

# 采样成像系统的性能评估

彭新红 吴常泳 陈雨良

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海, 200083)

**摘要** 随着 FPA 的广泛应用, 采样效应对热成像系统的影响越来越突出, 以致影响了采样热成像系统的评估和测试. 本文论述了采样成像系统不同于非采样成像系统的特点, 阐述了建立成像系统评估和测试系统的步骤和方法, 并介绍了采样成像系统的评估方法和现状.

**关键词** 热成像, 红外焦平面, 采样, 性能评估.

## PERFORMANCE EVALUATION OF SAMPLED IMAGING SYSTEM

PENG Xin-Hong WU Chang-Yong CHEN Yu-Liang

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

**Abstract** With the use of FPA, the influence of sampling effects on the thermal imaging systems is so evident that people have to modify the evaluation and testing of imaging systems. The difference between sampled and non-sampled imaging systems was discussed in this article. How to establish the evaluation and test system for the imaging systems was illustrated. The evaluation method and development of the sampled imaging system were introduced.

**Key words** thermal imaging, infrared focal plane array, sampling, performance evaluation

### 引言

随着 PtSi、InSb、HgCdTe、量子阱等焦平面器件的迅速发展, 焦平面器件已成了成像器的首选器件. 采用焦平面器件的系统具有轻便、灵敏度高的特点, 人们称这类成像器为第二代成像系统. 与第一代相比, 第二代成像器的一个共同特性是: 它们通常都被设计成空间采样不足系统(欠采样系统), 即在成像时, 探测器的空间采样频率小于二倍的图像的最高空间频率. 带充分采样、滤波、和幅度分辨率的采样系统, 其性能可能和连续信号的几乎一致, 但由于重量、功率、可利用的像元、处理速度等的限制, 通常采用欠采样系统设计. 由于采样不足, 就不可避免地造成了信号与图像的混叠现象, 即: 高于尼奎斯特频率的部分被叠加到低于尼奎斯特频率的部分上, 这一现象使得采样成像器的性能与非采样成像器的性能评估有了较大的差别.

要建立一个成像系统的评估和测试系统, 一般有 3 个步骤: (1) 确定系统的外场性能评估量. 如红

外成像仪中所用到的探测概率、识别和辨识概率, 即属于外场性能指标. 但系统外场性能指标的现场测量都很难实现, 因为测试所需要的开销很大, 而且有的性能指标的测试几乎是毁灭性的, 是不可重复的, 所以有必要找出一些能直接在实验室测量的量, 这些量必须能反映传感器性能, 而且具有可重复测量的性质. (2) 数学建模. 建立一些模型用来描述传感器的灵敏度、分辨率等物理量以评估新的概念化的传感器, 这些模型就是一些在实验室就可得到的实验室测量量, 如非采样成像器中的关于传感器的 NETD、MRTD 及 MTF 等. 与此同时, 还必须找出外场性能指标与实验室测量量之间的关系, 通过这些室内测量量得到外场性能指标. (3) 进行实验室的测量工作. 目的是验证、修改及优化上述理论模型. 理论模型不仅有利于系统的测试和评估, 而且也极大地方便了系统仿真和模拟. 冷战结束后, 美国等一些国家的军事经费大大减少, 所以对于系统的模拟和仿真有了更为迫切的需要, 测试和评估工作因此得到了较大的发展.

对于非采样成像系统,其实实验室测量的量主要有4个:(1)反映噪声大小的噪声等效温差(NETD);(2)描述系统空间频率特性的调制传递函数(MTF);(3)表征包括眼睛和显示器在内的整个系统识别目标能力的最小可分辨温差(MRTD);(4)反映整个系统探测目标能力的最小可探测温差(MDTD).其中以MRTD为最主要而有效的量.对于采样成像系统,人们还在探求能有效描述系统的理论模型.采样不足使得NETD、MRTD及MTF的值发生了很大变化,它们不再是单一的曲线,而是一组曲线,即具有了多值性,其大小随着探测器与图像之间的相对位置(称为“phase”)的变化而变化.因此,该如何来评价采样成像系统,当前的几个理论模型是否适用,这些目前都还没有一个定论.美国军方夜视和光电部的方法是修改当前的几个理论模型,将采样效应加入其中.大多数的研究者试图定义有关采样成像器的新的测量方法,并研究如何将新的外场性能和实验室的测量关联起来.总的来讲,有关采样成像系统性能的研究,主要是围绕上述4个测量量进行的,而其中较有代表性的有3个,即三维噪声模型、压缩传递函数和动态最小可分辨温差.

### 1 三维噪声模型

在采样成像系统中,由于非均匀性等原因,单一的NETD已经不再能充分表现系统的噪声特征,于是产生了一些新的噪声模型,包括三维噪声模型、不均匀性等效温差等,其中三维噪声模型已经比较成熟.传统噪声模型是假设噪声仅随时间变化,在空间上不变.但在面阵成像系统中,探测器在水平和垂直方向上都对图像进行采样,而面阵探测器在水平和垂直方向响应的不均匀性使得噪声不仅是时间的函数,也是二维空间的函数.1990年前后美国军方夜视和光电部提出了三维噪声模型,其特点是将噪声置于一个三维坐标系中(时间轴、垂直轴及水平轴)来考察噪声的大小.在这种模型中,图像数据 $U(v, t, h)$ 由一个全程常数 $S$ 和7种有特色的噪声的综合组成:

$$U(t, v, h) = S + N_T(t) + N_V(t) + N_H(t) + N_{TV}(t) + N_{TH}(t) + N_{VH}(t) + N_{TVH}(t). \quad (1)$$

式(1)中 $S$ 是所有图像数据的平均值,对应于信号的输入响应,跟随 $S$ 的7种噪声响应具有零平均,因此对总平均不做贡献.7种噪声的物理意义分别

为: $N_{TVH}$ 是在时间、平均、垂直3个方向均随机变化的噪声,可描述为瞬态图形噪声,其来源是探测器瞬态噪声; $N_{VH}$ 是仅在空间的两个方向随机变化的噪声,可描述为固定图形噪声,来源于图像处理、探测器的非均匀性、 $1/f$ 噪声等; $N_{TV}$ 是垂直方向随时间变化的噪声,但不影响水平方向,可描述为瞬态行噪声,主要包含 $1/f$ 噪声、读出噪声; $N_V$ 仅在垂直方向变化而与时间无关,可以描述为固定行噪声,由非均匀性产生; $N_{TH}$ 是水平方向随时间变化的噪声,可描述为瞬态列噪声,来源于扫描效应; $N_H$ 仅在水平方向上变化的噪声,代表固定水平非均匀性,可描述为固定列噪声,来源于扫描效应、探测器非均匀性; $N_T$ 是仅在时间方向变化的噪声,可描述为“帧-帧”噪声.

为方便求出7种噪声的大小,引进方向操作因子 $D_t, D_v, D_h$ 的概念,其定义为

$$D_i\{U(t, [v], [h])\} = \frac{1}{T} \sum_{t=0}^{T-1} U(t, [v], [h]). \quad (2)$$

$D_t, D_v$ 的定义类似.其物理意义很明确: $D_t$ 是某一像元各帧信号的平均值; $D_h$ 是某一帧中某一列所有像元信号的平均值, $D_v$ 是某一帧中某一行所有像元信号的平均值.当方向因子作用于图像数据时,就意味着去除此方向的噪声.

三维噪声模型的分析方法为新噪声的量化指标提供了基础,其各个分量噪声的大小和特征为热成像系统硬件和软件的设计提供了科学的依据和指导.此外利用三维噪声模型可以建立更完善更可靠的系统性能模型.

### 2 压缩传递函数(squeeze MTF)

调制传递函数的主要优点在于它成功地体现了热成像系统的空间频率特性.对于采样成像系统,有许多改进的MTF的测试方法,这些方法通常都是对狭缝靶标进行扫描,通过降低探测器对狭缝目标的采样间隔,增加采样点数来提高测试系统的尼奎斯特频率.代表方法有:最值法、缝扫描法及斜缝法.上述方法都是力图从实验测量的角度设法消除采样的影响.为了描述混叠情况下的系统传递函数,在理论模型中特征化由于空间采样不足造成的在高于尼奎斯特频率的地方出现的低频和低频混叠现象,Vollmerhausen<sup>[1]</sup>提出了一个有关MTF的压缩MTF理论模型,该模型认为:欠采样造成的识别性能力的降低实际上增加了空域中系统的模糊效果,等效在频率域中就反映在MTF的压缩或挤压,于是可以通过给MTF加上一个压缩因子来反映采样的

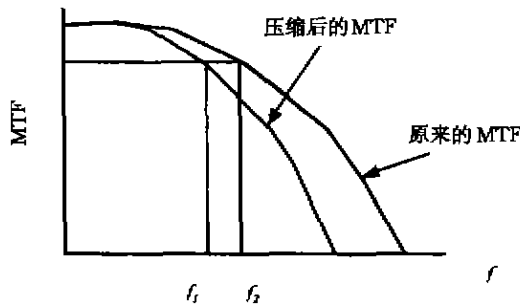


图 1 目标识别中压缩传递函数的应用  
Fig. 1 The application of squeezed MTF in target recognition

影响. 该因子的大小取决于虚假信号、失真和混叠的程度(参见图 1). 图 1 是识别过程中原 MTF 和运用压缩因子概念后的 MTF 的比较.

根据 Vollmerhausen<sup>[1]</sup>的分析, 采样系统中系统的响应函数可以表述为

$$R_{sp} = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} H(\omega - n\nu) \exp[-i(\omega - n\nu)d] P_{ix}(\omega) = H(\omega) \exp(-i\omega d) P_{ix}(\omega) + \sum_{n=0}^{\infty} H(\omega - n\nu) \exp[-i(\omega - n\nu)d] P_{ix}(\omega), \quad (3)$$

式(3)中  $H(\omega)$  是采样前(包括光学和探测器的) MTF,  $P_{ix}(\omega)$  是采样后(包括显示和人眼)的 MTF,

$R_{sp}(\omega)$  是成像器的响应函数,  $\omega$  是空间频率,  $\nu$  是采样频率,  $d$  是表明“相”大小的采样点与空间起始位置的偏移.

$R_{sp}(\omega)$  的表达式有两部分组成: 第一部分对应于基带信号的响应, 即原信号响应. 第二部分对应于虚假响应, 它是由采样后的基带信号的周期延拓信号所产生的.

图 2 是采样效应对频谱的响应. 从图 2 可以看出这几个概念间的关系. 图 2(a) 是采样前的 MTF  $H(\omega)$ ; 图 2(b) 是采样后原 MTF 及其周期延拓; 图 2(c) 示出了采样后原 MTF 及其周期延拓, 以及眼睛和显示部分的采样后 MTF  $P_{ix}(\omega)$ ; 图 2(d) 则是将  $P_{ix}(\omega)$  与  $H(\omega)$  相乘后所得到的整个成像器的传递函数, 它由三个信号组成, 一个主信号是原信号的响应(称为基带响应), 另两个小信号是由于采样后所产生的原 MTF 的延拓引起的虚假响应.

Vollmerhausen<sup>[3]</sup>给出了识别过程中压缩因子的表达式

$$MTF_{\text{squeeze}} = \sqrt{(1 - 0.32SR_H)(1 - 0.32SR_V)}, \quad (4)$$

式(4)中,  $SR = \int_{-\infty}^{\infty} (\text{虚假响应}) d\omega / \int_{-\infty}^{\infty} (\text{基带响应}) d\omega$ , 其中  $SR_H, SR_V$  分别是垂直和水平方向虚假

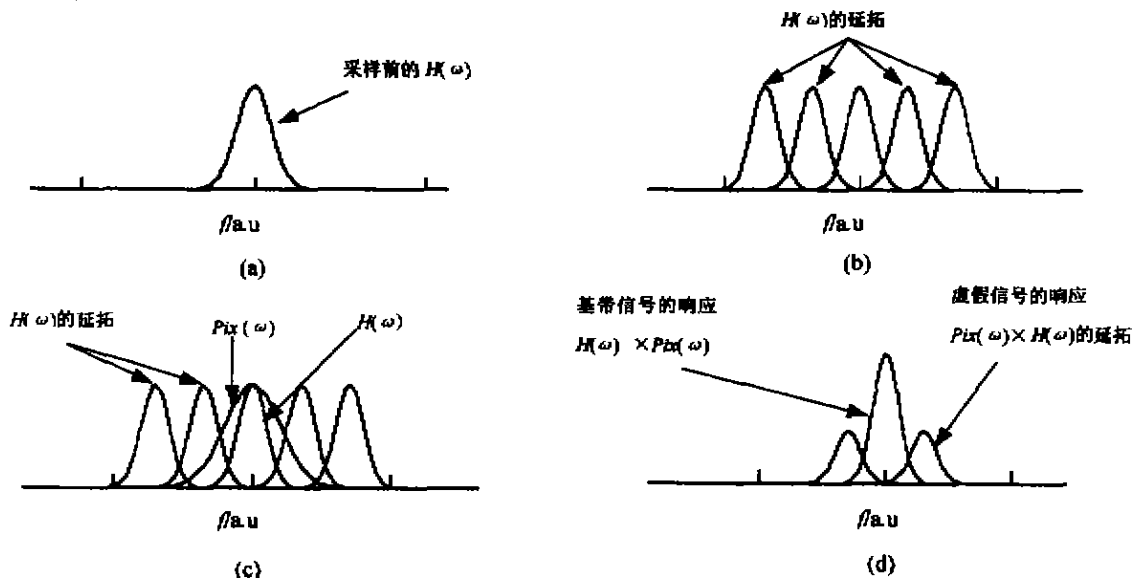


图 2 采样效应对频谱的影响

(a) 采样前  $H(\omega)$  信号 (b) 采样时  $H(\omega)$  在采样频率处的延拓 (c) 显示器及眼睛传递函数  $P_{ix}(\omega)$ 、 $H(\omega)$  及采样产生的  $H(\omega)$  的和延拓 (d)  $H(\omega) \times P_{ix}(\omega)$  产生的基带响应  $P_{ix}(\omega) \times H(\omega)$  的延拓产生的虚假响应

Fig. 2 The influence of sampling effects on spatial frequency spectrum

(a) pre-sampled  $H(\omega)$  (b) when sampling,  $H(\omega)$  replicates  $H(\omega)$  at the sample frequency (c) the display and eye MTF  $P_{ix}(\omega)$ ,  $H(\omega)$  and the sample-generated replicas of the presample blur (d) the baseband response created by  $P_{ix}(\omega)$  multiplying  $H(\omega)$ , and the spurious response created by  $P_{ix}(\omega)$  multiplying the sample-generated replicas of  $H(\omega)$

响应与基带响应的比值,反映了虚假响应的大小。

### 3 动态最小可分辨温差

前面已经提到,在采样成像系统中,传统的最小可分辨温差不是一个单一的值,探测器和图象间位置不同,得到的 MRTD 值也不一样,即存在所谓的“相”效应,特别是在采样系统中,用四靶图形测量静态 MRTD 时,相的效应非常明显;但实际上在观察复杂的有背景的目标(非周期图形)时,这一效应常常不被察觉。现实生活中的周期靶形的目标并不常见,而且由于目标的运动,使得目标图形往往被“扫描”过探测器,这一过程也减弱了空间采样效应。可是周期目标与线性系统的特征函数紧密联系,它因此成为性能评估中一个非常有效的工具。所以要解决用 MRTD 来正确评估系统性能的问题。

动态 MRTD 是避免上述问题的一个方法。所谓动态 MRTD,就是模拟真实场景,让周期靶目标和探测器之间有相对运动,从而测量最小可分辨温差。动态 MRTD 的测试装置与测量静态 MRTD 时基本相似,主要的区别就是要求传感器和四靶图象之间有相对运动,以产生运动目标,这可以通过旋转传感器、移动靶图或振动背景等方法实现。移动靶图的方法需要昂贵的光学系统来瞄准,而旋转传感器方法要求必须能精确控制传感器的轨迹,因此算法比较复杂。

需要注意的是,测量时观察者的活动涉及到了搜索行为,因为此时目标在视场中哪个位置出现并

不确定,而在静态 MRT 的测量中并没有这个问题。因此通常需要提供给观察者一个参考标记以指明目标的位置,这样可以最小化搜索活动。

凝视焦平面探测器静态 MRT 测量的结果见图 3。图 3 中,0.9c/mrad 处的 MRT 比 0.87c/mrad 时小很多,甚至 1.04c/mrad 的 MRT 比 0.87c/mrad 处的还小。这是周期靶测量中的失真现象,与系统外场测试的结果不相符合。这一问题也可在动态 MRT 的测量中得到解决。

实验表明:用动态 MRTD 能提高感知分辨率,避免最优相位置问题;目标的运动也减少了固定图形噪声对观察者的干扰,从而提高识别性能。

### 4 结语

采样成像系统的评估和测量理论尚未完全建立,人们对此展开了许多工作。有的用固定图形噪声来描述采样造成的失真;有的试图通过修改 MTF 来描述采样效应;有的定义一个新的性能指标来描述它,如:德国人 Wittenstein<sup>[5]</sup>提出一个考虑了采样效应的类似于最小可探测温差(MTRD)的概念,即所感知的最小温差(Minimum temperature difference perceived);有的将采样效应反映在 MTF 的变化上;本文所介绍的上述 3 个理论基本上被大家认可,有可能得到应用和推广,特别是在热成像系统的实验室测量方面,加入压缩 MTF 修正概念的动态最小可分辨温差方法可能是一个发展方向。

### REFERENCES

- [1] John D A. 3-D analysis framework and measurement methodology for imaging system noise. In: *Proc. SPIE, Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling and Testing*, 1991, **1488**: 110-121
- [2] Curtis M Webb. Dynamic minimum resolvable temperature testing for staring array imagers. *Opt. Eng.*, 1999, **38**(5): 845-851
- [3] Richard Vollmerhausen. Influence of sampling on target recognition and identification. *Opt. Eng.*, 1999, **38**(5): 763-772
- [4] Webb C M. Results of laboratory evaluation of staring arrays. In: *Proc. SPIE, Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling and Testing*, 1990, **1309**: 271-285
- [5] Schloss Kressbach. Minimum temperature difference perceived - a new approach to assess undersampled thermal imagers. *Opt. Eng.*, 1999, **38**(5): 773-781

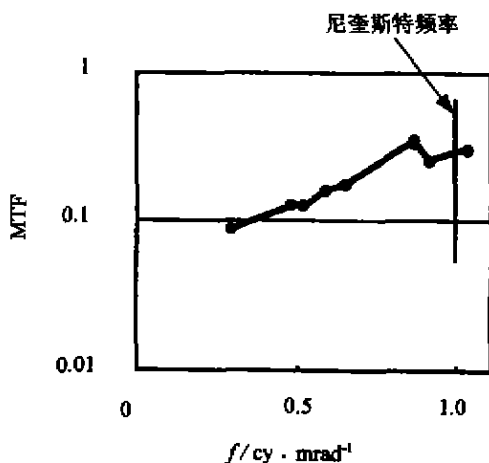


图 3 凝视传感器的静态 MRT 测量值

Fig. 3 Measured static MRT of staring array sensors