

文章编号: 1003-501X(2007)08-0015-05

# 凝视型红外光电系统噪声等效温差测量

胡明鹏<sup>1,2</sup>, 李宏壮<sup>1,2</sup>, 马冬梅<sup>1</sup>

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;  
2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 噪声等效温差(NETD)是一个用以标志红外光电系统灵敏度的广泛使用的参数。本文采用三维噪声模型对凝视型红外光电系统噪声进行分析, 将系统噪声按时间和空间三维划分为七个噪声分量, 提出了一种系统噪声等效温差(NETD)的测量方法。对目标图像进行多帧采集, 建立七个与噪声有关的数据集, 提取出与系统各噪声相关的分量, 用最小二乘法对系统信号传递函数(SiTF)进行拟合。通过实验, 研究了系统的积分时间、增益等参数对噪声等效温差的影响。采用此方法对热像仪进行了实验分析, 取得了较好的测量效果。并通过不同测量方法间的比较, 说明了本文采用方法的正确性。

**关键词:** 噪声等效温差(NETD); 信号传递函数(SiTF); 三维噪声; 红外热成像系统

中图分类号: TN21

文献标志码: A

## NETD test for the staring thermal imaging system

HU Ming-peng<sup>1,2</sup>, LI Hong-zhuang<sup>1,2</sup>, MA Dong-mei<sup>1</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
the Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** The Noise Equivalent Temperature Difference (NETD) is a widely used performance parameter that characterizes the sensitivity of thermal imaging sensors. 3-D noise technology is a new method, which is used to analyze the noise of staring thermal imaging system. In temporal, horizontal and vertical dimensions, the noise may be divided into seven components and a method for testing NETD is put forward. A series of frames are collected. Seven data sets are established, and every component of noise is gotten. Then calculate the Signal Transfer Function (SiTF) by using the least squares fit methodology. Through the experiment, the influences of integration time and gain on NETD are studied. Experiment results show that the measurement is acceptable. Through the comparison between two kinds of measurement, the validity of the method is verified.

**Key words:** noise equivalent temperature difference; signal transfer function; 3D noise; infrared imaging systems

## 引 言

分辨率和灵敏度是红外光电成像系统(也称热成像系统)最重要的两个特性。分辨率取决于系统的 MTF, 而灵敏度则取决于系统的噪声, 它通常用噪声等效温差(NETD)来评价。对噪声等效温差进行精确测量, 能够同时获得系统的温度分辨特性, 噪声特性以及增益、线性度、动态范围、饱和特性及均匀性等。

Paul A. Bell, Carl W. Hoover, Jr., Stanley J. Pruchnic, Jr. 等提出一套详细的 NETD 测量方法<sup>[1]</sup>, 他们利用帧相减技术, 将时间噪声分量从空间分量中分离出来, 从而建立数据集计算出噪声等效温差。

三维噪声模型是由美国陆军夜视与电子传感器委员会提出, 使噪声等效温差的测量准确度和科学性更

收稿日期: 2006-10-20; 收到修改稿日期: 2007-03-09

作者简介: 胡明鹏(1982-), 男(汉族), 江苏沛县人, 硕士研究生, 主要从事红外光电系统静态性能参数的评估。E-mail: radon\_hu@163.com

进一步, 它将红外光电系统噪声分成四个时间分量和三个空间分量。时间噪声分量中的随机 3D 噪声  $\sigma_{TVH}$ , 其本质上等同于 NETD<sup>[1]</sup>。

本文采用三维噪声模型对噪声各个分量进行讨论, 从而得到与噪声等效温差有关的噪声分量提出实验室 NETD 的测量方法和测量步骤。同时, 讨论了热像仪测量时的工作状态对 NETD 的影响。通过对热像仪的测量, 实验结果表明, 该方法测量重复性较好。

## 1 噪声等效温差 (NETD)

热成像系统存在着各种各样的噪声<sup>[2-3]</sup>。热像仪的噪声源可分为光子噪声和电子噪声, 光子和电子噪声进一步分为热噪声、放大器噪声、数字化噪声、1/f 噪声、产生-复合噪声、散粒噪声等, 每一种噪声的起因和影响都是不同的, 此外还存在背景噪声对热成像系统产生影响。各种噪声总是以综合的形式表现出来, 因此分别测量这些噪声很困难, 在热成像系统中, 噪声等效温差 (NETD) 是一个被公认的噪声度量参数。

NETD 定义是在视场中产生的输出信号值等于噪声均方根值时的目标和背景之间温度差, 也就是系统能够识别的最小信号值<sup>[4-7]</sup>。NETD 的计算公式如下:

$$NETD = \frac{V_{RMS}}{\Delta V} \times \Delta T = \frac{V_{RMS}}{SiTF} \quad (1)$$

式中:  $\Delta T$  为热成像系统入瞳处目标和背景的表现温度差,  $\Delta V$  为对应于  $\Delta T$  的电压信号变化量,  $V_{RMS}$  为噪声均方根,  $SiTF$  为信号传递函数。

## 2 三维噪声模型

对红外光电成像系统噪声的分析, 目前常使用的理论分析模型是由美国陆军夜视和电子传感器委员会提出三维噪声模型, 按照这种方法分析噪声, 可以将复杂的噪声降为易管理的分量集, 其理论模型如下<sup>[8-11]</sup>:

如图 1 所示为 3-D 噪声模型,  $t$  轴代表帧序列,  $m$ 、 $n$  分别代表图像的水平宽度和垂直高度, 单位为像素。噪声被分为一个与三维坐标系的时间和空间有关的 7 个分量集。从数学完整性上考虑, 噪声模型含有 8 个分量, 第八个分量  $S$  是总体的平均值, 每个噪声分量平均值为零, 均按照高斯分布。

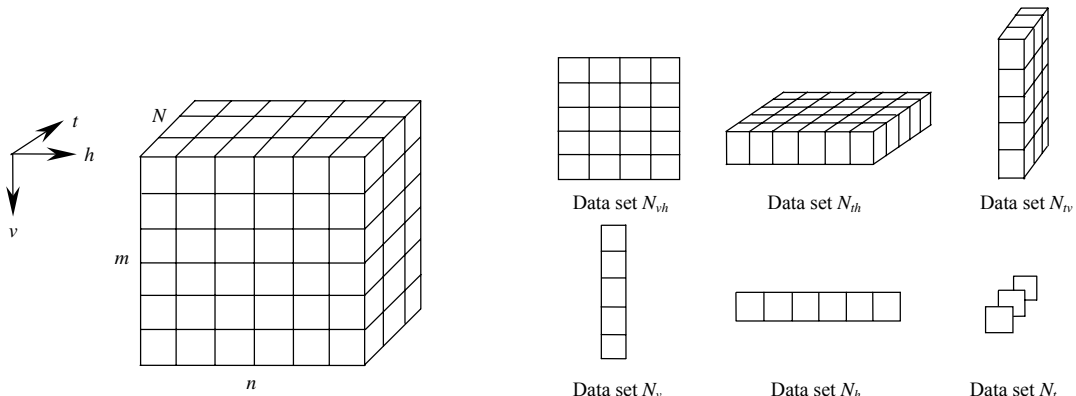


图 1 3-D 噪声坐标系

Fig.1 3-D noise model coordinate system

图 2 3-D 模型数据组

Fig.2 3-D model data sets

用  $U(t, v, h)$  代表  $t$  帧  $v$  行  $h$  列的输出, 包含信号与噪声:

$$U(t, v, h) = S + N_t + N_v + N_h + N_{tv} + N_{th} + N_{vh} + N_{tvh} \quad (2)$$

其中:  $N_{vh}$  为  $t$  帧平均后每像元数据组;  $N_{tv}$  为  $n$  像元平均后的每行的数据组;  $N_{th}$  为  $m$  像元平均后的每列数据组;  $N_v$  为  $n$  像元和  $N$  帧平均后每行数据组;  $N_h$  为  $m$  像元和  $N$  帧平均后每列数据组;  $N_t$  为  $m \times n$  像元平均后每帧数据组。

引入方向操作因子:

对于每个像素 ,平均值为

$$D_t = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U(i, j, k)$$

(3)

对于每行 ,平均值为

$$D_v = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m U(i, j, k)$$

(4)

对于每列 ,平均值为

$$D_h = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n U(i, j, k)$$

(5)

从而建立数据集：

$$N_{tvh} = (1 - D_t)(1 - D_v)(1 - D_h)U(i, j, k)$$

(6)

$$N_{vh} = D_t(1 - D_v)(1 - D_h)U(i, j, k)$$

(7)

$$N_{tv} = D_h(1 - D_t)(1 - D_v)U(i, j, k)$$

(8)

$$N_{th} = D_v(1 - D_t)(1 - D_h)U(i, j, k)$$

(9)

$$N_v = (1 - D_v)D_hD_tU(i, j, k)$$

(10)

$$N_h = D_tD_v(1 - D_h)U(i, j, k)$$

(11)

$$N_t = D_vD_h(1 - D_t)U(i, j, k)$$

(12)

$$S = D_tD_vD_hU(i, j, k)$$

(13)

$N_t$ 、 $N_v$ 、 $N_h$ 、 $N_{vh}$ 、 $N_{th}$ 、 $N_{tv}$ 、 $N_{tvh}$  的均方根分别是  $\sigma_t$ 、 $\sigma_v$ 、 $\sigma_h$ 、 $\sigma_{vh}$ 、 $\sigma_{th}$ 、 $\sigma_{tv}$ 、 $\sigma_{tvh}$ 。  
完整的  $N_{tvh}$  数据组已经在图 1 中描述，从而得到 7 个噪声分量。

表 1 3D 噪声模型 7 个分量

Table 1 Seven noise components of the 3-D noise model

3-D noise component	Description	Staring array
$\sigma_{tvh}$	Random 3-D noise	Random
$\sigma_{vh}$	Spatial noise that does not change from frame-to-frame	FPN, nonuniformity
$\sigma_{tv}$	Variations in row averages that change from frame-to-frame	Read out electronics
$\sigma_{th}$	Variations in column averages that change from frame-to-frame	Read out electronics
$\sigma_v$	Variations in row averages that are fixed in time	Read out electronics line-to-line interpolation
$\sigma_h$	Variations in column averages that are fixed in time	Read out electronics
$\sigma_t$	Frame-to-frame intensity variations	Frame processing

总噪声可以表示为

$$\sigma_{\text{sys}} = \sqrt{\sigma_{tvh}^2 + \sigma_{tv}^2 + \sigma_{th}^2 + \sigma_{vh}^2 + \sigma_t^2 + \sigma_v^2 + \sigma_h^2}$$

(14)

噪声可分为空间噪声和时间噪声，空间噪声有： $\sigma_v$ 、 $\sigma_h$ 、 $\sigma_{vh}$ ；时间噪声有： $\sigma_t$ 、 $\sigma_{th}$ 、 $\sigma_{tv}$ 、 $\sigma_{tvh}$ 。时间噪声和空间噪声进一步分为高频和低频分量，NETD 针对的是  $\sigma_{tvh}$  的高频分量(见表 2)，对于凝视型热成像系统来说  $\sigma_{tvh}$  低频分量可以忽略，因此认为  $\sigma_{tvh}$  就是系统的 NETD。

表 2 噪声等效温差、固定图案噪声和非均匀性

Table 2 NETD, FPN and nonuniformity

3-D noise component	Frequency component	Staring array
$\sigma_{tvh}$	High	NETD
	Low	—
$\sigma_{vh}$	High	FPN
	Low	Nonuniformity

在计算系统  $\sigma_{tvh}$  时，将(6)展开，然后对得到的每个像元作均方根就可以得到系统的随机 3D 噪声  $\sigma_{tvho}$

3 信号传递函数(SiTF)

信号传递函数(SiTF)是评价红外热像仪性能的最基本的技术指标之一，是响应度函数的线性部分。响应度函数是目标尺寸固定、输出强度随着输入变化的函数，从响应度函数测试曲线中可得到待测系统增益、线性度、动态范围和饱和度的信息。实验室中通常是用较大的目标对之评价，因此响应度又称低频响应<sup>[12]</sup>。

典型的响应度曲线呈 S 型，如图 3，暗电流(或基底噪声)限制了最小可探测信号，而饱和度限制了最大

可探测信号。

信号传递函数是响应度曲线线性段的斜率, 斜率的最佳估计值由对  $N$  个数据对  $(\Delta V_i, \Delta T_i)$  作最小二乘法拟和来确定:

$$SiTF = \frac{N \sum_{i=1}^N \Delta V_i \Delta T_i - \sum_{i=1}^N \Delta V_i \sum_{i=1}^N \Delta T_i}{N \sum_{i=1}^N (\Delta T_i)^2 - (\sum_{i=1}^N \Delta T_i)^2} \quad (15)$$

其中:  $N$  为测量点的个数;  $\Delta T_i$  为第  $i$  次测得的热成像系统入瞳处目标和背景的表现温度差,  $\Delta V_i$  为第  $i$  次测得的对应于  $\Delta T_i$  的目标和背景的电压差值。

#### 4 实验过程与结果分析

实验室常用如图 4 光路进行测试, 目标靶放置于离轴准直仪焦面处, 通过离轴准直仪模拟无限远目标, 经红外热成像系统成像, 光电信号由监视器和计算机接收。

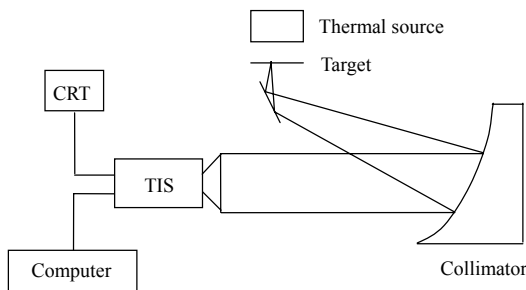


图 4 实验测量图

Fig.4 Experiment setup

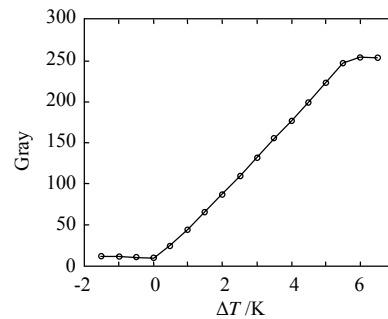


图 5 响应度函数曲线

Fig.5 Responsivity function

$\sigma_{tvh}$  和  $SiTF$  的测量:

对  $SiTF$  测量: 将目标靶换成较大的圆孔黑体靶, 为了减小系统 MTF 的影响, 目标在视场中的尺寸应超过系统瞬时视场的 10 倍<sup>[1]</sup>。控制黑体靶与背景的温差  $\Delta T_i$ , 测量出目标与背景的输出电压差。

记录所有的数据点并用最小二乘法对响应度函数的线性部分拟合, 求出线性部分斜率即为  $SiTF$ , 实验测得的  $SiTF$  为 43.698Cnts/K。

$\sigma_{tvh}$  测量: 将目标靶换为黑体靶, 系统增益、偏置等维持在测量  $SiTF$  时的状态, 连续采集图像, 构成三维数据集。分离三维噪声分量, 提取与 NETD 相关的噪声分量  $\sigma_{tvh}$  见式(6)。

表 3  $\sigma_{tvh}$  的测量数据

Table 3 Measurement result of  $\sigma_{tvh}$

Time	1	2	3	4	5	6	7	8
$V_{RMS}$	1.2298	1.2382	1.2360	1.2483	1.2393	1.2444	1.2401	1.2333
Mean noise	1.2387							

则可以得到  $NETD = V_{RMS} / SiTF = 1.2387 / 43.698 = 0.0283K$ 。因为式(1)中  $\Delta T$  为热成像系统入瞳处目标和背景的表现温度差, 因此, 实际的 NETD 还应乘以一个修正因子  $k$ , 即能量损失, 实验室常取 0.85~0.95。

将热像仪设置为相同的工作状态, 我们利用 Paul A. Bell, Carl W. Hoover, Jr., Stanley J. Pruchnic, Jr. 等提出的 NETD 测量方法, 将时间噪声分量从空间分量中分离出来, 建立数据集计算出噪声等效温差, 测量值  $NETD = 0.0322K$ , 结果大于本文方法测得值。其原因在于这种方法认为时间噪声分量就是系统的 NETD 值, 而 NETD 针对的是随机噪声  $\sigma_{tvh}$ , 本文方法进一步将随机噪声  $\sigma_{tvh}$  分量从时间噪声中分离出来。因此本文所采用的理论模型更加完整。

## 5 总 结

本文采用三维噪声模型对凝视型红外光电系统噪声进行分析,提出了一套系统噪声等效温差(NETD)的测量方法和测试步骤。在实验室内采用此方法对热像仪进行测量,测量重复性较好。研究结果对红外光电成像系统评价有一定的实用价值。

### 参考文献:

- [1] Paul A. BELL, Carl W. HOOVER Jr, Stanley J. PRUCHNIC Jr. Standard NETD test procedure for FLIR systems with video outputs [J]. **SPIE**, 1993, **1969**: 194-206.
- [2] 张 盈. 热成像系统的噪声[J]. 红外技术, 2003, **25**(2): 33-36.  
ZHANG Ying. The Noise of Thermoimaging System [J]. **Infrared Technology**, 2003, **25**(2): 33-36.
- [3] 欧阳杰. 红外电子学[M]. 北京: 北京理工大学, 1997.  
OUYANG Jie. **Infrared electronics** [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1997.
- [4] 肖 静, 周 昊, 何兆湘, 等. 红外焦平面阵列性能参数测试平台[J]. 红外技术, 2004, **26**(5): 75-79.  
XIAO Jing, ZHOU Hao, HE Zhao-xiang, et al. A test bench for measuring characteristic parameters of infrared focal plane arrays [J]. **Infrared Technology**, 2004, **26**(5): 75-79.
- [5] 尹达人, 许生龙. 噪声等效温差(NETD)测试方法分析[J]. 红外技术, 1996, **19**(4): 31-33.  
YIN Da-ren, XU Sheng-long. Analysis of Measuring Method for NETD [J]. **Infrared Technology**, 1996, **19**(4): 31-33.
- [6] 张敬贤, 李玉丹, 金伟其. 微光与红外成像技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2001.  
ZHANG Jing-xian, LI Yu-Dan, JIN Wei-qi. **Low-light-level and thermal imaging system** [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2001.
- [7] 熊辉丰. 红外成像系统中全视场的噪声等效温差[J]. 红外与激光工程, 1996, **25**(4): 1-5.  
XIONG Hui-feng. The Full Field NETD of an Infrared Imaging System [J]. **Infrared and Laser Engineering**, 1996, **25**(4): 1-5.
- [8] Scott J. MILLER, Brian S. BACKER, Margaret KOHIN, et al. Test methods and technology for uncooled imaging systems [J]. **SPIE**, 2004, **5407**: 30-38.
- [9] John A. D'AGOSTINO, Curtis M. WEBB. Three-dimensional analysis framework and measurement methodology for imaging system noise [J]. **SPIE**, 1991, **1488**: 110-122.
- [10] 唐海蓉, 金伟其, 仇谷峰. 二代热成像系统的三维噪声模型[J]. 红外技术, 2000, **22**(6): 7-11.  
TANG Hai-rong, JIN Wei-qi, QIU Gu-feng. 3-Dimension Noise Model for Second Generation Thermal Imaging System[J]. **Infrared Technology**, 2000, **22**(6): 7-11.
- [11] 张红坡, 张 新, 冯树龙. 自动最小分辨温差的测试应用[J]. 光学精密工程, 2003, **11**(增刊): 66-69.  
ZHANG Hong-po, ZHANG Xin, FENG Shu-long. Automated minimum resolvable temperature test implementation [J]. **Optics and Precision Engineering**, 2003, **11**(Supp): 66-69.
- [12] 李旭东, 胡铁力, 岳文龙, 等. 红外热像仪 SiTF 的测试研究[J]. 应用光学, 2005, **26**(5): 21-24.  
LI Xu-dong, HU Tie-li, YUE Wen-long, et al. Research of the SiTF Measurement for Thermal Imaging Systems [J]. **J Applied Optics**, 2004, **26**(5): 21-24.