

文章编号:1001-5078(2007)09-0863-04

凝视型热成像系统噪声模型研究

胡明鹏^{1,2}, 马冬梅¹, 李宏壮^{1,2}, 郭岳峰^{1,2}

(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:本文介绍了凝视型热成像系统的噪声模型。首先分析了一、二代热成像系统噪声的不同之处;然后就二代热成像系统分析了三维噪声模型,将系统噪声按时间、空间三维空间划分为7个噪声分量,就三维噪声模型的各个分量表现方式进行详细地分析,并给出实验结果;最后就三维噪声各分量对最小可分辨温差(MRTD)的影响进行了探讨。

关键词:凝视型热成像系统;噪声;性能模型;噪声等效温差;最小可分辨温差

中图分类号:TN215 **文献标识码:**A

The Noise Model of the Staring Image System

HU Ming-peng^{1,2}, MA Dong-mei¹, LI Hong-zhuang^{1,2}, GUO Yue-feng^{1,2}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: In this paper, the noise of staring thermal imaging system is discussed. Firstly, the differences between the first and second-generation thermal image system are stated and analyzed. Secondly, the 3-D noise model is introduced, which is used to analyze the noise of the staring image system. The noise of the system is divided into 7 components, and every component is analyzed in detail, the result of the experiment is put forward. At last, the affection of every noise component, which can affect the MRTD, is discussed.

Key words: staring image system; noise; performance model; NETD; MRTD

1 引言

热成像系统的噪声对成像质量影响很大。热成像系统中存在各种类型的噪声,如热噪声、 $1/f$ 噪声、产生-复合噪声、散粒噪声等。各种噪声的起因不同,并且它们总是以综合的形式表现出来,因此分别对它们精确测量是比较困难的。要评估热成像系统的噪声,噪声测量计算模型的合理建立是至关重要的,本文着重介绍凝视型热成像系统噪声模型的建立及其计算。

2 不同热成像系统噪声

第一代热成像系统与第二代热成像系统的噪声特征有很大区别。

(1)第一代热成像系统探测器和后续电子处理系统是分离的,而第二代热成像系统采用了先进的焦平面阵列技术和复杂的后续处理电路,信号的采样、放大、多路传输、处理与探测器均集成在一起,从而使得一代和二代热成像系统噪声测量点发生变

化,如图1所示。

(2)第一代热成像系统探测器的性能好坏决定了整个系统的性能,探测器的噪声在整个系统中占主导地位,其噪声功率谱为白噪声。第二代热成像系统的噪声变得相当复杂,而由信号处理不均匀和焦平面响应不均匀引入的噪声(固定图案噪声)对系统有重大的影响,甚至占据主要地位,此类成像系统的输出噪声不可再视为白噪声功率谱。这些噪声在图像水平方向和垂直方向都具有独特的特征,而且随时间而变化,即噪声已呈现三维特性。

(3)第一代热成像系统定义在探测器和前置放大器之间为噪声测量点(前置噪声不考虑在系统噪声中),在该点接入基准电子滤波器用以模拟前放及其后电子线路的滤波作用,从而测量噪声。第二

作者简介:胡明鹏(1982-),男,硕士,主要从事红外光电系统各项性能参数的评估工作。E-mail: radon_hu@163.com

收稿日期:2007-03-22

代热成像系统,噪声的测量点往往被典型地设在视频信号输出口,这时候的信号和噪声都已经过电子线路的滤波作用,基准电子滤波器已不再需要^[1]。

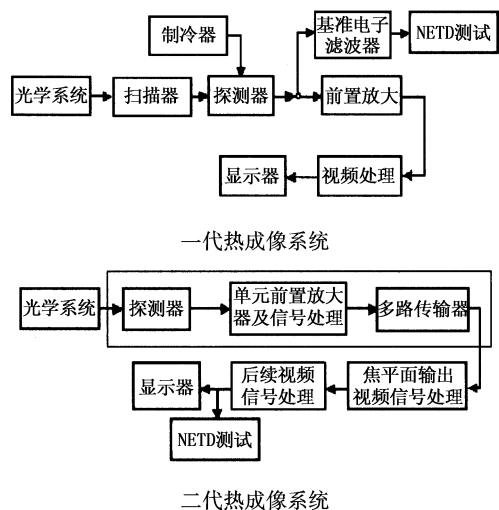


图1 两代热成像系统噪声测量点的不同

传统的噪声模型不能体现第二代热成像系统复杂噪声的三维特性,为了更客观、实际地评价二代热像仪的性能,发展了三维噪声技术。与传统噪声分析法相比,这种技术对凝视热成像系统的特性研究更加适用。

3 三维噪声模型

三维噪声模型包括噪声数据集的建立、方向操作因子、噪声的类别等。

3.1 三维噪声模型数据集的建立

(1) 以一个均匀黑体源作为目标连续采集多帧图像;

(2) 把得到的图像分成三维:水平方向 h , 垂直方向 v , 时间(帧)方向 t ;

(3) 数据集三维噪声的测量一般取探测器输出的数据或是视频输出口经过 A/D 转换的数据口,虽然原则上采集的帧数越多,其噪声数据集就越完备,但也需综合考虑存储数据的容量和处理速度,达到测量精度的要求即可。

数据集中用 $U(t, v, h)$ 代表 t 帧 v 行 h 列的输出,包含信号与噪声,如式(1)所示, S 为信号值,噪声被分解为 7 个噪声分量。

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

3.2 方向操作因子的引入

引入方向操作因子^[2]。

对于每个像素,平均值为:

$$D_T = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U(i, j, k) \quad (2)$$

对于每行,平均值为:

$$D_V = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m U(i, j, k) \quad (3)$$

对于每列,平均值为:

$$D_H = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n U(i, j, k) \quad (4)$$

方向操作因子 D_T, D_V, D_H 的物理意义: D_T 表示的是某一像元各帧信号的平均值; D_H 表示的是某一帧中某一列所有像元信号的平均值; D_V 表示的是某一帧中某一行所有像元信号的平均值。七个噪声分量依式(5)~(12)分别建立数据集:

$$N_{TVH} = (1 - D_T)(1 - D_V)(1 - D_H)U(i, j, k) \quad (5)$$

$$N_{VH} = D_T(1 - D_V)(1 - D_H)U(i, j, k) \quad (6)$$

$$N_{TV} = D_H(1 - D_T)(1 - D_V)U(i, j, k) \quad (7)$$

$$N_{TH} = D_V(1 - D_T)(1 - D_H)U(i, j, k) \quad (8)$$

$$N_V = (1 - D_V)D_H D_T U(i, j, k) \quad (9)$$

$$N_H = D_T D_V (1 - D_H)U(i, j, k) \quad (10)$$

$$N_T = D_V D_H (1 - D_T)U(i, j, k) \quad (11)$$

$$S = D_T D_V D_H U(i, j, k) \quad (12)$$

数据集 $N_T, N_V, N_H, N_{VH}, N_{TH}, N_{TV}, N_{TVH}$ 的均方根分别是 $\sigma_T, \sigma_V, \sigma_H, \sigma_{VH}, \sigma_{TH}, \sigma_{TV}, \sigma_{TVH}$, 从而得到了 7 个噪声分量。

系统总噪声可以表示为:

$$\sigma_{\text{sys}} = \sqrt{\sigma_{TVH}^2 + \sigma_{VH}^2 + \sigma_{TH}^2 + \sigma_{TV}^2 + \sigma_H^2 + \sigma_V^2 + \sigma_T^2} \quad (13)$$

3.3 三维噪声来源

3.3.1 时间噪声(Temporal Noise)

时间噪声是随着时间变化的噪声。测量时间噪声时,以一个均匀黑体源作为目标连续采集多帧图像,先将各帧对应点灰度做平均,得到消除时间噪声的一帧,再用每帧减去此帧,从而得到时间噪声数据集。由此可以计算其均方根噪声 σ_{Temporal} 。时间噪声等效温差(TNETD)可以用下式^[3]来表示:

$$\text{TNETD} = \frac{\sigma_{\text{Temporal}}}{\text{SiTF}} \quad (14)$$

其中, SiTF (signal-transfer function) 原信号传递函数。

若采用三维噪声模型,时间噪声进一步可以分为四个噪声分量 $\sigma_{TVH}, \sigma_{TV}, \sigma_{TH}, \sigma_T$, 于是时间噪声也可以表示为^[4]:

$$\sigma_{\text{Temporal}} = \sqrt{\sigma_{TVH}^2 + \sigma_{TV}^2 + \sigma_{TH}^2 + \sigma_T^2} \quad (15)$$

3.3.1.1 时间空间随机噪声 σ_{TVH}

代表基于不同帧、行、列输出的差异的噪声,或者说随着帧数变化时,处于不同行列的探测元输出所受的影响,存在于每个探测器单元的噪声是按时间变化的函数,各探测元在阵列中存在的差异又使得噪声呈现空间特性。它与典型的电子探测器噪声

很相近,这种噪声的功率谱为白噪声,经过滤波作用后不再是白噪声。在凝视探测器中的散粒噪声、Johnson 噪声、放大器噪声、数字化噪声等均属这类噪声。

3.3.1.2 时间行噪声 σ_{TV}

代表基于不同帧和行的差异的噪声,或者说一帧一帧变换时,不同行平均值输出所受的影响。这种噪声主要是在合并焦平面阵列各探测元输出时,多重通道的补偿电平上出现的低频噪声^[5-6]。

3.3.1.3 时间列噪声 σ_{TH}

代表时间和水平方向上的零点平均值变化,是时间和水平方向上每列数据的变化,主要来自于 $1/f$ 噪声和其他一些低频噪声。

3.3.1.4 帧间噪声 σ_T

这一噪声类型仅代表与时间有关的随机噪声,它在数据组中是以帧与帧平均值为变量。这种噪声很少出现,可以忽略。

3.3.2 空间噪声 (Spatial Noise)

空间噪声是另外一个评价成像质量的重要参数,我们也是以一个均匀黑体源作为目标连续采集数帧图像,将各帧对应点灰度做平均从而消除时间噪声,这样就得到空间噪声数据集,从而可以计算其均方根噪声 $\sigma_{Spatial}$ 。空间噪声等效温差 (SNETD) 可以用下式^[3]来表示:

$$SNETD = \frac{\sigma_{Spatial}}{SiTF} \tag{16}$$

采用三维噪声模型,空间噪声进一步可以分为三个噪声分量 $\sigma_{VH}, \sigma_V, \sigma_H$, 于是空间噪声也可以表示为:

$$SpatialNoise = \sqrt{\sigma_{VH}^2 + \sigma_V^2 + \sigma_H^2} \tag{17}$$

3.3.2.1 固定图像噪声 σ_{VH}

代表只基于不同行列之间的差异噪声,影响不同行列输出,但与帧无关。这一类型噪声由空间双向的零点平均值随机变化构成,且它无时间响应。这一噪声对应于成像中二维固定空间图形,通常发生在凝视成像系统中。

3.3.2.2 行噪声 σ_V

代表只基于不同行之间的差异的噪声,只影响不同行输出,与帧列无关。一般来讲,它表示数据在行与行之间固定的非均匀性。这种噪声是由 $1/f$ 噪声和通道之间不正确的增益的归一化处理引起的^[5-6]。

3.3.2.3 列噪声 σ_H

代表只基于不同列之间的差异的噪声,只影响不同列输出,与帧行无关。这一噪声类型代表仅在

水平方向上零点平均值的变化,是时间和水平方向上每列数据的平均值变化。在焦平面阵列的不同探测元的输出合并时,多重通道补偿电平的变化就属这类噪声。它的另一来源为在时间延迟和积分序列中不同探测元的多种多样的增益差异^[5-6]。

我们以一个均匀黑体源作为目标,采用三维噪声模型将各噪声分离出来,如图 2 所示。

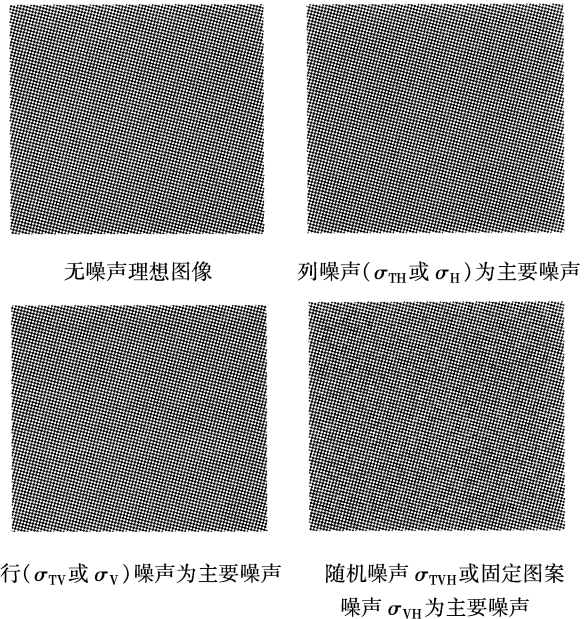


图 2 各噪声对输出图像的影响

4 实验结果分析

4.1 三维噪声测量

我们以一个均匀黑体源作为目标连续采集 20 帧图像。如图 3 所示,取图中黑体目标靶成像 2/3 的区域,把得到的图像分成三维:垂直方向 v , 水平方向 h , 时间 (帧) 方向 t 。按照式 (5) ~ (12) 分别求出三维噪声分量及各分量的等效温差,测量结果如表 1 所示。



图 3 测量示意图

4.2 空间、时间噪声测量

仍然用 4.1 中采集的数据,分别按照 (3.3.1), (3.3.2) 中的方法分别进行测量,然后与三维噪声模型计算出的时间、空间噪声结果进行比较,其结果见表 1。图 4、图 5 为叠加在信号上的空间噪声和时间噪声的三维分布图。

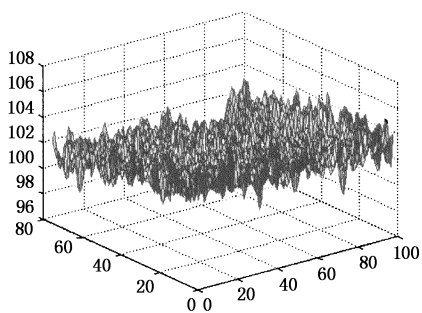


图4 空间噪声三维分布图

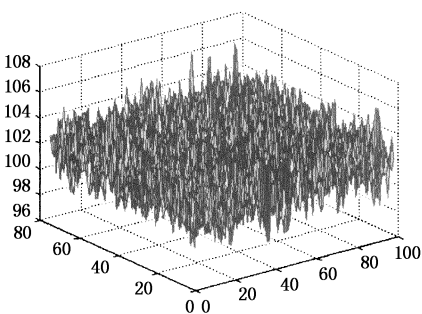


图5 时间噪声三维分布图

表1 噪声测量结果

积分时间	3ms		SiTF(灰度/K)
三维噪声分量	噪声均方根(灰度)	等效温差/mK	49.5595
TVH	1.3217	26.67	
VH	0.7717	15.57	
TH	0.3390	6.84	
TV	0.1699	3.43	
T	0.1584	3.20	
H	0.8717	17.59	
V	0.4733	9.55	
S	102.0794	—	
测量/计算方式	三维噪声模型	实际测量	
空间噪声	1.2567	1.2568	25.36
时间噪声	1.3841	1.3841	27.93
系统总噪声	1.8695	1.8696	37.72

表1列出了实验室测得的三维噪声各分量、由三维噪声表达的空间时间及总噪声、按定义测得的空间时间噪声、按定义测得的系统总噪声以及它们的等效温差。

5 三维噪声模型的应用

噪声将直接影响系统的探测能力与分辨能力,我们利用三维噪声模型的方式通过计算机模拟了各噪声分量对系统最小可分辨温差(MRTD)的影响。我们把噪声7个分量按照如表2所示方式排列。

表2 三维噪声分量

	随机	行方向	列方向	帧与帧之间
时间	$\sigma_{TVH} = 1.3217$	$\sigma_{TV} = 0.1699$	$\sigma_{TV} = 0.3390$	$\sigma_T = 0.1584$
空间	$\sigma_{VH} = 0.7717$	$\sigma_V = 0.4733$	$\sigma_H = 0.8717$	$S = 102.0794$

各噪声分量对四杆靶图像影响如图6所示,因为 σ_T 反映的是帧与帧之间的变化,因此暂不列出。

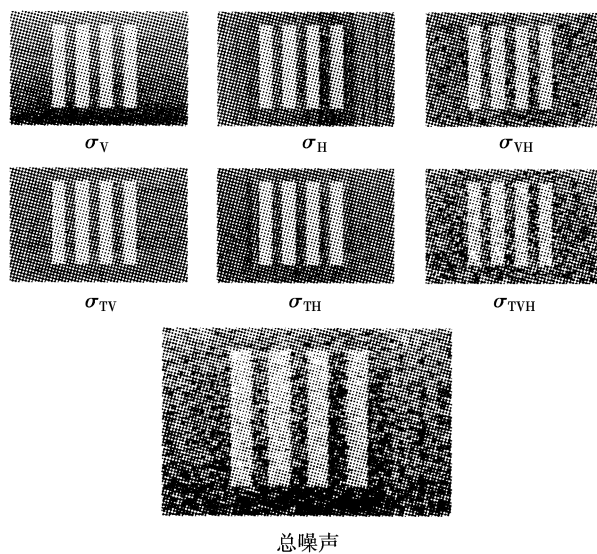


图6 各噪声分量对MRTD的影响

由表1及图6可知,不同分量的噪声随其大小及方向的不同对最小可分辨温差(MRTD)的影响也不同。通过三维噪声模型就可预测MRTD随各噪声分量变化的趋势^[7],并为定量评价各噪声分量对MRTD的影响模式提供依据。

6 总结

由实验数据通过比对可知,在实验室内,用三维噪声模型评价凝视型光电成像系统从时空域角度进行评价,得到较为满意的结果。并探讨了三维噪声各分量对MRTD的影响。这一工作为更加切合实际、准确地评价热成像系统性能提供新思路。

参考文献:

- [1] Scott L, Agostino J D. NVEOD FLIR92 Thermal imaging systems performance model [J]. Proc. SPIE, 1992, 1698: 194 - 203.
- [2] HOLST G C. Testing and evaluation of infrared image system [C]// JCD Publishing Winter Park: SPIE Optical Engineering Press, 1998.
- [3] Scott Miller, Brian Backer, Margaret Kohin, et al. Test methods and technology for uncooled imaging systems [C]// Proc. SPIE, 2004, 5407: 30 - 37.
- [4] O Shea, et al. Practical issues with 3D-noise measurements and application to modern infrared sensors [J]. Proc. SPIE, 2005, 5784: 262 - 271.
- [5] Kennedy, et al. Modeling noise in thermal imaging systems [J]. Proc. SPIE, 1993, 1969: 66 - 77.
- [6] Gu Wen-yun, Pi De-fu, Fang Hong-bing. Analysis on noise of staring thermal imaging system [J]. Infrared and Laser Engineering, 1999, 28(5): 48 - 51. (in Chinese)
- [7] D Agostino J. 3-D Analysis Framework and Measurement Methodology for Imaging System noise [J]. Proc. SPIE, 1991, 1488: 110 - 121.