

文章编号 1004-924X(2014)09-2498-10

## 时空过采样系统及其在点目标检测中的性能仿真

董玉翠<sup>1,2,3</sup>, 陈凡胜<sup>1,2\*</sup>, 苏晓锋<sup>1,2,3</sup>, 龚学艺<sup>1,2,3</sup>, 李真真<sup>1,2,3</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. 中国科学院大学, 北京 10000)

**摘要:**从成像探测体制出发,对过采样扫描系统的光学系统、电子学系统等模块分别进行了数学建模,并对点目标和场景图像进行了仿真实验。仿真过程中提出了一种对有限图像大量分割代替连续图像的建模思想和方法,在 matlab 环境中对源点目标图像和场景以及探测器扫描积分过程进行仿真,并对过采样图像进行图像融合。仿真结果给出了不同过采样倍数以及点目标位于不同相位时的信噪比变化和信噪比随积分时间增长的变化曲线。仿真结果表明,过采样探测系统融合后的图像虽然能够增大点目标在图像上的尺寸,但融合后的图像会增大高频噪声,造成检测概率降低,虚警率增大。文章最后给出了利用小孔模拟点目标成像的实验,进一步证实了仿真结果的正确性,说明时空过采样系统并不适用于点目标检测。

**关键词:**成像系统;时空过采样;数学建模;点目标检测;扫描成像

**中图分类号:**TN216;TP391.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142209.2498

## Temporal-spatial oversampling system and its performance analysis in point target detection

DONG Yu-cui<sup>1,2,3</sup>, CHEN Fan-sheng<sup>1,2\*</sup>, SU Xiao-feng<sup>1,2,3</sup>,

GONG Xue-yi<sup>1,2,3</sup>, LI Zhen-zhen<sup>1,2,3</sup>

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

2. Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 10000, China)

\* Corresponding author, E-mail: cfs@mail.sitp.ac.cn

**Abstract:** This paper focuses on the mathematical modeling of an oversampling scanning optical system and an electronic system as well as the imaging simulation for point targets and scene images. It proposes new modeling idea and method to divide the finite images into large numbers of simulate analog images. By using this method, the processes of point target imaging, scene imaging and scanning and energy integral are simulated in matlab, and reconstructed images are obtained. The simulation experiment presents the trends of Signal to Noise Ratios (SNRs) with different

收稿日期:2013-10-09;修订日期:2013-12-01.

基金项目:中国科学院知识创新工程资助项目(No. O9KBD013G0)

oversampling times and the SNRs of point target located at different phases, as well as the trend of SNR with integration time increasing. The result shows that the reconstructed image increases the high frequency noise so that to reduces the detection probability and enlarges the false alarm, although it increases the size of the point target in the reconstructed image. At last, it gives the result of the point target imaging experiment based on pinholes, which verifies further the validity of the simulation results, and points out that the oversampling system is unfit for the point target detection.

**Key words:** imaging system; time-spatial oversampling; mathematical modeling; point target detection; scanning imaging

## 1 引言

红外探测系统的探测能力除与相机光学系统和探测器像元指标有关外,还与探测方式有关。根据成像公式可知敏感元大小决定了仪器的瞬时视场,即空间分辨率的大小。过采样探测多图像信息融合技术的提出解决了当前光学系统和电子器件的设计和加工工艺水平对探测系统空间分辨率的限制,其本质是提高了成像仪器的空间采样频率。根据应用环境和实现方法的不同,该技术有过很多不同的名称,如亚像元技术,3CCD技术,细分采样,超模式采样等<sup>[1]</sup>。对探测器沿线列方向增加传感器个数可以实现空间上的过采样,在扫描方向增加采样频率可以实现时间上的过采样,将两者结合起来就是时空过采样系统。该系统在航空航天领域中提高空间分辨率方面得到了广泛应用,典型代表有:法国 SPOT-5<sup>[2]</sup>卫星利用该技术实现了 2.5~3 m 分辨率图像,欧洲 MSG 静止轨道气象卫星<sup>[2]</sup>采用敏感元菱形排列实现了 1.6 倍过采样;国内“风云二号<sup>[4]</sup>”实现了东西方向上的 1.7 倍过采样,“风云四号”气象卫星部分谱段采用过采样技术,短波、中波红外通道实现了从 4 km 到 2 km 分辨率的探测。然而时空过采样技术在航空航天领域的红外目标探测方面的应用在国内仍处于起步阶段。本文从成像探测体制出发,对过采样扫描系统的各个模块进行了数学建模和系统仿真,得出了不同时间过采样倍数下的目标峰值信噪比和对点目标不同相位采集时信噪比的变化情况,以及同一点目标采样信噪比随积分时间的变化趋势。最后给出了不同过采样倍数的融合图像以及实验结果,分析了过采样体制在点目标探测上的优劣。

## 2 成像系统工作原理

### 2.1 理论依据

时空过采样探测系统的本质是要提高空间分辨率,理论依据为采样定理。光学系统作为一个空间的低通滤波器,其空间截止频率为  $\frac{1}{1.22\lambda F}$ ,其中: $\lambda$ 是光学系统入射光的波长; $F$ 为光学系统的  $F$ 数。根据采样定理,采样频率大于或等于两倍原始信号的截止频率时,能不失真地恢复出原始信号。若探测器像元的采样间隔为  $p$ ,则采样频率  $\frac{1}{p} \geq 2 \times \frac{1}{1.22\lambda F}$ ,即  $\frac{1.22\lambda F}{p} \geq 2$  时探测器满足采样定理,此时可完全恢复出通过光学系统的频谱信息。但对于实际的遥感系统,  $\frac{\lambda F}{p}$  一般远远小于 1,属于欠采样情况。由于目前光学系统的设计加工水平、器件制造工艺条件的限制,在不改变探测器像元尺寸或光学系统质量的条件下,成像系统所获得的空间频率还远远达不到其所能利用的程度。在这种情况下,减小采样间隔  $p$  可以增大  $\frac{\lambda F}{p}$ ,从而提高空间分辨率。时空过采样系统就是通过沿线列方向增加探测器个数来提高成像系统的空间采样频率;在扫描方向,也就是垂直于线列方向增加采样频率即减小采样间隔来提高成像系统的时间采样频率。

若空间上错位  $n(n \leq 1)$  个像元,则空间过采样倍数为  $1/n$ ;时间上过采样是通过在扫描方向上控制曝光时间,每隔 IFOV(瞬时视场)的  $1/n$  进行一次采样来实现  $n$  倍过采样。

### 2.2 探测器工作体制

类似于法国 SPOT-5 卫星所用探测器线列,

本文仿真中所采用的探测器结构如图 1(a)所示,在沿线列方向错位 0.5 pixel,在扫描方向上两个线列相距 3.5 pixel,即线列方向错位 0.5 pixel 实现了空间上的 2 倍过采样。由于工艺限制将两个线列分为 4 个线列,如图 1(b)所示。将图 1(b)中所示探测器线列扫描所得图像经品字形校正后的图像与图 1(a)的扫描结果是等效的。图 2 给出了 2 倍时间过采样和 4 倍时间过采样的扫描过程示意图,即每隔 IFOV 的 0.5 倍和 0.25 倍进行一次采样。

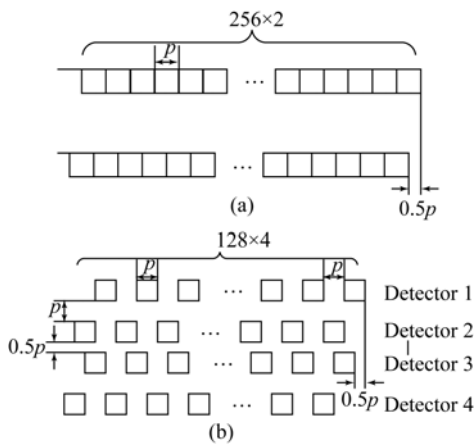


图 1 探测器品字形排列

Fig. 1 Detector arrays in stagger-shaped

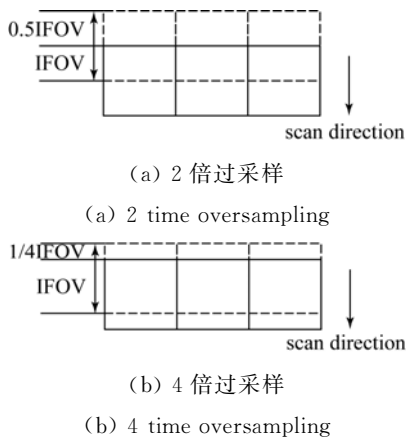


图 2 过采样扫描示意图

Fig. 2 Sketch maps of oversampling scanning

探测器沿线列方向和垂直于线列方向的错位都会造成两个线列在视场空间上的沿线列方向和垂直于线列方向的错位,图 3 给出了成像系统工

作原理,它可在推扫过程实现两个线列的成像。这样的探测器线列所采集到的两幅图像一般需要经过图像融合才能得到高分辨率图像。

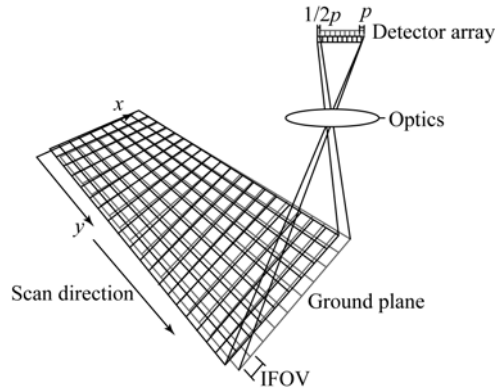


图 3 成像系统工作原理

Fig. 3 Working principle of imaging system

### 3 系统各模块数学模型

上述时空过采样系统的模型如图 4 所示,目标(源图像)辐射的能量经过大气传输到达系统入瞳处,再通过光学系统汇聚到探测器焦平面上,接着经过探测器阵列过采样扫描,将光学信号进一步转化为电子信号,并通过电子器件进行放大和处理。对于 N 倍过采样,每个线列将形成 N 幅图像。下面分别对系统的各个模块进行建模。

#### 3.1 源图像模型

要准确地对目标的成像特性进行仿真,需要先对目标进行建模。目标建模分为几何建模和红外特性建模两部分。几何建模主要是对目标的外形进行建模,这里简单地用辐射强度服从高斯分布的圆形目标来模拟点目标外形,当该目标距离探测器达到一定距离时,圆形目标就变成了点目标。目标几何视图建立后,必须赋其一定的灰度值来表示目标的红外辐射特性,从而形成目标的零视距离辐射图,以对目标进行红外特性建模<sup>[6]</sup>。

所模拟的波段为中波段(3~5 μm),辐射能量与温度具有直接关系。对温度为 T 的朗伯体,根据普朗克辐射定律<sup>[7]</sup>和目标辐射强度分布规律可知,物面上点目标像素点的辐射强度为:

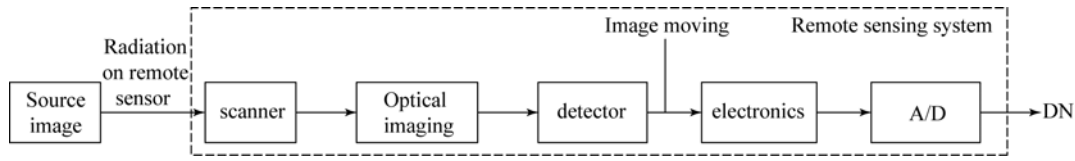


图 4 采样系统建模

Fig. 4 Model of sampling system

$$J_{\lambda_1 \sim \lambda_2} = K_{obj} \frac{dA_{pixel}}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{c_2/\lambda T} - 1} d\lambda; \quad (1)$$

$$K_{obj} = \begin{cases} e^{-x^2/a^2} e^{-y^2/b^2}, & (x^2 + y^2 \leq r^2) \\ 0, & \text{else} \end{cases}$$

式中:  $c_1$  为第一辐射常数;  $c_2$  为第二辐射常数;  $dA_{pixel}$  为物面上每个像素点所对应实际大小的面积;  $x$  和  $y$  分别表示沿线列方向和垂直于线列方向;  $a$  和  $b$  分别代表  $x$  方向和  $y$  方向的均方差。背景图像模型取大小为  $M, N$  的简单均一背景:

$$I_{back} = N_{background} \cdot \text{rect}\left[\frac{x}{M}, \frac{y}{N}\right], \quad (2)$$

式中:  $\text{rect}\left[\frac{x}{M}, \frac{y}{N}\right]$  为二维矩形函数,  $x$  方向和  $y$  方向宽度分别为  $M, N$ 。

在整个场景中, 源图像模型中每个像素点在人瞳处接收到的辐射功率为:

$$P \approx \tau_a \cdot J_{\lambda_1 \sim \lambda_2} \cdot \frac{dA}{l^2} = \frac{\tau_a D_0^2 dA_{pixel}}{4l^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{c_2/\lambda T} - 1} d\lambda, \quad (3)$$

其中:  $\tau_a$  为大气透过系数;  $D_0$  为光学入瞳口径;  $l$  为观测距离。

### 3.2 光学点扩散函数 PSF

衍射受限系统的光学 PSF 为贝塞尔型点扩散函数, 由贝塞尔函数的积分恒等式

$$I_1 = \int_0^\infty \left[ \frac{J_1(X)}{X} \right]^2 dX = \frac{4}{3\pi},$$

得归一化点扩散函数为:

$$\tilde{PSF}(r) = \tau_o \cdot \frac{PSF(r')}{\int_0^\infty PSF(r') dr'} = \frac{3\pi}{16} \tau_o \cdot PSF(r') = \frac{3\pi}{16} \tau_o \left[ 2 \frac{J_1(r')}{r'} \right]^2, \quad (4)$$

其中:  $J_1(r')$  为一阶贝塞尔函数; 归一化半径  $r' = \frac{\pi r}{\lambda N}$ ;  $N = \frac{f}{D}$ ;  $\tau_o$  为光学透过率。

### 3.3 探测器模型

如图 1(b) 所示, 探测器线列由若干个探测元

组成, 且各个探测器线列之间有错位, 探测器线列模型为:

$$PSF_{array}(x, y) = \sum_{i=1}^4 PSF_{line}(x + x_i, y + y_i), \quad (5)$$

其中:

$$PSF_{line}(x, y) = \text{rect}(x/\omega) \text{rect}(y/\omega) \times \text{comb}\left[\frac{x}{c}, \frac{y}{d}\right] \times \text{rect}\left[\frac{x}{M_c}, \frac{y}{N_d}\right],$$

式中:  $\omega$  为像元尺寸;  $\text{comb}\left[\frac{x}{c}, \frac{y}{d}\right]$  为梳状函数;  $c$  代表在  $x$  方向的两个点的间距;  $d$  代表在  $y$  方向两个点的间距;  $M_c, N_d$  分别代表有像元的范围;  $x_i$  表示在沿线列方向各个线列之间的错位;  $y_i$  表示垂直于线列方向的每个线列之间相差的距离。

### 3.4 图像运动 PSF

由于所用线列探测器采用推扫方式进行成像, 相应地会造成图像在探测元件上移动, 产生模糊, 这种由于图像运动产生的模糊被称为图像运动 PSF<sup>[7]</sup>, 该采样过程为过采样扫描积分过程, 即在一个瞬时视场内会有  $N$  次积分过程, 在一个瞬时视场内的第  $n(n=1, 2, \dots, N)$  次采样过程由于图像运动所造成的 PSF 为:

$$PSF_{IM}(x, y) = \text{rect}\left[\left[y - \frac{\omega}{N} \times (n-1)\right]/s\right], \quad (6)$$

式中:  $s$  是在焦平面上的“拖尾污点”,  $s = v \times t_{int}$ ,  $s \leq \omega/N$ ;  $v$  为平台速度;  $t_{int}$  为积分时间。

由扫描积分过程得到每个像元在采样间隔内所获得的光子数, 将其转化为电子数为:

$$N_s = \eta \cdot \frac{H}{\frac{hc}{\lambda}}$$

$$\eta \cdot \frac{\bar{\lambda}}{hc} \int_0^{t_{int}} \int_{x_0}^{x_0+\omega} \int_{y_0}^{y_0+\omega} J(x, y + vt) dy dx dt, \quad (7)$$

其中:  $\eta$  为量子转化效率;  $h$  为普朗克常数;  $\bar{\lambda}$  为探测波段的中心波长值;  $c$  为光速。

### 3.5 电子 PSF

探测器输出的信号需要通过电子滤波去除噪声,该电子滤波采用 Butterworth 低通滤波器。由于在电子元件扫描过程及信号输出和滤波的时间段内,时间变量会转化为等价的空间变量:

$$y = v \times T_{\text{sample}}, \quad (8)$$

式中:  $T_{\text{sample}}$  为扫描方向上的采样间隔,这样电子滤波器的时间响应特性就相应地转化成了空间响应特性。

由 3.2 节到 3.5 节可知,采样系统的总 PSF 为各个模块的 PSF 卷积,表达式如下:

$$PSF_{\text{net}}(x, y) = PSF_{\text{opt}} * PSF_{\text{det}} * PSF_{\text{IM}} * PSF_{\text{el}}. \quad (9)$$

### 3.6 噪声和非均匀性

模型中噪声均用噪声电子数表示,像元的总噪声电子数表示为:

$$N_{\text{FPA}} = (N_{\text{mq}}^2 + N_{\text{m}}^2 + N_{\text{nr}}^2 + N_{\text{nu}}^2 + N_{\text{nd}}^2)^{1/2}, \quad (10)$$

式中:量子噪声  $N_{\text{mq}}$ 、像元区噪声  $N_{\text{m}}$  和读出噪声  $N_{\text{nr}}$  为时间噪声;响应非均匀性  $N_{\text{nu}}$  和暗电流噪声  $N_{\text{nd}}$  属于空间噪声。

其中:量子噪声的表达式如下:

$$N_{\text{mq}} = N_{\text{S}}^{1/2} = \left[ \eta \cdot \frac{\bar{\lambda}}{hc} \int_0^{T_{\text{int}}} \int_{x_0}^{x_0+w} \int_{y_0}^{y_0+w} J(x, y + vt) dy dx dt \right]^{1/2}. \quad (11)$$

乘性固定图案噪声即响应非均匀性噪声:

$$N_{\text{nu}} = U \cdot N_{\text{S}} = U \cdot \eta \cdot \frac{\bar{\lambda}}{hc} \int_0^{T_{\text{int}}} \int_{x_0}^{x_0+w} \int_{y_0}^{y_0+w} J(x, y + vt) dy dx dt, \quad (12)$$

式中:  $U$  为响应非均匀性。

暗电流噪声可实测或根据厂商给出的暗电流非均匀性噪声算得:

$$N_{\text{nd}} = U_d \cdot N_d, \quad (13)$$

式中:  $U_d$  为暗电流非均匀性;  $N_d$  为一个积分周期暗电流的电子数。

## 4 采样过程建模

采样过程(即扫描积分过程)建模的基本思想是将点目标大量细分,以离散来模拟连续,将源图像中一个瞬时视场对应的区间划分为大量小区间,每个小区间用  $d_p$  表示,如图 5 所示。由于光

学系统的衍射等现象,  $d_p$  通过光学系统的 PSF 后所成的像都将是一个艾利斑,且相隔两个小区间所成的像是无法辨别的。

设物面上瞬时视场的边长为  $L$ ,观测距离也为  $L$ ,系统焦距为  $f$ ,探测器尺寸为  $d$ ,由  $\frac{l}{L} = \frac{d}{f}$ ,

得  $l = L \cdot \frac{d}{f}$ 。物面上每个瞬时视场大小分为

$N_{\text{scene}} \times N_{\text{scene}}$  份,则每个像素代表的实际大小为  $p_{\text{scene}} = l / N_{\text{scene}}$ 。每个像素点通过光学系统后在焦平面上形成的艾利斑的中心圆斑半径大小为  $R_{\text{airy}} = 1.22\lambda f / D$ 。在像平面上将每个  $R_{\text{airy}}$  大小分为  $N_{\text{airy}}$  份,则每个像素代表实际尺寸为  $p_{\text{ip}} = R_{\text{airy}} / N_{\text{airy}}$ 。物面上每个像素点映射到像平面上后

的圆斑中心距离为  $l_{\text{airy}} = \frac{d}{N_{\text{scene}}}$ ,在像面上相差的像素数为  $l_{\text{airy}} / p_{\text{ip}}$ 。若令物面尺寸与像面尺寸相等,则可消除该间隔的影响,此时  $N_{\text{scene}}$  与  $N_{\text{airy}}$  的关系为  $N_{\text{scene}} = N_{\text{airy}} \frac{1}{R_{\text{airy}}}$ 。

采样间隔  $T_{\text{sample}}$  不变,每次采样的积分时间为  $T_{\text{int}}$ ,  $T_{\text{int}} < T_{\text{sample}}$ ,扫过瞬时视场所用的时间  $T_{\text{IFOV}} = \text{IFOV} / v_{\text{scan}}$ 。在  $T_{\text{int}}$  时间内探测元对场景进行能量积分,每个积分时间结束时输出电子数。

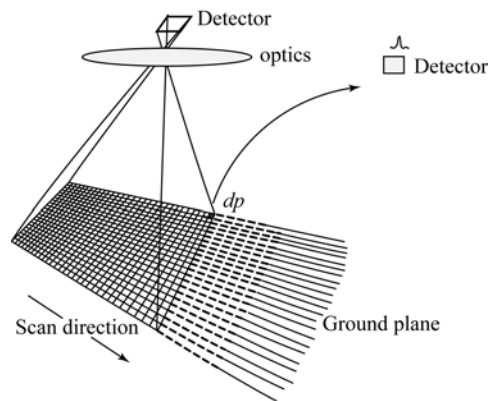


图 5 采样过程建模

Fig. 5 Model of sampling process

## 5 仿真结果与分析

### 5.1 仿真结果

以上分析了仿真过程的原理和模型,该小节以实验原形作为仿真输入参数。取  $L = 2.5 \text{ m}$ ,铝

板边长为 15 cm, 光学系统入瞳口径  $D=25$  mm, 焦距  $f=50$  mm, 探测器像元尺寸  $d=28 \mu\text{m}$ 。光学系统的点扩散函数的中心艾利斑大小取为  $48 \times 48$ , 探测元等分数为  $69 \times 69$ , 点目标在源图像中的尺寸大小为  $19 \times 19$ 。源图像中点目标辐射强度分布如图 6 所示。经光学系统成像在焦平面上的图像如图 8 所示, 图中包括 3 个温度不等的点目标尚未进行空间采样。图 7 给出了光学系统贝塞尔型 PSF。

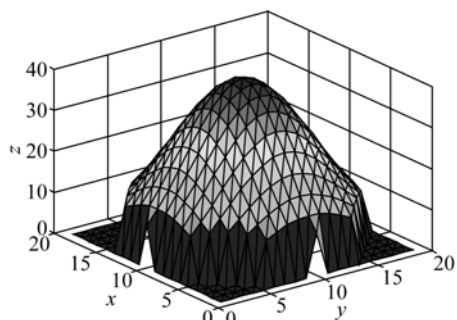


图 6 点目标模型

Fig. 6 Point target model

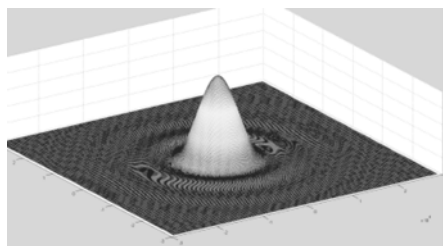


图 7 光学系统 psf

Fig. 7 Psf of optical system

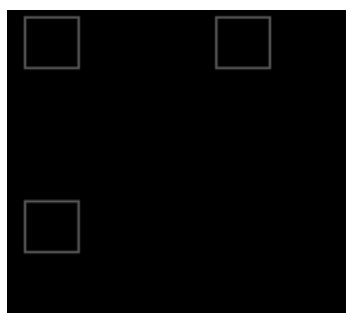
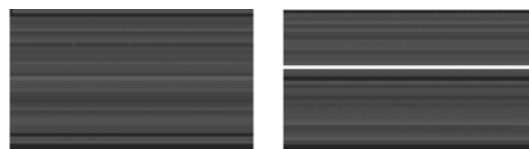


图 8 经光学系统后成像在焦平面上的图像

Fig. 8 Image mapped on focal plane through optical system

扫描积分时采样间隔为 6.5 ms, 积分时间为 0.4 ms, 两倍过采样结果如图 9~图 11 所示(由于图像过多, 只给出第一路和第二路的仿真图像)。



(a) 第一通道的第一幅图像 (b) 第一通道的第二幅图像

(a) The 1<sup>st</sup> image of the first channel (b) The 2<sup>nd</sup> image of the first channel

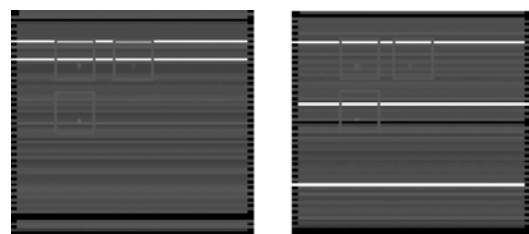


(c) 第二通道的第一幅图像 (d) 第二通道的第二幅图像

(c) The 1<sup>st</sup> image of the second channel (d) The 2<sup>nd</sup> image of the second channel

图 9 第 1、2 路通道探测器仿真所得原始图像

Fig. 9 Original images of the first and the second channels simulated by detectors



(a) 第一幅经品字形校正后的图像 (b) 第二幅经品字形校正后的图像

(a) The 1<sup>st</sup> image after staggered correction (b) The 2<sup>nd</sup> image after staggered correction

图 10 经品字形校正后的图像

Fig. 10 Images after staggered correction



图 11 非均匀性校正后的图像

Fig. 11 Images after ununiformed correction

## 5.2 结果分析

### 5.2.1 信噪比分析

统计不同时间过采样倍数的归一化探测器峰值输出信噪比,如图 12 所示。从图中可以看出,峰值信噪比在过采样倍数比较小的时候波动变化比较大,当采样倍数比较高时波动变化减小。这是因为在采样过程中积分时间是保持不变的,均为 0.4 ms,但是由于采样倍数的增加会导致每次采样时点目标相位发生变化,进而导致采集到的能量值改变,最终使得信噪比发生变化。对同一目标不同相位采集到的图像峰值信噪比的变化趋势如图 13 所示(彩图见期刊电子版)。由图 13 可以看到,4 个通道的峰值信噪比变化成两两互补型。这是因为第一、二通道和第三、四通道的探测器刚好相距 3.5 pixel,当第一、二通道在某一相位采集到的目标能量最大时,第三、四通道采集到的目标能量为最小值,从而导致第一、二通道信噪比最大时第三、四通道的信噪比最小。

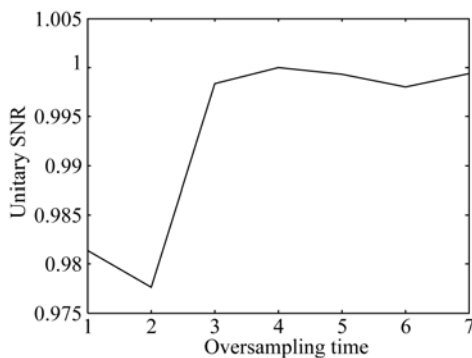


图 12 信噪比随时间过采样倍数变化

Fig. 12 SNR varies with different oversampling times

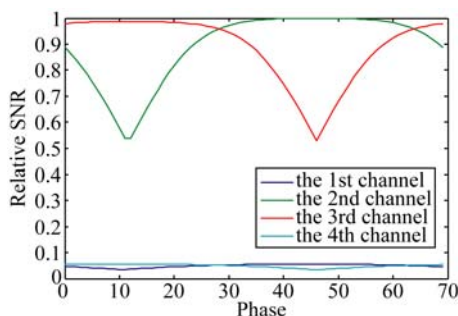


图 13 点目标位于不同相位时信噪比变化关系

Fig. 13 SNR varies with different phases of point target

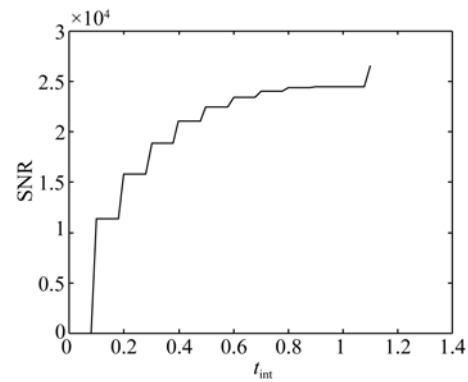


图 14 信噪比随积分时间变化关系

Fig. 14 SNR varies with integrated time

图 14 为同一目标,不同积分时间下同一探测器像元信噪比的变化情况。由图 14 可知,随着积分时间的增加信噪比呈增长趋势,但并不是线性关系。根据前面的噪声模型可知,经非均匀性校正(只考虑时间噪声)后的传感器像元输出信噪比 SNR 表示为:

$$\text{SNR} = \frac{N_s}{\sqrt{N_s + N_m^2 + N_w^2}} \quad (14)$$

从式(14)可以看出,传感器的输出信噪比正相关于  $\sqrt{N_s}$ ,由  $N_s$  的表达式(8)可知,  $N_s$  与像元面积和积分时间成正比,故当像元面积一定时,增加积分时间可以提高图像传感器的输出信噪比。然而在扫描速度不变时,积分时间的增加会使焦平面上“空间污点”拉长,从而导致调制传递函数(MTF)降低。所以需要设计者平衡 MTF 和图像信噪比的关系,而不是单一的增加或减少积分时间。

### 5.2.2 融合图像分析

对以上仿真所得点目标过采样图像用凸影投影集(Projection Onto Convex Sets, POCS)融合算法进行融合,所得结果如图 16 所示。其中图 15(a)为第一、二路通道经品字形校正所得的点目标图像,图 15(b)为第三、四路通道经品字形校正所得的点目标图像。可以看到,由于存在跨像元现象,经品字形校正后点目标在图像上占 1~2 pixel。图 16(a)~(d)分别为 1~4 倍过采样采集图像融合之后的图像,其采样间隔分别是 1, 0.5, 0.33, 0.25 pixel。

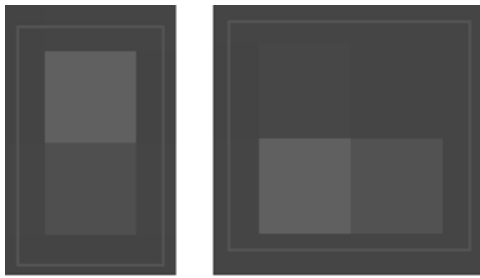


图 15 品字形校正后点目标

Fig. 15 Point target images after staggered correction

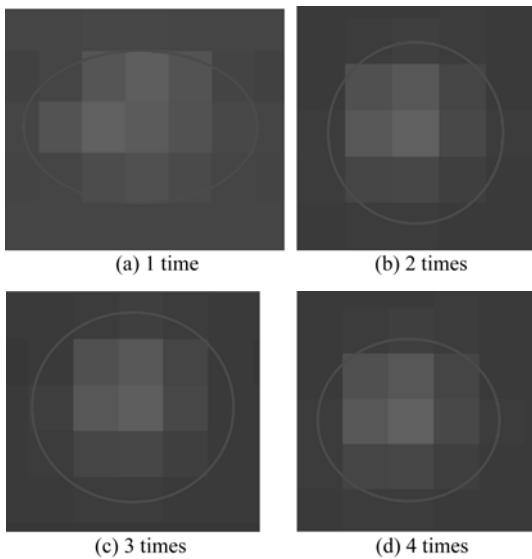


图 16 1~4 倍过采样融合之后的图像

Fig. 16 Fused images after 1~4 time oversampling

比较图 15 和图 16(a)可知,由于存在跨像元现象,融合前点目标在图像上只占 1~2 pixel,目标能量比背景高,两者对比较明显;融合后目标在像面上所占的像素数增多,能量最大值与融合前一样,能量在目标中心有最大值,从中心到背景呈现降低趋势。图 16(a)~16(d)分别是 1 倍、2 倍、3 倍、4 倍时间过采样融合后的图像。由图 16 可知,几种图像都是像面中目标变大,总能量增加,而能量最大值几乎没什么变化。时间上无过采样融合后点目标空间比过采样的要大一些,而 2、3、4 倍过采样融合结果差异并不大。融合图像中的点目标区域变大,目标区域内的像素之间的相关性增强,从而有利于剔除虚假目标,降低虚警率<sup>[12]</sup>。而在文献[13]中陈博洋等人对超分辨率图像重建引起的高频噪声进行了分析,证明融合图像信噪比降低了。根据单帧检测概率公式:

$$P_d \approx \frac{1}{2} \left\{ 1 + \operatorname{erf} \left[ \frac{1}{\sqrt{2}} \left( \operatorname{SNR} - \frac{i_t}{i_n} \right) \right] \right\}, \quad (15)$$

其中:SNR 是信噪比;erf 为误差函数; $i_n$  为均方根噪声电流; $i_t$  为阈值电流。

由式(15)可以看出,信噪比降低会造成检测概率降低,所以利用图像融合获得的高分辨率图像并不是很适合用来做弱小目标检测。

### 5.2.3 实验结果分析

通过小孔板对黑体成像来模拟点目标成像,实验中所用小孔板为铝板,上边开孔大小分别为 0.5, 1.0, 1.5 mm,如图 17 中的 1、2、3 点(实验中将图中 4、5 点目标盖住,不对其进行成像)。本文采用基于区域方差加权信息熵的弱小目标检测算法分别对融合前后的点目标进行检测。黑体温度为 390 K 时,单列图像检测结果如图 18 所示(彩图见期刊电子版);融合后的图像检测结果如图 19 所示(彩图见期刊电子版)。图 18 和图 19 中左图是原始图像,被红色点标出来的点代表检测出来的点(设定目标点为 3 个);右图是经过检测算法处理后的点目标图像。比较图 18 和图 19 的左图可以看出,融合前图像的 3 个目标点都可以检测出来,而融合后图像(图 19)出现了漏检的情况,检测概率降低了,这进一步证明了在 5.2.2 节中对检测概率的分析。比较图 18 和图 19 右图可以看出,融合后图像检测出来的非目标点增多了,且部分非目标点的目标强度比目标 1 的强度更强,从而增加了阈值设定的难度,使虚警率增大。单帧探测平均虚警率公式如下:

$$\overline{\text{FAR}} = \frac{1}{2\sqrt{3}t_d} \exp \left[ -\frac{i_t^2}{2i_n^2} \right]. \quad (16)$$

由式(16)可知,虚警率与噪声电流是正相关的,故根据 5.2.2 节中的讨论可知,融合后图像的虚警率也应该增大,这与该小节的实验相吻合。



图 17 实验用小孔板

Fig. 17 A pinhole board used in experiment

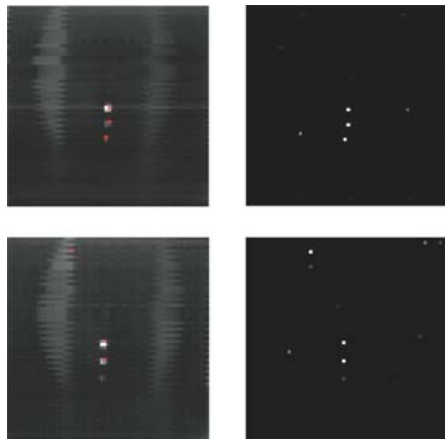


图 18 黑体 390 K, 单列图像点目标检测结果

Fig. 18 Point target detection results of single line of blackbody (390 K)

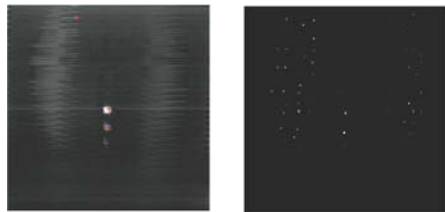


图 19 黑体 390 K, 融合图像点目标检测结果

Fig. 19 Point target detection results of fused image for blackbody (390 K)

## 参考文献:

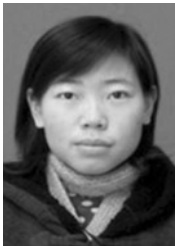
- [1] 陈博洋. 提高静止轨道气象卫星可见光对地观测空间分辨率的研究[D]. 北京: 中国科学院, 2008.  
CHEN B Y. *The Research of Improving the Resolving Power to Ground of the Scanner in the Geosynchronous Meteorological Satellite in Visible Light* [D]. Beijing: Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, 2008. (in Chinese)
- [2] PETRIE G. The future detection of the spot programme [J]. *GEO Informatics*, 2001, 4: 12-17.
- [3] SCHMETZ J, PAOLOPILI, TJEMKESETC S. An Introduction to meteosat second generation (MSG) [J]. *American Meteorological Society*, 2002: 977-992.
- [4] 陈桂林, 栾炳辉. FY-2C 星多通道扫描辐射计及其在轨运行[J]. *上海航天*, 2005: 21-27, 71.  
CHEN G L, RUAN B H. Multichannel scanning radiometer of FY-2C meteorological satellite and its on-orbit operation [J]. *Aerospace Shanghai*, 2005: 21-27, 71. (in Chinese)
- [5] 杨贵军, 柳钦火, 黄华国, 等. 基于场景模型的热红外遥感成像模拟方法[J]. *红外与毫米波学报*, 2007, 26(1): 15-21.  
YANG G J, LIU Q H, HUANG H G, et al.. Methods for simulating infrared remote sensing images based on scene models [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2007, 26(1): 15-21. (in Chinese)
- [6] 郭明, 王学伟. 空间目标/星空背景红外建模与仿真[J]. *红外与激光工程*, 2010, 39(3): 399-404.  
GUO M, WANG X W. IR modeling and simulation of space target/star and space environment [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39 (3): 399-404. (in Chinese)
- [7] 周世椿. 高级红外光电工程导论[M]. 中科院上海技术物理研究所教育中心, 2008, 12.

## 6 结 论

本文通过对时空过采样探测系统进行系统建模, 对点目标及其场景进行了仿真。在此基础上, 提出了一种对有限图像进行无限细分来替代连续目标和场景, 并对场景进行推扫式积分的思想。但该仿真方法获得仿真图像逼真性时是以时间为代价的。对目标和场景进行了系统成像仿真, 统计分析了同一目标不同采样倍数的信噪比的变化趋势, 同一目标不同相位所得信噪比变化趋势以及信噪比随积分时间的变化趋势, 从理论和仿真结果分别得到了信噪比随积分时间的增大而增大的结果; 接着, 对所得图像进行了图像融合, 融合结果表明融合后的点目标在像面上像素数呈现增多的趋势, 能量最大值基本不变, 总能量增加, 时间无过采样所采集到的图像融合后点目标的空间像素数会大一些, 而 2、3、4 倍过采样所采集到的图像融合后的结果差异并不大; 最后, 给出了利用小孔模拟点目标的成像实验, 验证了弱小目标进行时空过采样后的图像进行 POCS 重建后会使得高频噪声增大, 信噪比降低, 因而造成检测概率下降, 虚警率增高。

- ZHOU SH CH. *Introduction to Advanced Infrared Photoelectric Engineering* [M]. Shanghai: The CAS Shanghai Institute of Technical Physics Education Center, 2008,12.
- [8] ROBERT A. Schowengerdt. *Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing* [M]. US: Academic Press Inc, 2006.
- [9] 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): 587-591.
- DONG Y C, SU X F, LIN J CH, *et al.*. Performance simulation of temporal-spatial oversampling system [J]. *High Power Laser and Particle beams*, 2013, 25(3): 587-591. (in Chinese)
- [10] 陈博洋,陈凡胜,陈桂林,等. 利用过采样探测提高线阵扫描相机的空间分辨率[J]. 红外技术, 2009, 31(7): 395-398, 402.
- CHEN B Y, CHEN F SH, CHEN G L, *et al.*. A new method of improving spatial resolution of linear matrix scanner by oversample[J]. *Infrared Technology*, 2009, 31(7): 395-398, 402.
- [11] ROBERT D F. Image quality and  $\lambda FN/p$  for remote sensing systems [J]. *Optical Engineering*, 1999, 7(38): 1229-1240.
- [12] 王世涛,张伟,金丽华,等. 基于时-空过采样的点目标检测性能分析[J]. 红外与毫米波学报, 2013, 32(1): 68-72.
- WANG SH T, ZHANG W, JIN L H, *et al.*. Point target detection based on temporal-spatial over-sampling system [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2013, 32(1): 68-72.
- [13] 陈博洋,郭强,陈桂林,等. 超分辨率图像重建引起的噪声放大与滤波[J]. 红外与毫米波学报, 2011, 30(1): 15-20, 60.
- CHEN B Y, GUO Q, CHEN G L, *et al.*. Amplificatory noise raised by super resolution image reconstruction and filter [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2011, 30(1): 15-20, 6.

#### 作者简介:



董玉翠(1987—),女,河北鹿泉人,博士研究生,主要从事红外技术、系统仿真探测器最优波段选择方法的研究。E-mail: dongyc19871001@126.com



陈凡胜(1978—),男,山东邹城人,博士,研究员,2007年于中国科学院上海技术物理研究所获得博士学位,主要从事空间弱小目标探测系统总体技术的研究。E-mail: cfs@mail. sitp. ac. cn

(版权所有 未经许可 不得转载)