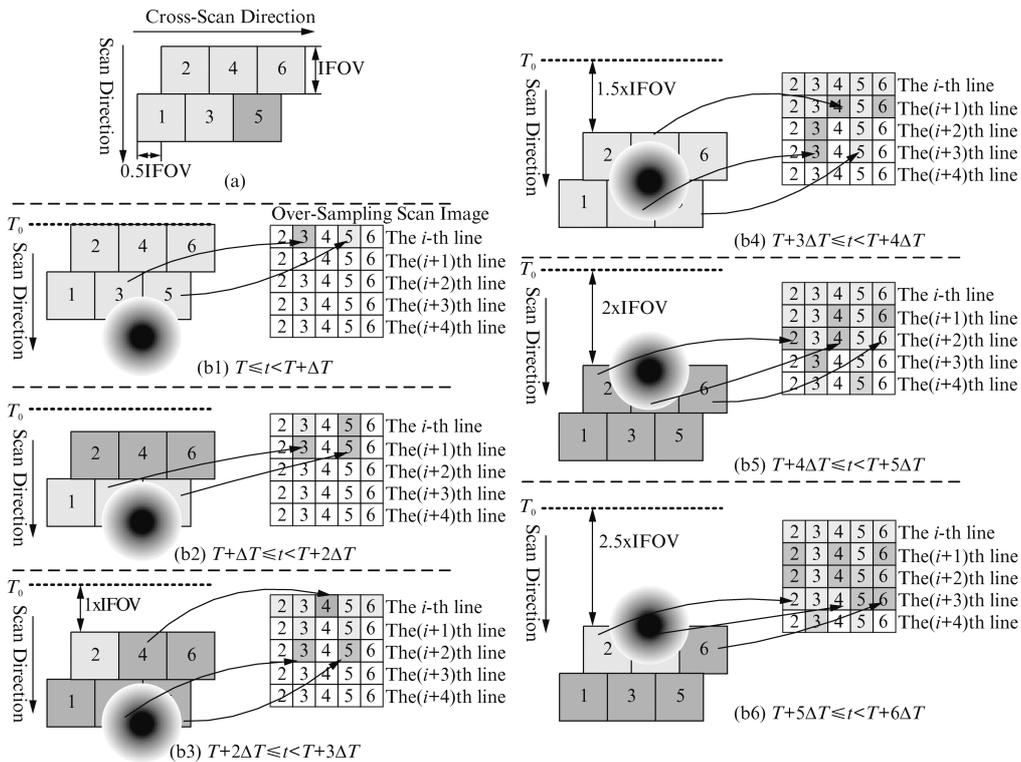


图 2 过采样扫描探测原理图. (a) 线阵结构, (b1-b6) 成像原理
Fig. 2 Scanning procedure of over-sampling system, (a) structure of line-array and (b) Imaging procedure

本节根据单采样和过采样扫描成像的原理,给出相应的图像仿真模型,主要包括:滑动积分成像模型、点目标成像模型、扫描非均匀性模型。

(A) 滑动积分成像模型

由于扫描型探测器特殊的“边扫描边成像”的工作方式,其每个像素均是感光元对一定区域活动滑动扫描积分成像的结果,表现为扫描方向上的图像模糊。采用如图 3 中的仿真方法,在一幅高分辨率 (IFOV/N) 场景图像上进行仿真,将每个像素的成像过程细分为 N 步实现。假设像素 (i, j) 第 k 步的成像结果为 $B(i, j, k)$, 则该像素最终的图像数据为

$$B(i, j) = \sum_{k=1}^N B(i, j, k) \quad (1)$$

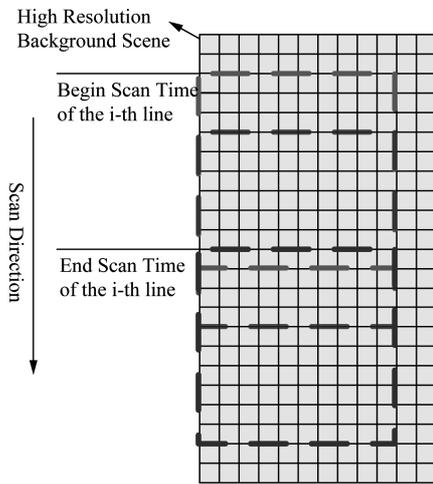


图 3 扫描图像滑动积分过程示意图
Fig. 3 Slide-and-integration of scan image

(B) 点目标成像模型

在天基红外监视系统中,一般情况下探测器距离目标非常遥远,导弹目标通常表现为一个点。由于探测器光学系统的点扩散 (Point Spread Function, PSF) 效应,目标能量分布在以投影中心位置的周围几个像素中。采用文献[8]中的高斯 PSF 模型:

$$h(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_{psf}^2} \int_{x-\frac{1}{2}\gamma-\frac{1}{2}}^{x+\frac{1}{2}\gamma+\frac{1}{2}} \int_{y-\frac{1}{2}\gamma-\frac{1}{2}}^{y+\frac{1}{2}\gamma+\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{2\sigma_{psf}^2}\right) dx dy \quad (2)$$

上式中 (x_0, y_0) 为像面上目标投影中心的位置, σ_{psf} 为描述目标能量扩散度的参数 (又称 PSF 半径), σ_{psf} 越大,目标能量分布越分散,反之分布越集中。 σ_{psf} 大小通常由光学系统制造工艺水平决定。

(C) 扫描非均匀性模型

在扫描图像中每一列数据 (扫描方向上) 均是由同一感光元成像的结果,由于各感光元之间的差

异性,在扫描图像中会形成明显的条带状噪声。本文采用高斯非均匀性模型,如下式 3:

$$\tilde{B}(i, j) = B(i, j) \cdot K(j) \quad (3)$$

式中 $K(j) \sim N(1, \sigma_E^2)$ 为均值为 1, 方差为 σ_E^2 的高斯随机变量, σ_E^2 称为非均匀性因子。 $\tilde{B}(i, j)$ 为最终的扫描图像。

2 过采样扫描图像性能分析

2.1 目标能量收集性能分析

为了便于对比分析两种扫描体制对点目标能量的收集作用,定义图像中目标投影中心位置所在的像元为目标主像元。由于时空两倍过采样作用,在过采样图像中会有四个像元包含目标中心投影 (见图 2b), 定义中心点距离目标投影位置最近的像元为目标主像元。仿真分析中的相机口径、积分时间、噪声等参数均相同。

根据 1.2 节中的高斯 PSF 模型,积分计算目标投影中心位于不同位置时目标主像元接收的目标能量比例。当 PSF 半径 σ_{psf} 为 0.4 IFOV 时,目标投影中心从主像元一角 $(i-0.5, j-0.5)$ 移动到对角 $(i+0.5, j+0.5)$ 过程中,目标主像元接收到的目标能量比例如图 4, 可见在目标恰好位于像元中心和边缘两种极限情况下,目标主像元能量相差近 40%。而由图 2(b) 中过采样成像过程可知,在上述移动过程中,目标距离过采样图像中主像元中心的距离在 ± 0.25 像元间变化,因此在过采样图像中目标主像元的能量更高,更加稳定,如图 4。

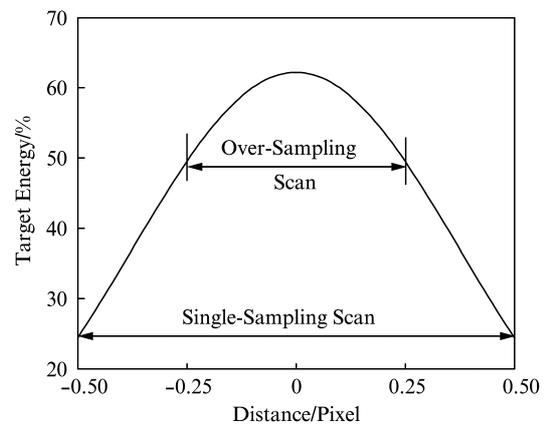


图 4 目标主像元能量百分比
Fig. 4 Energy ratio of target-main-pixel

下面对单采样和过采样两种扫描探测体制进行数值仿真,比较三种规格扫描图像: $40 \mu\text{rad}$ IFOV 的单采样图像 (记为 Img1), $40 \mu\text{rad}$ IFOV 的过采样

图像(记为 Img2) 和 $80 \mu\text{rad}$ IFOV 的过采样图像(记为 Img3). 在仿真背景底图中随机位置添加 100 个能量分布互不交叉的目标, PSF 扩散半径设为 $16\mu\text{rad}$ (即 $0.4 \text{ IFOV}@40 \mu\text{rad}$). 在目标主像元所在 3×3 邻域共 9 个像元中, 分别比较目标主像元(记为 I 类主像元)、前两个极大值(记为 II 类主像元)、前四个极大值(记为 IV 类主像元)的均值、方差情况, 并以 I 类主像元能量进行归一化比较, 结果见表 1. 由仿真结果可见, 相同感光元尺寸下过采样图像中目标能量均值较高, 起伏较小, 目标能量更加稳定, 验证了上述理论分析结果.

表 1 目标能量分布特性

Table 1 Target energy distribution features of 3 different systems

		$\text{Img2}/\text{Img1}$	$\text{Img3}/\text{Img1}$
均值 比较	I 类主像元	1.25	2.01
	II 类主像元	1.49	2.40
	IV 类主像元	2.01	3.06
方差 比较	I 类主像元	0.38	0.76
	II 类主像元	0.41	0.83
	IV 类主像元	0.52	1.15

2.2 背景杂波抑制性能

在三种特定云层杂波背景下, 仍对三种规格扫描图像进行仿真, 比较不同扫描体制对云层杂波的抑制性能. 三种典型场景如图 5^[9]: 少云场景(强度低、起伏平缓)、多云场景(强度较高、具有一定起

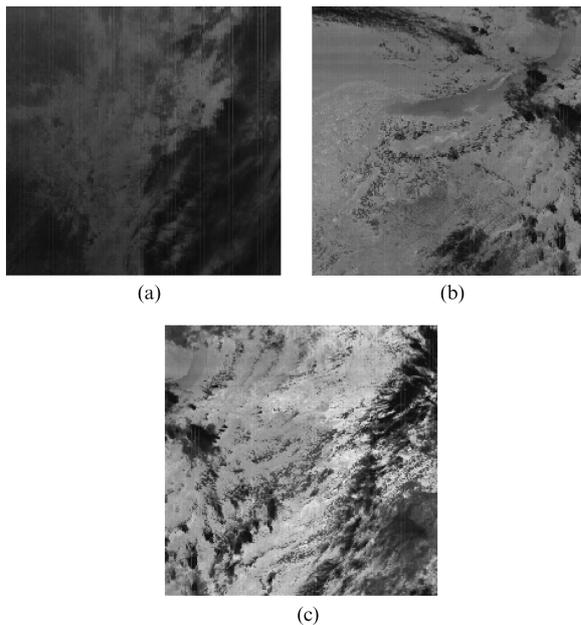


图 5 典型云层杂波背景图像 (a) 少云场景 (b) 多云场景, (c) 卷云场景

Fig. 5 Typical Clutter Scenes

伏)、卷云场景(强度高、起伏剧烈), 扫描非均匀性 σ_e^2 均设为 3%. 在扫描方向上, 采用如式 4 中的 $7 \times 1 - 3 \times 1$ 单维环形中值滤波进行背景杂波抑制. 比较各场景的杂波抑制比 $\eta = \sigma_s / \sigma_o$, 其中 σ_o 和 σ_s 分别表示原始图像和杂波抑制后残差图像的平均杂波起伏强度 (W/Sr), 仿真结果见表 2.

$$\hat{B}(i, j) = \bar{B}(i, j) - M(i, j) \quad , \quad (4)$$

$$M(i, j) = \text{median}\{\bar{B}(i-3, j), \bar{B}(i-2, j),$$

$$\bar{B}(i, j), \bar{B}(i+2, j), \bar{B}(i+3, j)\} \quad , \quad (5)$$

表 2 不同场景下的杂波抑制比

Table 2 Clutter-Suppression-Ratio of different scenes

	少云场景			多云场景			卷云场景		
	σ_o	σ_s	η	σ_o	σ_s	η	σ_o	σ_s	η
Img1	3 849	3 003	0.78	9 499	7 028	0.74	14 574	10 640	0.73
Img2	3 275	2 357	0.72	8 644	5 877	0.68	11 410	7 188	0.63
Img3	14 840	8 606	0.58	35 312	19 774	0.56	50 459	27 248	0.54

从上述仿真结果可见, 在相同 IFOV 条件下, 同一背景下过采样图像杂波起伏强度稍小, 这是由于过采样本质上是对背景进行了均匀化处理; 在多云和卷云杂波背景下 (σ_o 较大), 过采样图像显示出的更优的杂波抑制性能 (η 变小). 扩大 IFOV 后, 过采样图像杂波会变大 (σ_o, σ_s 增加), 但采用相同抑制算法后, 过采样图像杂波抑制性能更明显 (η 较小), 表明过采样探测体制具有较优的杂波抑制性能.

2.3 目标检测性能

在对比分析了目标能量收集性能、背景杂波抑制性能之后, 下面对两种扫描探测体制的目标检测性能进行对比分析. 分析过程如下: 首先在上节中高分辨率背景底图中随机位置添加 100 个能量相同且分布互不交互的弱小目标, 并据此仿真生成 $40 \mu\text{rad}$ 单采样、 $40 \mu\text{rad}$ 过采样和 $80 \mu\text{rad}$ 过采样三种规格的扫描图像 (PSF 扩散半径仍为 0.4 IFOV , 扫描非均匀性 σ_e^2 为 3%, 相机口径、积分时间、噪声等其他参数均相同); 然后按照 2.2 节中的方法进行背景杂波抑制; 最后进行恒虚警目标检测: 根据设置的虚警率 P_f , 或称过门限率 (Probability of False Exceedance, PFE), 按照式 6 计算检测门限阈值 Th :

$$\hat{B}(i, j) \begin{matrix} > \\ < \end{matrix} \begin{matrix} (i, j) \text{ is a target} \\ (i, j) \text{ is not a target} \end{matrix} Th(i, j) \quad . \quad (6)$$

由仿真结果拟合得到的三种规格扫描图像的虚警率与检测概率 (Probability of Detection, POD) 的曲线如下图 (6). 由该结果可见: IFOV 相同时, 在多

云和卷云背景下过采样体制目标检测性能均优于单采样,在少云场景下两者性能相当,表明过采样扫描探测体制更有利于杂波条件下的弱小目标检测。

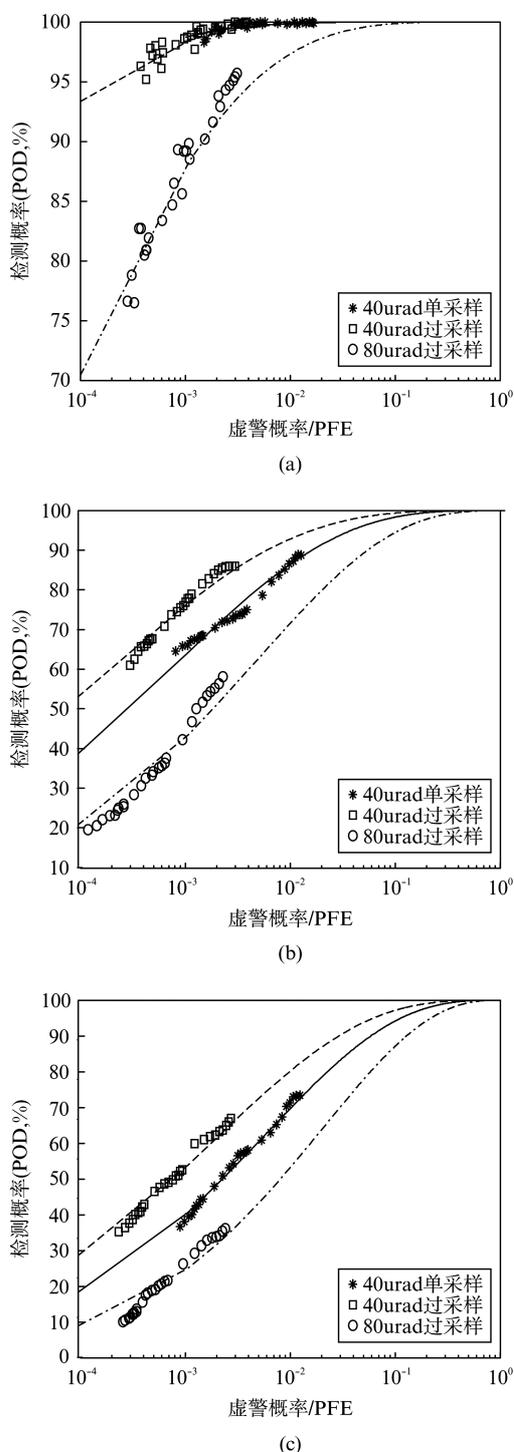


图6 检测概率与虚警率关系曲线(a)少云场景 (b)多云场景 (c)卷云场景

Fig. 6 POD versus PFE at different scenes, (a) mild-cloudy scene, (b) severe-cloudy scene, and (c) cirrus-cloudy scene

3 结论

针对天基红外扫描传感器的单采样和过采样两种探测体制,在详细分析其成像原理的基础上给出了扫描图像仿真模型,并在少云、多云、卷云三种特定场景下进行了仿真分析.从目标能量收集、背景杂波抑制和弱小目标检测性能等方面对三种规格的单采样、过采样扫描图像进行对比分析,理论计算与仿真结果表明:过采样扫描探测体制更有利于收集目标能量,杂波抑制能力较优,对弱小目标的探测能力更强。

References

- [1] Status of the Space Based Infrared System Program [R]. Washington, DC: Office of the Secretary of Defense, 2005.
- [2] David R. Tanks. National Missile Defense: Policy Issues and Technological Capabilities [R]. USA: Svec Conway Printing, Inc, 2000.
- [3] Dong Yu-cui, Su Xiao-feng, Lin Jian-chun, *et al.* Performance simulation of temporal-spatial oversampling system [J]. *High power laser and particle beams*. (董玉翠,苏效锋,林剑春,等.时空过采样探测系统性能仿真. *强激光与粒子束*), 2013, **25**(3): 565-568.
- [4] Li Zhen-zhen, Chen Fan-sheng. Design of MW Line Array Infrared Oversampling Detection System in Space [J]. *Infrared Technology*. (李真真,陈凡胜.空间中波红外线列过采样探测系统设计. *红外技术*), 2012, **34**(12): 709-716.
- [5] Wang Shi-tao, Zhang Wei, Jin Li-hua, *et al.* Point target detection based on Temporal-Spatial Over-Sampling system [J]. *J. Infrared Millim. Waves*. (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. *红外与毫米波学报*), 2013, **32**(1): 68-72.
- [6] Stephen A, Cota L S K R. Infrared sensor modeling for improved system design [J]. SPIE, 1980. 2743.
- [7] Zhang Wei, Meng Xiang-long, Cong Ming-yi, *et al.* Algorithm of space point target detection for IR scan images [J]. *Infrared and Laser Engineering*. (张伟,孟祥龙,丛明煜,等.天基红外扫描图像点目标检测算法. *红外与激光工程*), 2009, **38**(5): 921-925.
- [8] Lin Liang-kui. Tracking and Super-resolution for Midcourse Ballistic Target Complex via Space-based Infrared Sensors [D]. Graduate School of National University of Defense Technology, ChangSha, (林两魁.天基红外传感器对中段弹道目标群的跟踪与超分辨率技术研究[D].长沙:国防科学技术大学研究生院), 2011.
- [9] Zhao Cheng, Tianxu Zhang, Luxin Yan. Clutter suppression algorithm based on bidirectional local binary pattern for moving point target detection in infrared image sequences [J]. *Optical engineering*, 2010, **49**(10): 1-8.