

## 不同采样体制对点目标的定量检测性能影响

刘丰轶<sup>1,2,3</sup>, 胡勇<sup>1,2\*</sup>, 饶鹏<sup>1,2</sup>, 匡定波<sup>1,2</sup>, 巩彩兰<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;

2. 中国科学院红外探测与成像技术重点实验室(中国科学院上海技术物理研究所), 上海 200083;

3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 围绕单采样和过采样扫描探测体制下的点目标定量检测性能, 基于亚像元的采样模型, 建立了一定分辨率条件下探测不同高度、尺寸目标的成像链路仿真模型, 从目标信号采集能力、背景及杂波水平影响、检测能力和测量特性四个方面对比分析了相同瞬时视场的单采样、过采样以及两倍瞬时视场的过采样三种规格采样体制的目标检测性能。分析结果表明: 相同瞬时视场的过采样比单采样更有利于目标信号的采集, 检测能力更强, 两倍瞬时视场的过采样对目标信号有抑制作用, 不利于低信杂比情况下的目标探测; 两种规格的过采样对背景信号及杂波均有抑制作用; 两种规格的过采样对目标辐射强度都有明显的过采集误差, 必须进行修正。

**关键词:** 扫描系统; 过采样; 点目标; 采样模型; 定量检测

**中图分类号:** TN216; TP391.9 **文献标识码:** A

## Quantitative detection of point target with different sampling systems

LIU Feng-Yi<sup>1,2,3</sup>, HU Yong<sup>1,2\*</sup>, RAO Peng<sup>1,2</sup>, KUANG Ding-Bo<sup>1,2</sup>, GONG Cai-Lan<sup>1,2</sup>

(1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. CAS Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technology,  
Shanghai Institute of Technical Physics, Shanghai 200083, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** This paper focuses on quantitative detection performance for point target with single-sampling and over-sampling systems. An imaging chain simulation model based on the sampling model of sub-pixel is presented, which depicts detection for targets with various heights and sizes under given resolution conditions. Single-sampling and over-sampling with the same IFOV, over-sampling of two times IFOV were taken into account. Performance of the three sampling systems was compared and analyzed from the following four aspects: target signal's acquisition capability, background signal and clutter level, detectability and measurement characteristics. Results show that over-sampling of the same IFOV is conducive to the acquisition of the target signal and has better detectability, while that of two times IFOV suppresses target signal and goes against detecting target with low SCR. The over-sampling has inhibitory effect on background signal and clutter while collects apparently superfluous radiation intensity that has to be corrected.

**Key words:** scanning system, over-sampling, point target, sampling model, quantitative detection

**PACS:** 07.57.Kp

收稿日期: 2016-09-12, 修回日期: 2017-04-27

Received date: 2016-09-12, revised date: 2017-04-27

基金项目: 装备预先研究项目(30502030101); 中国科学院上海技术物理研究所创新专项(CX-5)

**Foundation items:** Supported by the Equipment Advanced Research Project (30502030101), and the Special Fund of Innovation Project of Shanghai Institute of Technical Physics, CAS (CX-5)

作者简介(**Biography**): 刘丰轶(1990-), 男, 湖北武汉人, 博士研究生, 主要研究方向为红外目标检测及信息处理. E-mail: lfyys@outlook.com

\* 通讯作者(**Corresponding author**): E-mail: huyong@mail.sitp.ac.cn

## 引言

星载红外目标探测系统已成为空间目标搜索的重要途径<sup>[1]</sup>,其关键技术之一是点目标检测和轨迹跟踪,其中点目标的单帧检测能力是及时发现目标的关键.红外系统对点目标的探测能力除了与数据处理算法相关,还与遥感器光学系统、探测器、电路元件、探测体制等部件设计有关.对于扫描型线列探测器,过采样体制能有效提高目标的检测性能<sup>[2-5]</sup>.文献[2]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了单采样、过采样这两种扫描探测体制的特点;文献[3]从图像信噪比需求以及抗虚警方面分析了过采样体制的优势;文献[4]对点目标的成像过程进行了建模及仿真,分析和验证了过采样体制的效果;文献[5]从信号响应的标准差、平均响应和超出率方面分析了过采样体制的优势.

这些关于不同采样体制下目标检测性能的研究在两个方面存在不足,一是普遍忽略了对亚像元的采样过程,研究的目标单一,相应结论不够充分;二是在目标被检出的条件下,测量目标的定量特性(如辐射强度)是高于检测的定量需求,而已有研究没有关注这类目标的定量检测能力.本文基于亚像元的采样模型,建立了从场景、大气传输、遥感系统到 DN 值图像的完整链路仿真模型,并从目标信号采集能力、背景信号及杂波水平影响、目标检测能力、目标测量特性四个方面详细比较分析了相同瞬时视场的单采样、过采样以及两倍瞬时视场的过采样三种规格采样体制的性能,系统地给出了两种规格的过采样体制在定量检测方面优劣.

## 1 单采样、过采样扫描探测原理

单采样扫描的线列探测器是一行整齐排列的光敏元,每个光敏元对应输出图像的一个像元和固定大小的地面瞬时视场(Ground Instantaneous Field of View, GIFOV),遥感器光学系统通过摆动扫描镜,使线列探测器在垂直于线阵的方向上(顺轨方向)每移动一个 GIFOV 长度产生一个扫描行.

过采样扫描探测的线列探测器在顺轨方向上排列成两行,在交轨方向上错位 0.5 个像元宽度.由于两行探测器有 0.5 个像元的错位,可以实现交轨方向的过采样;探测器扫描的采样间隔也为 0.5 个像元,即顺轨方向上每隔 0.5 GIFOV 进行一次采样,可以实现扫描方向上的过采样.关于这两种扫描探

测体制的更详细说明可参看文献[2-5].

## 2 成像链路仿真模型和方法

### 2.1 场景模型

考虑目标的辐射特性、空间分布和高度.灰体能够有效模拟真实目标的红外辐射特性<sup>[6]</sup>,热力学温度为  $T$ 、发射率为  $\varepsilon$  的灰体在波长  $\lambda$  处的分谱辐射亮度可以用普朗克定律表述,目标能量的空间分布可以用二维混合高斯分布  $G_{\text{FGMM}}$  表述,再考虑目标的高度  $H$ ,目标的参数模型  $M_{\text{Targ}}$  可以表示为

$$M_{\text{Targ}} = f(\varepsilon, \lambda, T, G_{\text{FGMM}}, H) \quad (1)$$

$\lambda$  设置为非大气窗口的短波红外波段,  $2.70 \sim 2.95 \mu\text{m}$ <sup>[7]</sup>.

考虑地、气系统构成的背景场景的辐射特性.模拟下垫面和卷云组成的复杂背景场景,下垫面类型设为干燥沙地和草地.设卷云的高度 10 km,厚度 1 km,假设云由球形冰晶粒子组成,根据米散射理论计算云层的消光系数和不对称因子<sup>[8]</sup>.在表 1 所示的大气及观测条件下,模拟下垫面和卷云的表现辐射亮度,建立背景的数值模型.

表 1 主要大气及观测条件

Table 1 The main atmosphere and observation conditions

大气条件	观测条件
大气廓线	中纬度夏季
气溶胶模式	陆地-RURAL
气溶胶能见度	23 km
大气可降水量	1.0 g/cm <sup>2</sup>
二氧化碳	360 ppmv
太阳天顶角(H2)	12°
观测天顶角(H1)	180°
相对方位角(H2)	-30°

在表 1 所示的条件下,模拟遥感器探测混合背景中不同高度、不同尺寸目标的过程.将目标高度范围设置为 0 ~ 5 km,间隔 0.5 km,共 11 种高度值;考虑点目标的亚像元特性,结合实际地面瞬时视场大小,将目标尺寸设置为 5 m × 5 m、10 m × 10 m、15 m × 15 m 共 3 种尺寸,它们占像元的比例分别为 0.049 4%、0.198%、0.444%.将这些不同的高度、尺寸组合可获得表现辐射特性各异的目标.将目标和背景场景线性叠加,构成模拟场景.

### 2.2 遥感器模型

基于 2.1 节的场景模型,建立遥感器探测典型场景的完整链路仿真模型,如图 1 所示.可按照光谱响应、空间响应、光电转换、噪声和非均匀性、信号放大和量化的划分分别建立各部分的数学模型.

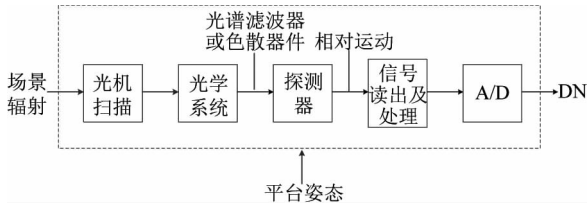


图1 遥感器成像过程

Fig. 1 Imaging process of remote sensor

将光谱滤波器透射和探测器光谱敏感度乘积记为  $R_b(\lambda)$ , 则在波段  $b$  由遥感器测得的光谱综合信号  $\Phi_b$  为:

$$\Phi_b(x, y) = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \pi \frac{L_\lambda R_b(\lambda) A_d}{4F^2} d\lambda \quad (2)$$

式中  $L_\lambda$  是场景在入瞳处的光谱辐射亮度,  $A_d$  为探测元面积,  $F$  为遥感器  $F$  数.

点扩散函数(Point Spread Function, PSF)通过空间卷积对光谱信号  $\Phi_b$  进行加权, 并产生空间综合信号  $S_b$ :

$$S_b(x, y) = \int_{\alpha_{\min}}^{\alpha_{\max}} \int_{\beta_{\min}}^{\beta_{\max}} \Phi_b(\alpha, \beta) \text{PSF}(x - \alpha, y - \beta) d\alpha d\beta \quad (3)$$

式中  $\text{PSF}(\alpha, \beta)$  为探测元总的 PSF, 反映了遥感器单个探测元总的空间响应. 可以分别建立信号传输过程中各个环节 PSF 的数学模型, 总的 PSF 由各部分 PSF 的卷积给出:

$$\text{PSF} = \text{PSF}_{\text{opt}} * \text{PSF}_{\text{det}} * \text{PSF}_{\text{IM}} * \text{PSF}_{\text{el}} \quad (4)$$

式中  $\text{PSF}_{\text{opt}}$  为光学 PSF,  $\text{PSF}_{\text{det}}$  为探测器 PSF,  $\text{PSF}_{\text{IM}}$  为相对运动 PSF,  $\text{PSF}_{\text{el}}$  为电子 PSF, 它们各部分的数学模型可参看文献[9-10].

根据式(3)获得的信号功率, 进一步可计算探测元在一个积分周期内产生的信号电子数

$$N_s = \frac{\lambda}{hc} S_b(x, y) \eta T_{\text{int}} \quad (5)$$

式中  $h$  是普朗克常数,  $c$  是光速,  $\eta$  是量子效率,  $T_{\text{int}}$  是积分时间.

考虑量子噪声、读出电路噪声和探测元差异引起的非均匀性, 光生信号电子和噪声电子在积分电容上累积输出信号电压和噪声电压, 放大电路将输出电压进行放大. 放大后的信号会通过一个线性量化器而被量化为 DN 值.

遥感系统的仿真输入参数为: 等效焦距 100 mm, 光学孔径 300 mm, 光谱响应范围 2.70 ~ 2.95  $\mu\text{m}$ , 积分时间 7.6 ms, 平均暗电流 3 900 e-/s, 平均量子效率 0.644, 读出电路噪声 1 000 e-, 积分

电容 2.1 pF, 转换增益  $7.6 \times 10^{-8}$  V/e-, 放大电路增益 2.5, 量化位数 12 bit, 暗电流和响应率非均匀性都为 1%. 本文研究并分析三种规格的采样体制, 分别是地面一维瞬时视场角 0.3 mrad 的单采样、过采样, 以及地面一维瞬时视场角 0.6 mrad 的过采样. 0.3 mrad 瞬时视场角对应地面分辨率 225 m  $\times$  225 m, 探测器尺寸 30  $\mu\text{m}$   $\times$  30  $\mu\text{m}$ ; 0.6 mrad 瞬时视场角对应地面分辨率 450 m  $\times$  450 m, 探测器尺寸 60  $\mu\text{m}$   $\times$  60  $\mu\text{m}$ .

### 2.3 采样模型

采样的数学模型如式(3)所示, 仿真遥感系统对连续场景进行采样的基本策略是: 用一幅足够高分辨率的图像模拟连续场景, 然后根据式(3)计算遥感器在扫描视场内场景的空间响应.

采样的仿真模型如图 2 所示. 图 2 (b) 中线列探测器在一定条件下对高分辨率场景扫描成像, 在顺轨方向每移动一个采样间隔完成一次曝光成像, 根据探测器的空间响应, 邻近像元的信号也一并被综合. 因此, 对于 GIFOV 中一定大小的点目标, 其能量会扩散到邻近像元, 如图 2 (a) 所示. 过采样体制中两行探测器有 0.5 倍像元宽度的错位, 顺轨方向的扫描步长正好也为 0.5 倍 GIFOV, 这种设置使得两行探测器在顺轨和交轨方向都对同名地物重复采样, 因此点目标能量的扩散效应会更加显著, 在过采样图像中目标能量会影响到更多的邻近像元.

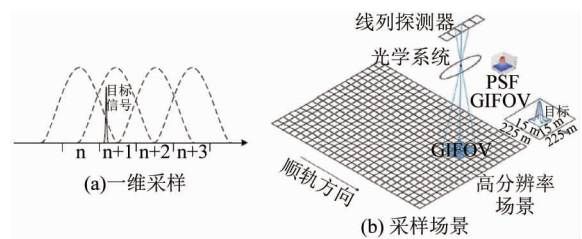


图2 采样模型示意图 (a) 一维采样, (b) 采样场景

Fig. 2 Diagram of the sampling model (a) one-dimensional sampling, (b) sampling scene

### 2.4 仿真结果

依据 2.1-2.3 节中的仿真模型进行多次成像实验, 每一次实验同时模拟三种采样体制的工作模式, 并在背景中随机添加 30 ~ 50 个辐射特性各异的目标. 一次成像仿真实验输出的 DN 值图像如图 3(a)-(c) 所示, 红色方框处为在场景中添加的目标, 较弱的目标已经被背景杂波淹没. 图 3(d)-(f) 为对应的局部目标图像: 0.3 mrad 的单采样和过采样保持了目标的峰值特性, 容易被识别; 而 0.6 mrad 的过采

样丢失了最下方目标的峰值特性,该目标经过采样已经难以被识别;两种规格的过采样都凸显了点目标的局部扩散特性.为显示方便,图 3(a)-(f)经过了分辨率调整和增强处理.

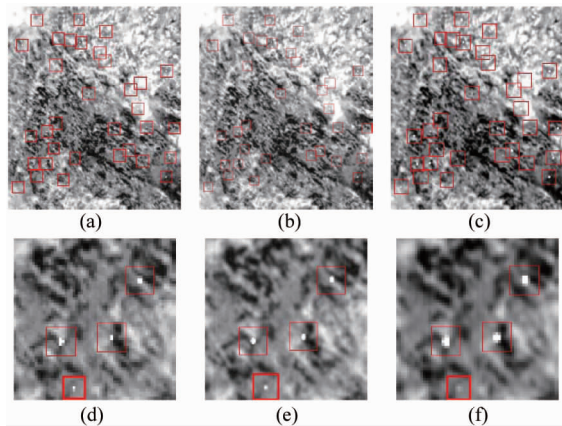


图 3 成像仿真结果(a) 0.3 mrad 单采样,(b) 0.3 mrad 过采样,(c) 0.6 mrad 过采样,(d) 0.3 mrad 单采样局部目标,(e) 0.3 mrad 过采样局部目标,(f) 0.6 mrad 过采样局部目标

Fig. 3 Results of imaging simulation (a) 0.3 mrad single-sampling, (b) 0.3 mrad over-sampling, (c) 0.6 mrad over-sampling, (d) local targets under 0.3 mrad single-sampling, (e) local targets under 0.3 mrad over-sampling, (f) local targets under 0.6 mrad over-sampling

### 3 不同采样体制的点目标定量检测性能分析

#### 3.1 目标信号采集能力分析

图 4(a)、(b)为三种采样体制的目标信号峰值和目标像元数的统计结果,对于不同目标,三种采样体制表现出不同的信号采集能力.

图 4(a)表明 0.3 mrad 单采样和过采样能较好地保留目标的信号峰值,相比之下在 0.6 mrad 过采样图像中目标的信号峰值较低;图 4(b)表明在两种规格的过采样图像中,目标主像元的邻近像元采集到了更多的目标信号,一旦目标被检出,过采样图像中目标像元数更多,目标区域更大,过采样更加突出了点目标的局部扩散特性.

因此,相同瞬时视场(0.3 mrad)的过采样更有利于目标信号的采集,主像元及邻近像元都有更稳定的响应;两倍瞬时视场(0.6 mrad)的过采样采集到的目标信号峰值较低,对目标信号峰值有抑制作用,不利于目标的早期发现,该结论与图 3(d)-(f)所示一致;但是一旦目标被检出,两种规格的过采样(0.3 mrad、0.6 mrad)图像中点目标的局部特性更加明显,这有利于目标特性提取以及多帧数据的目标跟踪.

标跟踪.

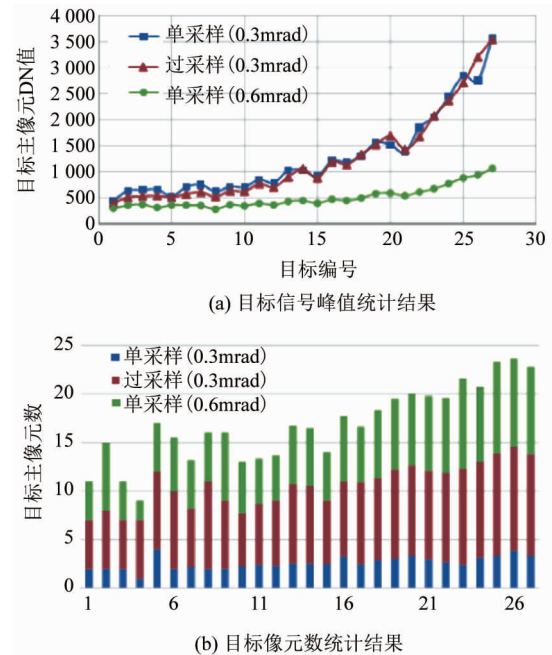


图 4 三种采样体制的目标信号采集能力(a) 目标信号峰值统计结果,(b) 目标像元数统计结果

Fig. 4 Target signal's acquisition capability of the three sampling systems (a) Statistical results of targets' peak signal, (b) statistical results of targets' pixel number

#### 3.2 背景信号及杂波水平分析

目标检测能力除了与目标信号强度相关,还受到背景信号、杂波水平的影响.背景信号强度越低,杂波水平越平缓,目标越容易被检测,检测能力越强.

定义背景抑制因子 (Background Suppression Factor, BSF) 和杂波抑制因子 (Clutter Suppression Factor, CSF)<sup>[11]</sup>:

$$BSF = \frac{\mu_{b0}}{\mu_{bs}}, \quad (6)$$

式中  $\mu_{b0}$ 、 $\mu_{bs}$  分别表示过采样、单采样图像中目标所处背景的信号强度,可用均值表示,

$$CSR = \frac{\sigma_{b0}}{\sigma_{bs}}, \quad (7)$$

式中  $\sigma_{b0}$ 、 $\sigma_{bs}$  分别表示过采样、单采样图像中目标所处邻域的杂波水平,可用标准差表示.

不同采样体制下的背景信号和杂波水平统计结果见表 2、表 3,样本点数为 462,相应的平均 BSF 和 CSF 也在表中列出.两种规格过采样的平均背景抑制比均为 0.80,平均杂波抑制比分别为 0.73 和 0.80,即过采样对背景信号和杂波均有抑制作用.

表 2 三种采样体制的背景信号及 BSF 统计结果  
Table 2 Background signal and BSF statistical results of the three sampling systems

	单采样(0.3 mrad)	过采样(0.3 mrad)	过采样(0.6 mrad)
背景信号平均值	288.32	230.56	230.76
背景信号标准差	47.87	39.48	36.94
BSF	-	0.80	0.80

表 3 三种采样体制的杂波水平及 CSF 统计统计结果  
Table 3 Clutter level and CSF statistical results of the three sampling systems

	单采样(0.3 mrad)	过采样(0.3 mrad)	过采样(0.6 mrad)
杂波平均值	33.03	24.03	26.26
杂波标准差	10.96	8.58	8.04
CSF	-	0.73	0.80

### 3.3 检测能力分析

目标的有效发现依赖于目标的单帧检测能力,检测率(Detection Probability)可以直接表征目标的检测能力,检测率越高则检测能力越强。

首先按式(8)计算潜在目标的信杂比(Signal to Clutter Ratio, SCR),并对其进行恒虚警率(Constant False Alarm Rate, CFAR)检测:

$$SCR = \frac{(P_{\text{targ}} - \mu_{\text{bg}})}{\sigma_{\text{bg}}}, \quad (8)$$

式中  $P_{\text{targ}}$  表示目标区域像元的最大信号值,  $\mu_{\text{bg}}$  表示背景信号,  $\sigma_{\text{bg}}$  表示背景信号波动。然后基于马尔可夫随机场(Markov Random Field)理论检测目标的有效区域<sup>[12]</sup>,目标有效区域的检测也是 3.4 节测量目标辐射强度的前提。

统计三种采样体制下不同高度、不同尺寸、不同杂波水平中目标的检测率和每幅仿真图像的总目标检测率,分别如图 5、图 6、图 7、图 8 所示。

图 5-8 表明相同瞬时视场(0.3 mrad)的过采样无论在何种目标条件下,其检测能力均优于单采样,该采样体制在复杂背景中的检测能力最优,相比于单采样更能适应于复杂场景中目标的探测;而两倍瞬时视场(0.6 mrad)的过采样在目标能量较低、背景杂波较为剧烈的情况下的检测能力较弱,不利于低信杂比情况下的目标探测,这与 2.4.3.1 节的结论一致。

### 3.4 测量特性分析

目前相关研究还没有涉及到过采样对测量点目标定量特性的影响。点目标最重要的定量特性之一是辐射强度,本节分析三种规格的采样体制对点目标辐射强度的测量特性。点目标在真实场景中具有一定的空间面积,引入等效辐射强度的概念将目标

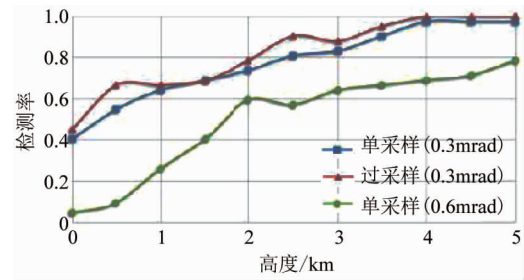


图 5 不同高度目标的检测率  
Fig. 5 Detection probability of targets at different heights

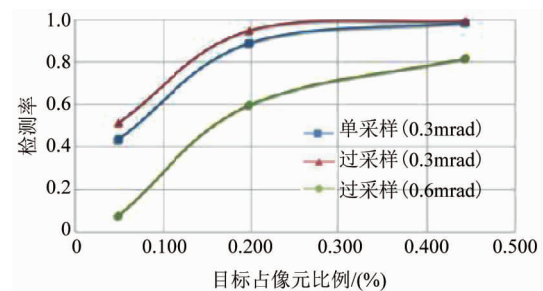


图 6 不同尺寸目标的检测率  
Fig. 6 Detection probability of targets with different sizes

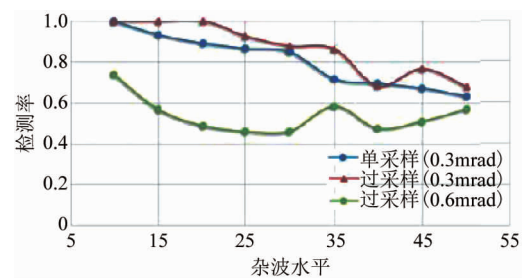


图 7 不同杂波水平中目标的检测率  
Fig. 7 Detection probability of targets in different clutter levels

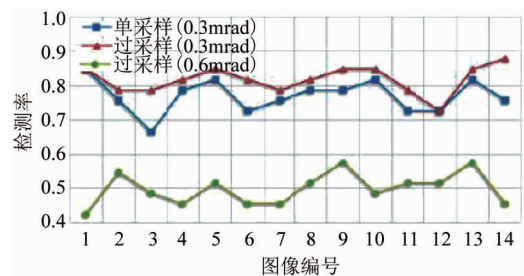


图 8 总体目标检测率  
Fig. 8 Overall target detection probability

像元等效成一个点,它表示的是目标的等效面积辐射强度。

设目标充满一个像元,目标到达探测器像平面

的辐射亮度为  $L_{\lambda D}$ , 则像平面接收到的目标辐射通量 ( $W$ ) 为:

$$\Phi_{\text{det}} = \pi \frac{L_{\lambda D} A_d}{4F^2}, \quad (9)$$

式中  $F$  为光学系统  $F$  数,  $A_d$  为探测元面积. 设目标对入瞳所张的立体角为  $\omega'$ , 则目标的等效辐射强度  $J$  ( $W \cdot \text{sr}^{-1}$ ) 计算如下:

$$J = \frac{\Phi_{\text{det}}}{\omega'} = \pi \frac{l^2 L_{\lambda D} A_d}{4F^2 A_0}, \quad (10)$$

式中  $A_0$  为入瞳面积,  $l$  为目标到入瞳处距离. 设入瞳为圆形, 则可将式 (10) 化简为:

$$J = L_{\lambda D} A_g, \quad (11)$$

式中  $A_g$  为地面瞬时视场面积. 目标的总信号可依据式 (12-13) 计算:

$$p(s, n) = \frac{1}{n} \quad s = 1, 2, \dots, n, \quad (12)$$

$$s_{\text{targ}} = n \sum_{i,j} s(i, j) p(s, n), (i, j) \in \text{targ}, \quad (13)$$

式中,  $n$  表示目标区域像元个数,  $s(i, j)$  表示图像中某位置上像元的信号,  $\text{targ}$  表示目标区域.  $p(s, n)$  实际上表示的是均匀分布.

根据式 (11) 可计算目标的真实等效辐射强度; 仿真生成的 DN 值图像经过模拟辐射定标可获得辐射亮度图像, 根据 3.3 节的检测结果以及式 (11)、(13) 可从图像中测量每个目标的等效辐射强度.

对多幅图像中相同目标的辐射强度取平均, 计算每个目标平均辐射强度的测量值和真实值, 统计后如图 9 所示. 随着目标真实辐射强度的升高, 三种采样图像的测量结果与其有相同的升高趋势, 单采样图像的测量结果与真实值的变化趋势基本吻合, 0.3 mrad 和 0.6 mrad 过采样图像的测量结果均有放大失真, 其中 0.6 mrad 过采样的放大失真更为显著, 这与过采样过多地采集了目标能量的预期相符, 这种放大失真随着目标能量的增大而增大.

对三种采样体制下目标辐射强度的测量结果和真实值进行线性回归, 训练样本点数为 355, 其表达式分别为

$$\begin{cases} \text{Inten}_{\text{real}} = 1.0076 \times \text{Inten}_{S(0.3\text{mrad})} - 766.2695 \\ \text{Inten}_{\text{real}} = 0.2668 \times \text{Inten}_{O(0.3\text{mrad})} - 168.2334 \\ \text{Inten}_{\text{real}} = 0.2153 \times \text{Inten}_{O(0.6\text{mrad})} - 2538.8660 \end{cases}, \quad (14)$$

式中  $\text{Inten}_{\text{real}}$  代表目标的真实辐射强度,  $\text{Inten}_{S(0.3\text{mrad})}$ 、 $\text{Inten}_{O(0.3\text{mrad})}$ 、 $\text{Inten}_{O(0.6\text{mrad})}$  分别代表相

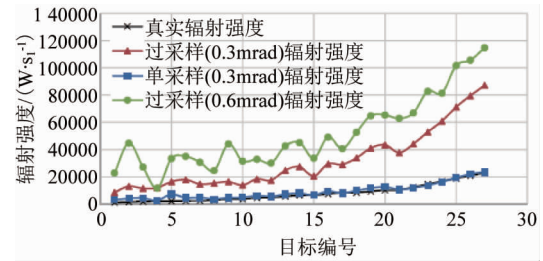


图9 三种采样体制下的目标辐射强度测量值和真实值  
Fig.9 Measured values of the target's radiation intensity for the three sampling systems. The actual values is shown for comparison

应瞬时视场规格的单采样、过采样图像中目标辐射强度的测量结果. 因此, 在单采样图像中测量目标的辐射强度基本与真实相符; 相同瞬时视场 (0.3 mrad) 的过采样对目标能量会有 3.75 倍的“过采集”, 这与过采样的扫描探测原理相对应; 两倍瞬时视场 (0.6 mrad) 的过采样对目标能量有 4.64 倍的过采集外加 11 792.22 ( $W \cdot \text{sr}^{-1}$ ) 的偏差. 因此, 如果在过采样图像中估算目标的辐射强度, 必须校正这种“过采集”误差.

## 4 结论

本文基于亚像元的采样模型, 建立了完整的传感器探测典型场景的仿真模型, 从目标信号采集能力、背景信号及杂波水平影响、目标检测能力、目标测量特性四个方面详细对比分析了三种采样体制的性能. 分析结果表明:

(1) 相同瞬时视场 (0.3 mrad) 的过采样更有利于目标信号的采集, 主像元及相邻像元对目标信号都有着更稳定的响应; 两倍瞬时视场 (0.6 mrad) 的过采样采集到的目标信号峰值更低, 相比于单采样对目标信号峰值有抑制作用, 不利于目标的早期发现, 但其过采样特性有利于目标特性提取及跟踪.

(2) 相比于单采样, 过采样对背景信号和背景杂波均有抑制作用, 实验数据表明两种规格过采样的平均背景抑制比均为 0.80, 平均杂波抑制比分别为 0.73 和 0.80.

(3) 对于不同高度、不同尺寸以及不同杂波背景中的目标, 相同瞬时视场 (0.3 mrad) 的过采样的检测能力最优; 相反, 两倍瞬时视场 (0.6 mrad) 的过采样不利于低信杂比场景中的目标探测.

(4) 在过采样图像中测量目标辐射强度时的“过采集”误差是不可忽略的, 实验数据表明相同瞬时视场 (0.3 mrad) 的过采样对目标辐射强度有

3.75 倍的“过采集”,两倍瞬时视场(0.6 mrad)的过采样对目标辐射强度有 4.64 倍的过采集外加  $11\ 792.22\ (\text{W} \cdot \text{sr}^{-1})$  的偏置.

## References

- [1] Independent Working Group. Missile Defense, the Space Relationship, and the Twenty-First Century: 2007 Report [R]. Institute for Foreign Policy Analysis, 2006; 2-4.
- [2] WANG Tie-Bing, LI Miao, LIN Zai-Ping, *et al.* Comparative performance analysis of over-sampling scanning [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*. (王铁兵, 李淼, 林再平, 等. 过采样扫描探测性能对比分析. *红外与毫米波学报*), 2015, **34**(1): 87-91.
- [3] WANG Shi-Tao, ZHANG Wei, JIN Li-Hua, *et al.* Point target detection based on temporal-spatial over-sampling system [J]. *Journal of Infrared and Millimeter 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.
- [4] DONG Yu-Cui, CHEN Fan-Sheng, SU Xiao-Feng, *et al.* Temporal-spatial oversampling system and its performance analysis in point target detection [J]. *Optics and Precision Engineering*. (董玉翠, 陈凡胜, 苏晓锋, 等. 时空过采样系统及其在点目标检测中的性能仿真. *光学精密工程*), 2014, **22**(9): 2498-2507.
- [5] RAO Peng, WANG Cheng-Liang, HU Sheng-Min, *et al.* Performance comparison of normal sampling and oversampling for point target detection [J]. *Infrared*. (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. *红外*), 2013, **34**(8): 6-10.
- [6] WANG Yan-Bin, WANG Min, ZOU Qian-jin, *et al.* Setup of blackbody's temperature and area for simulating real target [J]. *Infrared and Laser Engineering*. (王彦斌, 王敏, 邹前进, 等. 黑体模拟真实目标温度和面积的设定. *红外与激光工程*), 2014, **43**(3): 779-784.
- [7] YANG Ling, FANG Zhong-Hua, CHEN Gui-Lin. Atmospheric influence on infrared detection performance of ballistic missile plume [J]. *Journal of Applied Optics*. (杨灵, 方中华, 陈桂林. 弹道导弹尾焰红外探测性能的大气影响分析. *应用光学*), 2008, **29**(1): 52-56.
- [8] ZHANG Wei, CAO Yi-Ming, CONG Ming-Yu, *et al.* Band selection for space-based infrared target detection using background clutter model [J]. *Optics and Precision Engineering*. (张伟, 曹移明, 丛明煜, 等. 采用杂波模型进行天基目标红外探测波段的选择. *光学精密工程*), 2010, **18**(2): 341-348.
- [9] Schowengerdt R A. *Remote sensing: models and methods for image processing* [M]. Academic press, 2006.
- [10] Hearn D R. EO-1 advanced land imager modulation transfer functions [R]. Massachusetts Inst of Tech. Lexington Lincoln Lab., 2000.
- [11] Zhang B, Zhang T, Cao Z, *et al.* Fast new small-target detection algorithm based on a modified partial differential equation in infrared clutter [J]. *Optical engineering*, 2007, **46**(10): 106401-106401-6.
- [12] XUE Yong-Hong, RAO Peng, FAN Shi-Wei, *et al.* Infrared dim small target detection algorithm based on generative Markov random field and local statistic characteristic [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*. (薛永宏, 饶鹏, 樊士伟, 等. 基于生成 MRF 和局部统计特性的红外弱小目标检测算法. *红外与毫米波学报*), 2013, **32**(5): 431-436.