

文章编号: 1672-8785(2013)08-0006-05

## 常规采样与过采样点目标检测性能比较分析

饶 鹏<sup>1,2</sup> 王成良<sup>3\*</sup> 胡胜敏<sup>3</sup> 许 春<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, 上海 200083;

3. 空军预警学院, 湖北武汉 430019)

**摘 要:** 对于红外扫描有效载荷等光电探测系统, 瞬时视场的减小(提高分辨率)对抑制背景杂波、提高检测概率和降低虚警率具有重要意义。过采样技术一直是提高仪器成像分辨率时的研究热点。针对点目标探测系统, 对常规采样和过采样两种采样体制进行了对比分析。结果表明, 在响应的标准差、平均响应和超出率方面, 过采样系统具有明显优势。

**关键词:** 过采样; 常规采样; 超出率; 点目标; 检测

**中图分类号:** TP391.9 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2013.08.002

## Performance Comparison of Normal Sampling and Oversampling for Point Target Detection

RAO Peng<sup>1,2</sup>, WANG Cheng-liang<sup>3\*</sup>, HU Sheng-min<sup>3</sup>, XU Chun<sup>1,2</sup>

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

2. Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technology, Chinese Academy of

Sciences, Shanghai 20083, China; 3. Air Force Early-Warning Academy, Wuhan 430019, China)

**Abstract:** For optoelectronic detection systems such as an infrared scanning payload, the reduction of the Instantaneous Field of View (IFOV) is important for background cluster suppression, detection probability improvement and false alarm rate decreasing. An oversampling technique is always the research hotspot for the improvement of the imaging resolution of an imaging instrument. In view of a point target detection system, the normal sampling and oversampling techniques are compared with each other. The result shows that the oversampling technique has its obvious advantages in the respects of standard response deviation, average response and PEE.

**Key words:** oversampling; normal sampling; PEE; point target; detection

收稿日期: 2013-07-04

基金项目: 中国科学院红外探测与成像技术重点实验室开放基金项目(2012DIT0801); 空军预警学院科研创新基金项目(2011ZDJC0101)

作者简介: 饶鹏(1976-), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为天基红外光电遥感探测系统。

E-mail: peng-rao@mail.sitp.ac.cn

\* 通讯作者: 王成良(1975-), 男, 副教授, 博士, 主要从事航天遥感方面的研究。E-mail: wcl@citiz.net

## 0 引言

随着航天技术的不断深入发展, 气象卫星、资源卫星、海洋卫星以及侦察监视卫星等的广泛应用和发展极大地促进了对地观测光学载荷的发展, 使光学遥感探测技术得到了迅猛发展。其中, 点目标搜索与跟踪系统已经在军事领域取得了长足进步, 并形成了较多的应用系统, 如美国的 DSP 和 SBIRS 系统以及俄罗斯的眼睛、预报系列预警卫星。这些系统主要配备了用于对点目标进行大范围搜索的红外扫描载荷。

红外扫描载荷的业务应用普遍要求具有三大能力: (1) 高杂波抑制能力。非常复杂的地物杂波是影响对地观测仪器应用的主要因素。尽管可以使用吸收波段来抑制背景杂波和提高目标对比度, 但是高空云层的影响会使杂波变得异常复杂。因此, 只有具有较强的杂波抑制能力, 才能满足高探测概率和低虚警率的需求。(2) 高精度定位能力。需要获得高精度的用于轨迹预报的位置参数, 因为观测窗口短, 容易产生差之毫厘、谬以千里的后果。(3) 快速捕获能力。要期望目标一旦出现即被发现, 就要求红外扫描载荷具有视场大、回访周期短以及信噪比高等特点。

影响上述能力得到提高的主要因素之一就是仪器的瞬时视场。美国宇航公司提交给美国空军空间司令部空间和导弹中心的研究报告<sup>[1]</sup>中指出, 仪器的瞬时视场是影响点目标探测的主要因素, 也是影响载荷重量及费用的主要因素。瞬时视场的减小(提高分辨率)对抑制背景杂波、提高检测概率和降低虚警率具有重要意义。

由于减小瞬时视场意味着增加像元数和仪器重量等, 人们需要使用新的技术来提高分辨率和减小等效瞬时视场。事实上, 在光电成像领域, 过采样技术一直是提高仪器成像分辨率时的研究热点, 其主要研究方向包括微扫描技术<sup>[2]</sup>、亚像元技术<sup>[3]</sup>、异形像元探测器成像技术<sup>[4]</sup>和光学编码技术<sup>[5]</sup>。其中, 亚像元技术的研究起步较早, 相关应用也较多, 仍然是该领域的热门研究方向。亚像元技术是通过空间重叠采样或者空间和时间都重叠采样的方式来提高成

像分辨率的: 空间重叠采样就是在常规线列探测器上增加尺寸相同的线列探测器, 但在线列方向上线列与线列之间须错开 0.5 个像元间距, 而在扫描方向上则可根据实际工艺情况选取一定的间距值; 时间重叠采样就是通过调整两列探测器的采样时刻以及时间采样频率, 在扫描方向上使增加的线列探测器距离在物空间距离整数个像元间距或再增加 0.5 个像元间距, 并用数字图像处理方法提高物方空间分辨率<sup>[3]</sup>。

按照拼接方式的不同, 亚像元技术可以分为机械拼接、光学拼接和视场拼接。对于线阵扫描型空间相机, 一般采用两列交错排列的探测器来实现视场拼接, 如法国的 SPOT-5 卫星<sup>[6-7]</sup>、德国的 BIRD 卫星<sup>[8]</sup>以及莱卡公司研制的 ADS40 型数字航空遥感相机。这类采样成像遥感系统的最大特点是, 它们在两个空间维上进行采样, 采样是移变的。这种采样所带来的移变特性会使得调制传递函数和目标点与探测器像素间的对准(相位)相关, 从而产生混叠问题。此时, 系统的性能会受到采样周期的限制。而亚像元(过采样)技术能够改善相位问题, 突破探测器采样的限制。最常用的一种方法是, 在扫描线列中增加一条线列, 并使其与原线列在垂直扫描方向上错开半个采样周期; 在扫描方向上, 由于每段驻留时间内可采样两次, 便形成了  $2 \times 2$  过采样。从传递函数的角度来看, 这样可以使分辨率提高 60% 以上。这种方法的优点是无需改变光机结构和探测器单元尺寸就可实现增量优化<sup>[9]</sup>。

在光电探测领域, 点目标探测系统能否像光电成像系统那样通过过采样技术来提升检测性能呢? 本文将在文献[9-10]的基础上对该问题进行分析。

## 1 常规采样和过采样体制

图1所示为常规采样系统的焦面排布情况。其中, 线列方向上的采样间距为  $P$  (单列探测器); 在扫描方向上, 每段驻留时间  $\tau$  内只采样 1 次。这里提出的过采样系统为  $2 \times 2$  过采样: 线列方向上的采样间距为  $P$ , 2 列探测器的错位距离为  $P/2$  (半个像元), 两者相距  $(k + 0.5)P$  ( $k > 1$ , 且为整数); 在扫描方向上, 每段驻留时间  $\tau/2$  内采样 1 次。

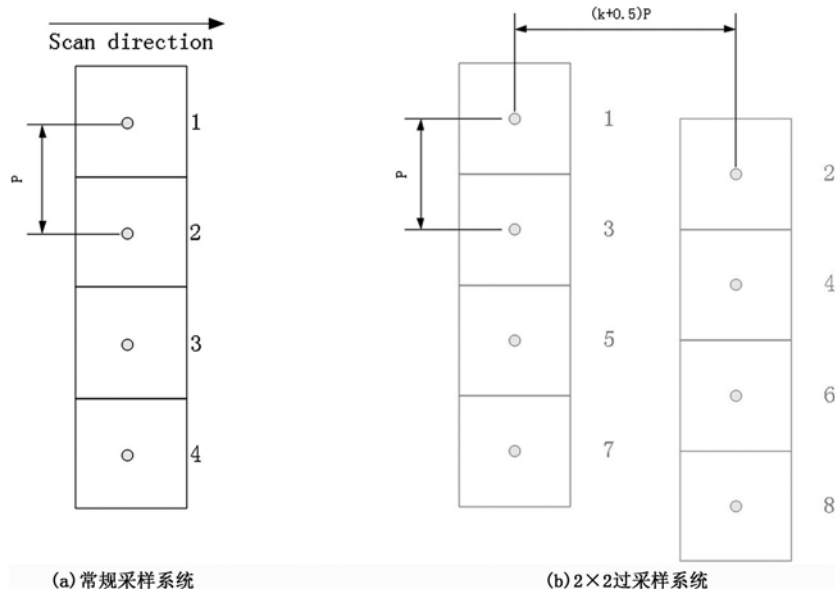


图 1 扫描系统的焦面排布

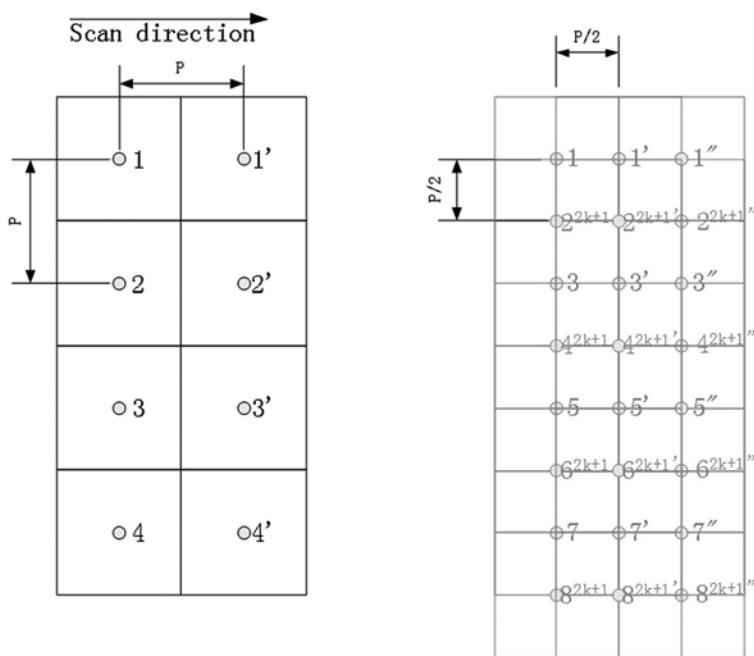


图 2 扫描系统的采样点分布

图 2 所示为扫描系统的图像形成情况。

由以上分析可知，两个系统的采样网格不同，系统 1 为  $P \times P$ ，系统 2 为  $P/2 \times P/2$ ，后者的数据率是前者的 4 倍；两个系统的采样尺寸一致，均为  $P \times P$ ；两者的像元积分时间不同，系统 1 为  $\tau$ ，系统 2 为  $\tau/2$ 。

为了使以下分析与文献 [4] 保持一致，我们对系统参数进行假定：(1) 两个系统使用相同的

光学系统，其焦距为 1 m， $P \times P$  瞬时视场内的能量集中度为 80%；(2)  $P = 50 \mu\text{m}$ ，系统的瞬时视场角为  $50 \mu\text{rad}$ 。

## 2 探测性能分析

### 2.1 目标响应分析

目标为点目标。当目标恰好落在采样点上时，能量主要集中到 1 个像元上，输出信号大；

当目标恰好落在 4 个采样点的中心时, 能量主要分散到 4 个像元上, 输出信号小。因此, 目标与采样网格之间存在一个匹配问题, 称为相位对准问题。

表 1 列出了常规采样中的最佳相位响应数据; 表 2 列出了常规采样中的最差相位响应数

据; 表 3 列出了常规采样中遍历所有相位的统计结果; 表 4 列出了  $2 \times 2$  过采样中的最佳相位响应数据; 表 5 列出了  $2 \times 2$  过采样中的最差相位响应数据; 表 6 列出了  $2 \times 2$  过采样中遍历所有相位的统计结果。

表 1 常规采样: 最佳相位响应

|             |            |            |            |             |
|-------------|------------|------------|------------|-------------|
| -4.6640E-07 | 4.2465E-07 | 2.3272E-06 | 4.2465E-07 | -4.6640E-07 |
| -9.1109E-03 | 0.008      | 0.045      | 0.008      | -9.1109E-03 |
| -1.1802E-01 | 0.107      | 0.589      | 0.107      | -1.1802E-01 |
| -9.1109E-03 | 0.008      | 0.045      | 0.008      | -9.1109E-03 |
| -4.6640E-07 | 4.2465E-07 | 2.3272E-06 | 4.2465E-07 | -4.6640E-07 |

表 2 常规采样: 最差相位响应

|             |            |            |             |             |
|-------------|------------|------------|-------------|-------------|
| -6.9603E-11 | 5.4597E-10 | 5.6281E-10 | -6.4250E-11 | -1.9273E-10 |
| -8.6679E-05 | 0.001      | 0.001      | 0.000       | -2.4001E-04 |
| -2.9657E-02 | 0.233      | 0.240      | -0.027      | -8.2120E-02 |
| -2.8309E-02 | 0.222      | 0.229      | -0.026      | -7.8387E-02 |
| -7.1465E-05 | 5.6058E-04 | 5.7787E-04 | -6.5969E-05 | -1.9789E-04 |

表 3 常规采样: 遍历所有相位的统计结果

| 最小值   | 最大值   | 平均值   | 标准差   |
|-------|-------|-------|-------|
| 0.238 | 0.589 | 0.442 | 0.084 |

表 4  $2 \times 2$  过采样: 最佳相位响应

|            |            |            |            |            |
|------------|------------|------------|------------|------------|
| 4.8808E-03 | 4.8164E-02 | 7.0543E-02 | 4.6522E-02 | 3.3376E-03 |
| 3.3487E-02 | 0.330      | 0.484      | 0.319      | 2.2899E-02 |
| 5.4871E-02 | 0.541      | 0.793      | 0.523      | 3.7521E-02 |
| 2.9738E-02 | 0.293      | 0.430      | 0.283      | 2.0335E-02 |
| 3.6485E-03 | 3.6003E-02 | 5.2732E-02 | 3.4776E-02 | 2.4949E-03 |

表 5  $2 \times 2$  过采样: 最差相位响应

|            |            |            |            |             |
|------------|------------|------------|------------|-------------|
| 4.8603E-03 | 1.2332E-02 | 1.2332E-02 | 4.8603E-03 | -2.3879E-03 |
| 8.2091E-02 | 0.208      | 0.208      | 0.082      | -4.0333E-02 |
| 2.5672E-01 | 0.651      | 0.651      | 0.257      | -1.2613E-01 |
| 2.4344E-01 | 0.618      | 0.618      | 0.243      | -1.1960E-01 |
| 6.7257E-02 | 1.7065E-01 | 1.7065E-01 | 6.7257E-02 | -3.3045E-02 |

表 6  $2 \times 2$  过采样: 遍历所有相位的统计结果

| 最小值   | 最大值   | 平均值   | 标准差   |
|-------|-------|-------|-------|
| 0.651 | 0.739 | 0.739 | 0.034 |

可以看出, 常规采样中的最差相位响应与最佳相位响应相差较大, 其标准差为 0.08, 是  $2 \times 2$  过采样的近 2.5 倍;  $2 \times 2$  过采样的平均响应是常规采样的近 1.67 倍。由此可见, 过采样具有明显优势。

## 2.2 信噪比分析

$$S/N = \frac{N_s}{\sqrt{N_s + N_b + N_d + \sigma_{read}^2 + \dots}} \quad (1)$$

式中,  $N_s$  为信号 (单位: 电子数);  $N_b$  为背景 (单位: 电子数);  $N_d$  为暗电流噪声 (单位: 电子数);  $\sigma_{read}$  为读出噪声 (单位: 电子数)。

由于高层云对太阳光的散射会使仪器接收到强烈的背景杂波, 噪声主要由背景杂波决定:

$$S/N \approx \frac{N_s}{\sqrt{N_b}} \quad (2)$$

过采样系统的平均响应是常规采样系统的 1.67 倍, 而常规采样系统的积分时间是过采样系统的 2 倍。因此, 过采样系统的信噪比是常规采样系统的 1.18 倍 (平均)。由此可见, 过采样系统具有更好的目标响应和更大的信噪比。

## 2.3 超出率分析

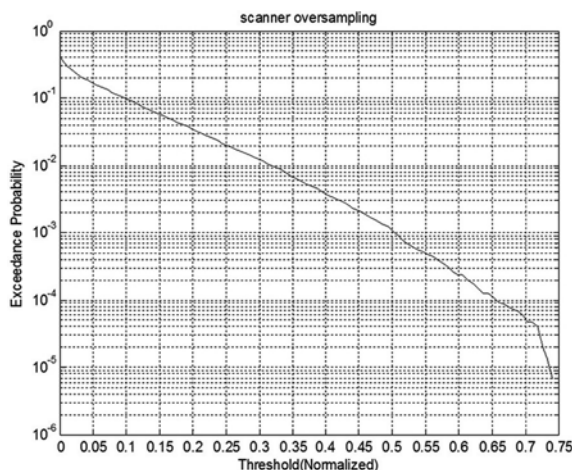
由于是进行系统的比较, 可以采用相对的研究方法。这样便可带来便利: 只需比较不同采样方式对超出率的影响即可。

在对超出率进行仿真计算时, 需要进行端到端仿真, 即从场景到图像处理结果都要接受全过程仿真模拟。这里的场景已经等效到相机的输入端了。这个等效并不会影响比较仿真。场景经过光学系统的模糊, 在焦面上被以二维形式采样: 在线列方向上, 依据探测器的排列进行梳状采样; 在扫描方向上, 依据探测器的积分时间进行卷积后再作梳状采样。在经过模拟传输、滤波以及 A/D 转化等一系列处理之后, 二维采样图像中增加了噪声。假设系统是杂波限的, 这些噪声可以忽略不计; 同时, 所讨论的不同系统在

噪声性能上也是相当的。因此, 可以用一个横向滤波器来模拟这个信息获取与处理过程。对于过采样系统, 可按采样周期来进行卷积和采样, 再按采样周期来拼接多幅图像, 从而形成一幅图像。

场景每个像素幅度的绝对大小不会影响这个比较, 因为已经认为系统是背景限的, 场景经过光学模糊、采样和滤波后形成了一幅图像。我们对这幅图像的像素幅度进行了统计, 并计算了超出率随门限值的变化情况。当门限值设置到所有像素幅度的最小值时, 超出率就为 1; 当门限值设置到所有像素幅度的最大值时, 超出率就为 0。一般按常虚警率的设置方法, 可将超出率设置成某个定值, 如  $10^{-4}$ , 然后再设定门限值。门限值需要等效到输入端点目标的强度值, 这是通过场景的辐亮度、瞬时视场和系统响应转换而来的。

常规采样和  $2 \times 2$  过采样对超出率的影响如下: 在超出率保持一定的情况下, 过采样技术可降低门限值 (约为 65%), 从而大幅提高检测性能。图 3 所示为  $2 \times 2$  过采样系统的超出率随门限值的变化情况。

图 3  $2 \times 2$  过采样系统的超出率随门限值的变化:

TH=0.65@EPR= $10^{-4}$

(下转第 46 页)