

## 采样红外成像系统的混淆效应研究

史浩然<sup>1</sup>, 李召龙<sup>1</sup>, 沈同圣<sup>2</sup>, 娄树理<sup>3</sup>

(1. 海军航空工程学院 研究生管理大队, 山东 烟台 264001;

2. 中国国防科技信息中心, 北京 100142; 3. 海军航空工程学院 控制工程系, 山东 烟台 264001)

**摘要:** 对红外焦平面阵列而言, 欠采样产生的混淆效应严重影响成像质量。基于红外焦平面阵列的成像过程, 在时间域分析了探测器的采样过程, 在频率域定量研究了混淆效应对图像的影响, 根据混淆产生的机理, 分别对周期目标和非周期目标进行仿真实验。实验结果表明: 对周期目标会有混淆失真现象, 改变了图形的几何形状, 对于非周期图像会产生锯齿条纹。指出在低空间频率内混淆影响小, 噪声对图像的影响占主导地位, 而在高空间频率内混淆失真严重, 噪声影响小, 这对消除图像混淆的影响、系统参数设计等方面具有一定的参考价值。

**关键词:** 欠采样; 混淆效应; 红外成像系统; 三维噪声; 频谱

中图分类号: TN216 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201645.0404003

## Aliasing effect of sampled infrared imaging system

Shi Haoran<sup>1</sup>, Li Zhaolong<sup>1</sup>, Shen Tongsheng<sup>2</sup>, Lou Shuli<sup>3</sup>

(1. Postgraduate Training Brigade, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China;

2. National Defense Science and Technology Information Center, Beijing 100142, China;

3. Department of Control Engineering, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China)

**Abstract:** Under sampling leads to aliasing effect which have seriously effect on the image quality for infrared focal plane arrays. According to the imaging processing of staring system, sampling process of detector was analyzed in the time domain to study aliasing effect on image quality using a quantitative method in the frequency domain. Simulation experiment on aliasing phenomenon of periodic and aperiodic objects based on the reason of aliasing effect was completed. Simulation experiment show that aliasing distortion phenomenon will be exist in periodic objects, but there will be zigzag stripe in aperiodic objects. It can be concluded that aliasing distortion is small in low frequency and noise tends to mask the target pattern, but aliasing distortion is serious in high frequency where aliasing is dominant, this has a certain reference value for eliminating the influence of aliasing confusion and system parameter design.

**Key words:** undersampling; aliasing effect; infrared imaging system; 3-D noise; spectrum

收稿日期: 2015-08-10; 修订日期: 2015-09-11

基金项目: 国家自然科学基金(61303192); “十二五”总装预研项目(51303020403-3)

作者简介: 史浩然(1992-), 男, 硕士生, 主要从事红外成像系统计算机仿真方面的研究。Email: nroahux@163.com

导师简介: 沈同圣(1966-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光电制导、红外图像的生成方面的研究。

## 0 引言

红外凝视焦平面阵列探测器已成为主流的红外成像系统,在航天遥感、成像制导跟踪、医疗成像等军用和民用领域得到了广泛的应用。对于红外焦平面阵列而言,探测器阵列单元的尺寸以及间隔决定了空间采样频率,由奈奎斯特定理可知,当被探测场景的空间频率高于探测器阵列单元采样频率的一半时,重建图像中会出现错误的低频信号,这种图像的混淆效应是造成图像质量下降的主要原因,因此对红外传感器的成像仿真要考虑到采样效应的影响。

Nao Sheng Qiao 等学者<sup>[1-2]</sup>对红外成像系统的采样过程进行了分析,参考文献[3]给出了正弦图像基元的混淆表达式,并在此基础上分析了周期图像和非周期图像的混淆表达式,但是这些都没有对红外焦平面阵列的成像进行深入的探讨,同时也没有考虑到系统噪声与采样效应之间的关系。针对以上问题,文中在空间域分析了红外焦平面成像系统的采样过程,采用频率域处理的方法定量分析了混淆效应对探测器成像质量的影响,根据混淆产生的机理,分别对周期目标和非周期目标进行仿真实验,为了区分混淆效应与噪声对图像的影响,结合红外凝视系统的三维噪声模型,仿真分析了不同空间频率下周期靶标图像的噪声与混淆效应。

## 1 红外传感器的采样过程

红外凝视焦平面阵列在采样过程中受到探测器像元尺寸和各探测单元间隔的影响<sup>[4]</sup>,具体的采样过程如图 1 所示。 $f(x,y)$ 为探测器接收到的辐射图像,探测器像元尺寸大小为  $a \times b$ ,红外焦平面阵列的示意图如图 2 所示,在积分采样过程中,落在探测器上的辐射图像在  $(-a/2, a/2)$  和  $(-b/2, b/2)$  区间间隔内进行积分,每一个探测元得到的辐照强度用  $f_d(x,y)$  表示,则

$$f_d(x,y) = \int_{x-a/2}^{x+a/2} \int_{y-b/2}^{y+b/2} f(x,y) dx dy \quad (1)$$

公式(1)也可以表示为:

$$f_d(x,y) = f(x,y) * \text{rect}\left(\frac{x}{a}, \frac{y}{b}\right) \quad (2)$$

在频率域可以表示为:

$$|F_d(x,y)| = |F(x,y)| \text{sinc}(af_x) |\text{sinc}(bf_y)| \quad (3)$$

公式(3)表明了探测器像元大小对输入图像的影响。各探测单元之间的间隔设为  $\Delta x, \Delta y$ , 共有  $2M \times 2N$  个探测元,经过探测器阵列的离散抽样后,取样函数为:

$$S(x,y) = \sum_{m=-M}^M \sum_{n=-N}^N \delta(x-m\Delta x, y-n\Delta y) \quad (4)$$

取样后的图像为:

$$f_s(x,y) = f_d(x,y) S(x,y) = f_d(x,y) \sum_{m=-M}^M \sum_{n=-N}^N \delta(x-m\Delta x, y-n\Delta y) \quad (5)$$

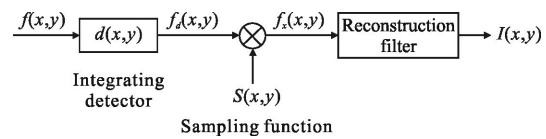


图 1 探测器阵列采样框图

Fig.1 Sampling model diagram of detector array

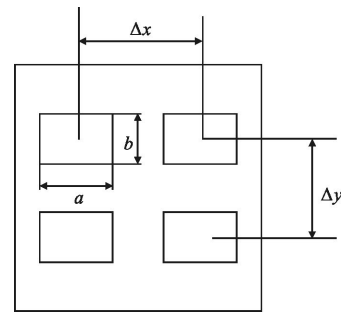


图 2 红外焦平面阵列示意图

Fig.2 Schematic diagram of infrared focal array

## 2 混淆效应分析

在图像欠采样重构过程中,图像频谱中高于奈奎斯特频率的高频成分被图像的低频成分代替,产生人为的低空间频率成分,这种由欠采样造成的现象称为混淆。自然景物图像为非带宽受限图像,可以认为图像的空间频率无限大,对红外焦平面阵列而言无论怎样的采样频率都是不够的,由奈奎斯特采样定理可知,红外焦平面阵列成像系统的欠采样必然造成成像系统的混淆效应,下面给出一幅图像欠采样影响的分析<sup>[5]</sup>。

要定量研究混淆效应需要在图像的频率域进行处理<sup>[6]</sup>。公式(4)的二维傅里叶频谱为:

$$S(w_x, w_y) = \frac{4\pi^2}{\Delta x \Delta y} \sum_{m=-M}^M \sum_{n=-N}^N \delta(w_x - mw_{xs}, w_y - nw_{ys}) \quad (6)$$

式中:  $w_{xs} = 2\pi/\Delta x$  和  $w_{ys} = 2\pi/\Delta y$  表示傅里叶变换域的

采样频率。由公式(5)可知在频率域中被采样图像的频谱可以表示为:

$$F_s(w_x, w_y) = \frac{1}{4\pi^2} [F_d(w_x, w_y) * S(w_x, w_y)] \quad (7)$$

结合公式(6)和公式(7),被采样函数的频谱变为:

$$F_s(w_x, w_y) = \frac{1}{\Delta x \Delta y} \sum_{m=-M}^M \sum_{n=-N}^N F_d(w_x - mw_{xs}, w_y - nw_{ys}) \quad (8)$$

公式(8)也可以写成如下形式:

$$F_s(w_x, w_y) = \frac{1}{\Delta x \Delta y} [F_d(w_x, w_y) * F_Q(w_x, w_y)] \quad (9)$$

对于  $m \neq 0$  和  $n \neq 0$  项,

$$F_Q(w_x, w_y) = \frac{1}{\Delta x \Delta y} \sum_{m=-M}^M \sum_{n=-N}^N F_d(w_x - mw_{xs}, w_y - nw_{ys}) \quad (10)$$

由公式(10)可知图像在空间域的采样等效于在频率域的周期延拓,如果采样频率  $w_{xs}/2, w_{ys}/2$  小于图像的最大频率时,就会造成频谱的交叠,使得图像中存在不应有的低频成分,造成混淆现象。图 3 阴影区域形象地表现出混淆效应的产生过程,因此,经过理想重构得到欠采样后的输出图像为:

$$f_s(w_x, w_y) = f(x, y) + A(x, y) \quad (11)$$

$$A(x, y) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-w_x/2}^{w_x/2} \int_{-w_y/2}^{w_y/2} F_Q(w_x, w_y) \times \exp[i(w_x x + w_y y)] dw_x dw_y \quad (12)$$

式中: $A(x, y)$ 表示重构图像中的交叠误差。

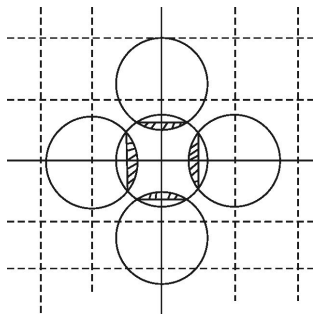


图 3 欠采样的二维函数谱示意图

Fig.3 Schematic diagram of two-dimensional function spectrum about undersampling

### 3 红外传感器的三维噪声模型

为了描述红外焦平面系统的噪声,采用三维噪声的分析方法<sup>[7-8]</sup>,三维噪声模型将系统按照水平(水平宽度),垂直(图像高度),时间(帧的个数)三维方向分成七个噪声分量。三维噪声因子的描述及其来源

如表 1 所示。

表 1 三维噪声模型中噪声组成成分描述

Tab.1 3-D noise component descriptions

3-D noise component	Descriptions of noise	Source of noise
$\sigma_{TVH}$	Random temporal-spatial noise	Basic detector temporal noise
$\sigma_{TV}$	Temporal row noise	Readout noise
$\sigma_{TH}$	Temporal column noise	Readout noise
$\sigma_T$	Frame-to-frame noise	Frame processing
$\sigma_{VH}$	Random spatial noise	Non-uniformity
$\sigma_V$	Fixed row noise	Non-uniformity
$\sigma_H$	Fixed column noise	Readout noise

由表 1 可以看出噪声分成三大部分:时间相关空间噪声  $N_{vh}, N_v, N_h$ ; 空间相关时间噪声  $N_t, N_{th}, N_{tv}$ ; 以及时空噪声  $N_{nh}$ , 等效于传统的噪声等效温差 NETD, 因此总的噪声表达式:

$$U(t, v, h) = S + N_t(t) + N_v(v) + N_h(h) + \dots$$

$$N_v(t, v) + N_{th}(t, h) + N_{vh}(v, h) + N_{nh}(t, v, h) \quad (13)$$

式中: $S$ 为系统噪声总的平均值。对于凝视系统,主要的噪声是空间随机噪声,FLIR92 模型给出的噪声默认值是由系统噪声测量数据库得到的,各噪声组成成分的默认值如表 2 所示。

表 2 凝视系统三维噪声组成成分的默认值

Tab.2 Default 3-D noise components for staring system

Noise components	Default of noise
$\sigma_{VH}$	$0.40 \sigma_{TVH}$
$\sigma_{TV}$	0
$\sigma_V$	0
$\sigma_{TH}$	0
$\sigma_T$	0

FLIR92 模型给出  $\sigma_{nh}$  的表达式为:

$$\sigma_{nh} = \text{NETD} \times \frac{\sqrt{\Delta f_p}}{\sqrt{\Delta f_N}} = \frac{4f_{n0}^2 \sqrt{\Delta f_p}}{\pi \tau_0 \sqrt{A_D} \left( \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} D^*(\lambda, 300) \frac{\partial}{\partial T_{300}} W(\lambda) d\lambda \right)} \quad (14)$$

式中： $f_{no}$  为光学系统  $F$  数； $\Delta f_p$  为系统的噪声带宽； $\tau_0$  为光学透过率； $A_D$  为探测区域； $D^*(\lambda, 300)$  为探测器光谱探测率； $W(\lambda)$  为黑体光谱辐射出射度。系统总的噪声方差为：

$$\sigma_{total} = \sqrt{\sigma_{tvh}^2 + (0.4\sigma_{tvh})^2} \quad (15)$$

### 4 混淆仿真实验

以上对混淆效应的产生机理在理论上做了分析,基于图像频率域处理的方法,通过重复采样频率间隔内滤除掉的低频成分来表示混淆效应,从图 3 可以看出:混淆效应包括水平方向和垂直方向上的混淆,但是当采样频率很小时还有可能具有水平方向与垂直方向上的交叉混淆效应,因此总的混淆效应是水平混淆,垂直混淆以及交叉混淆的总和。某热像仪的探测器单元水平个数  $M=512$ ,垂直个数  $N=512$ ,探测器单元水平感光大小  $a=16 \mu\text{m}$ ,垂直感光大小  $b=12 \mu\text{m}$ ,水平采样间隔  $\Delta x=26 \mu\text{m}$ ,垂直采样间隔  $\Delta y=20 \mu\text{m}$ ,光学系统的有效焦距  $focal=50 \text{mm}$ ,水平采样频率  $f_h=focal/\Delta x=1.9 \text{cy/mr}$ ,垂直采样频率  $f_v=focal/\Delta y=2.5 \text{cy/mr}$ 。

#### 4.1 周期图像的混淆效应

采用计算机仿真的方法,生成空间频率为  $0.9 \text{ cycle/mrad}$  和  $1.35 \text{ cycle/mrad}$  的四靶标图案,重构滤波器是高斯分布的滤波函数,具体的数学表达式为:

$$R(w_x, w_y) = \exp[-2\pi^2\sigma^2(w_x^2 + w_y^2)] \quad (16)$$

图 4(a)是仿真生成空间角频率为  $0.9 \text{ cycle/mrad}$  的四靶标图像,图 4(b)是采样后的图像,靶标图像经过采样丢失了一部分的信息,图 4(c)是经过重构滤波器后得到的重建图像,相比较图 4(d),图 4(c)靶标的宽度略微变大,但能够表现出靶标图像的基本形状,图 4(c)、4(d)图像都变得模糊。图 4(c)具有混淆效应是由于红外焦平面阵列水平采样频率的一半 小于靶标的空间角频率,但是由于引入的旁带低频成分较小,使得图像能够保持基本形状,图 4(c)、4(d)的模糊效应是由探测器阵列单元的积分作用造成的。

相比较图 4、图 5 的混淆效应更加严重,图 5(c)是采样重建后的图像,图像中间靶标的间隔变小,靶标呈现出两头窄、中间宽的形状,与原始图像相比较出现明显的混淆失真现象。图 5(c)不仅在水平方向的采样频率小于奈奎斯特频率,在垂直方向上也小于

奈奎斯特频率,图像的频谱中引入了更多的低频成分,因此混淆现象更加严重。

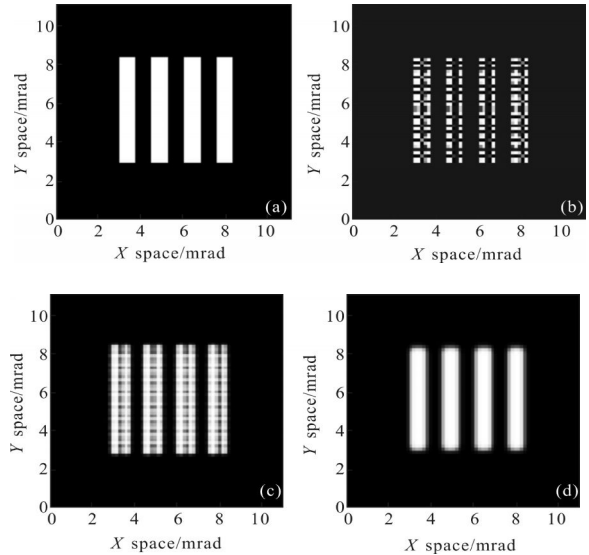


图 4 空间角频率为  $0.9 \text{ cycle/mrad}$  的四靶标图案采样效果图  
Fig.4 Four-bar pattern images under sampling at  $0.9 \text{ cycle/mrad}$

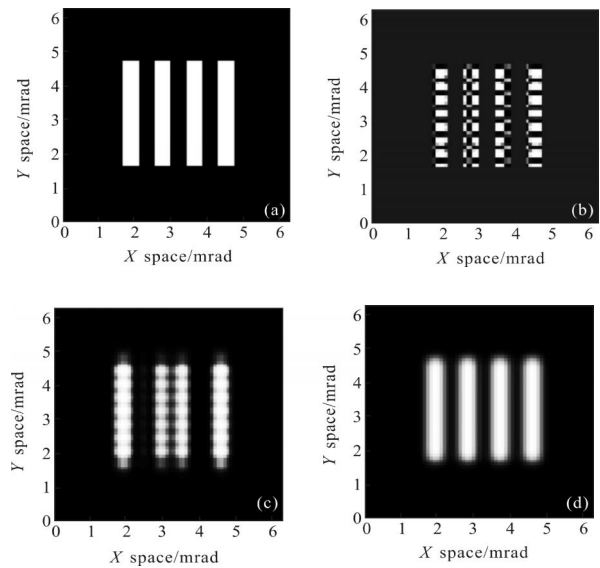


图 5 空间角频率为  $1.35 \text{ cycle/mrad}$  的四靶标图案采样效果图  
Fig.5 Four-bar pattern images under sampling at  $1.35 \text{ cycle/mrad}$

#### 4.2 混淆效应与噪声的比较

为了探讨混淆效应与噪声的相互作用引入红外焦平面的三维噪声模型,光学系统传递函数  $\tau_0=0.95$ ,系统  $F$  数  $F=1.4$ , $D^*=5 \times 10^{10} \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$ ,帧频  $F_{\text{det}}=60$ , $\lambda_1=3 \mu\text{m}$ , $\lambda_2=5 \mu\text{m}$ 。

部分观点认为欠采样的混淆效应可以等效为噪声,通过实验可以看出:对于周期目标混淆与噪声有

很大的区别,图 6(a)可以看出在低空间频率内噪声对图像影响较大,占主导地位,能够模糊图像但不会改变图像的形状;在较高的空间频率内,如图 6(b)所示,图像失真严重,混淆效应改变了图像的几何形状,几乎变成三靶标图案,图像中噪声影响很小,通过图 6(c)就可以看出,因此在高空间频率内,混淆效应占主导地位,对图像的影响比较大,而噪声对图像影响很小。红外成像系统中的欠采样效应不能简单等效为噪声,要具体问题具体分析。

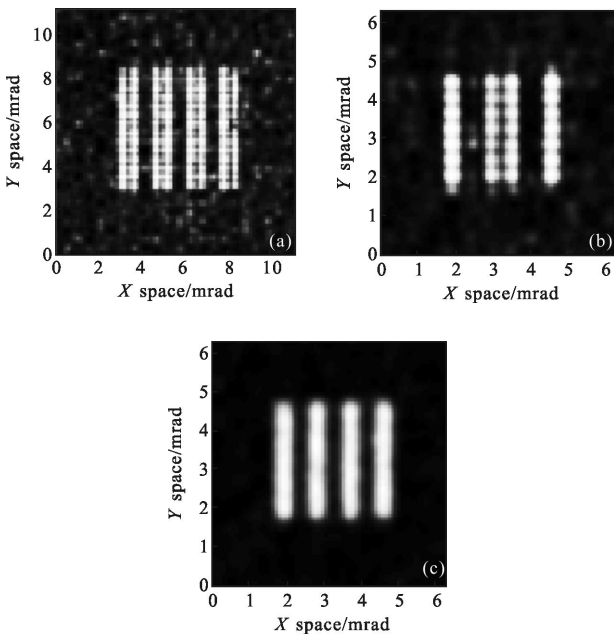


图 6 噪声和混淆分析图

Fig.6 Analysis diagram of noise and aliasing

### 4.3 非周期图像的混淆效应

通常场景图像都不是带限函数,其空间频率可近似看做是无限大,探测器的采样频率远小于其空间频率,必然会引起图像的频谱混淆。

图 7(a)是一幅场景图像,图 7(b)是采样后的图像,从图像中可以看出舰船目标有明显的锯齿条纹,图像质量下降;海面属于图像的低频部分,因而海面的整体图像没有太大变化;而海浪波纹属于图像的高频部分,由于在高频部分引入了混淆,因此不能明显分辨出海浪形状,图像整体的灰度变暗,图像表现出模糊,这也是由探测器单元的积分造成的;图 7(b)与图 7(c)对比可知,插值重建后的图像能够改善图像的质量,但是改善的程度也是有限的,因此要尽可能小地减少混淆效应,必须要提高图像的采样率。提高

焦平面阵列单元的采样率,一方面是增加探测器阵列单元的个数,但是受到工艺水平的限制;另一方面是减小探测器的视场区域,这也是不希望得到的,基于微扫描成像系统能够解决这两方面的限制,也是未来发展的主流方向。

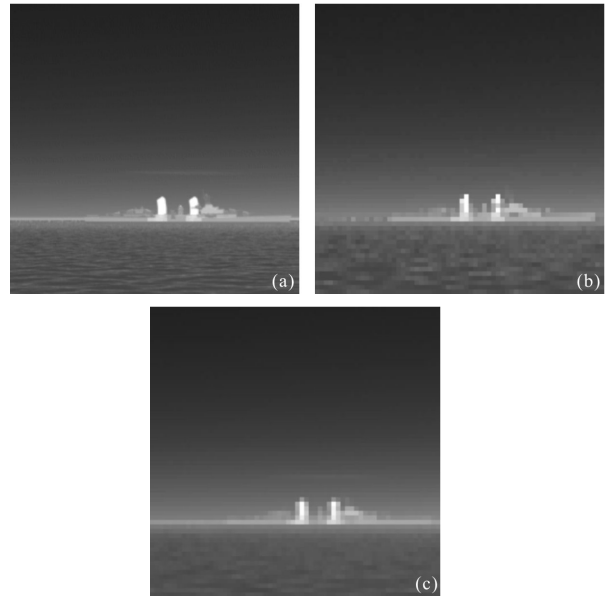


图 7 自然场景图像的采样效果图

Fig.7 Sampling diagram of natural scene image

## 5 结论

文中描述了红外凝视成像系统的采样过程,基于频率域处理的方法研究混淆产生的原因从而实现混淆效应的计算机模拟仿真。在低空间频率内,混淆效应对图像影响小,而噪声对图像的影响占主导地位,但不能改变图像的形状;在高空间频率内,图像产生混淆失真,混淆效应改变了图像的几何形状,噪声影响小,混淆效应占主导地位。通过对混淆效应的详细分析,有助于全面了解红外焦平面阵列欠采样对图像的影响,为后续的评估工作奠定基础,同时对于混淆效应的研究在消除图像混淆的影响、系统参数设计等方面具有一定的参考价值。

### 参考文献:

[1] Nao Sheng Qiao, Chun Mei Yao. Study of sampling in CCD photoelectric imaging system [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 220-223: 2087-2090.  
 [2] Grundland M, Patera J, Zuzana MAS'AK -OV'A. Image sampling with quasicrystals[J]. *SIGMA*, 2009, 75(5): 1-23.

- [3] Zhang Haitao, Zhao Dazun. Quantitative analysis of aliasing effects in opto-electric imaging systems [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, 19(12): 1649–1654. (in Chinese)  
张海涛, 赵达尊. 光电成像系统混淆效应的定量分析[J]. *光学学报*, 1999, 19(12): 1649–1654.
- [4] Wang Xiaorui, Zhang Jianqi, Feng Zhuoxiang, et al. Sampled IR imaging system simulation and MRTD prediction [J]. *Journal Infrared Millimeter and Waves*, 2004, 23(6): 436–440. (in Chinese)  
王晓蕊, 张建奇, 冯卓祥, 等. 采样红外成像系统仿真及最小可分辨温差预测方法研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2004, 23(6): 436–440.
- [5] Wang Changwei, Jiang Yuesong, Liu Li, et al. Research on detector sampling of optical synthetic aperture imaging system [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2010, 21(3): 424–429. (in Chinese)  
王长伟, 江月松, 刘丽, 等. 光学综合孔径成像系统探测器采样研究[J]. *光电子·激光*, 2010, 21(3): 424–429.
- [6] William K Pratt. *Digital Image Processing* [M]. 4th ed. Beijing: China Machine Press, 2009: 75–85. (in Chinese)  
普特拉. *数字图像处理* [M]. 第四版. 北京: 机械工业出版社, 2009: 75–85.
- [7] Luke Scott, John D' Agostino. NVEOD FLIR92 thermal imaging systems performance model [C]//SPIE Aerospace Sensing Symposium, 1992, 1689(13): 194–203.
- [8] Zhang Jianqi, Wang Xiaorui. *Modeling of Optical Imaging System and Performance Evaluation Theory* [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2010. (in Chinese)  
张建奇, 王晓蕊. *光电成像系统建模及性能评估理论研究* [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2010.