

基于实测数据的红外成像系统噪声测量仿真

邹前进

(中国人民解放军63880部队,河南 洛阳 471003)

摘要:介绍了红外成像系统的噪声模型、测量方法和基于实测数据的噪声仿真法。通过分析二代红外成像和一代红外系统的不同特性,导出了更适合二代红外成像系统的三维噪声模型。就三维噪声各个分量表现方式进行了分析,给出了影响噪声分量的原因。结合噪声模型给出了红外成像系统噪声测量方法;最后进行了试验,给出了实验结果,并对模型结合实测数据用于红外图像噪声仿真进行了尝试,并在某试验中得到了初步应用。

关键词:红外成像系统;三维噪声模型;方向操作因子;噪声仿真

中图分类号:TN216 **文献标识码:**A

Noise Measurement and Simulation of Infrared Imaging System Based On Measured Data

ZOU Qian-jin

(63880 Unit, PLA, Luoyang 471003, China)

Abstract: In this paper, the noise model, measuring method and method of noise simulation based on measured data are discussed. The differences between first and second generation infrared imaging system are analyzed. The 3-D noise model is introduced, which is used to analyze the noise of the infrared imaging system. Every component is analyzed in detail. At last, the result of experiment is showed. The noise simulation method of combining noise model with measured data is attempted. It has been preliminarily applied in an experiment.

Key words: infrared imaging system; 3-D noise model; orientation operating gene; noise simulation

1 引言

在光电对抗试验中,红外注入式仿真试验因其不受环境限制和费用较低逐渐成为装备性能评估的一种重要手段。红外成像系统噪声对其成像质量有很大影响,在红外注入式仿真中噪声仿真是必须要考虑的。红外成像系统中存在各种类型的噪声,各种噪声起因不同,且总是以综合形式表现出来,因此分别对它们精确仿真是比较困难的。有试验条件和试验数据支持的噪声仿真,不同于单纯理论仿真,其仿真更有说服力。对红外成像系统噪声仿真,噪声计算模型和噪声提取方法合理建立至关重要,本文着重介绍红外成像系统噪声模型建立及其提取方法。

2 红外成像系统噪声特性分析

现在很多噪声模型都是发展于第一代红外成像系统,但第一代红外成像系统和第二代、第三代红外成像系统的噪声特性有很大的区别^[1]。

第一代红外成像系统探测器和后续电子处理系统是独立的。而二代以后红外成像系统信号的采样、放大、多路传输、处理与探测器均集成在一起,从而使得最后输出的噪声也是多种噪声的复合。

第一代红外成像系统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。第二代红

作者简介:邹前进(1982-),男,主要从事红外侦察告警,红外跟踪试验与仿真技术研究工作。E-mail: zylsunwing@yahoo.cn
收稿日期:2008-04-04; **修订日期:**2008-05-27

外成像系统的噪声变的相当复杂,而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^[1]。

传统的噪声模型不能体现二代以后红外成像系统复杂噪声的三维特性,为了更客观、实际地评价现代热像仪的性能,发展了三维噪声技术。1990年前后美国陆军夜视与电子传感器管理局提出了三维噪声模型。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:图像数据用一个全程常数和7种有特色的噪声的综合组成^[2]。

3 噪声模型和测量

不同红外成像系统其噪声差异很大,而同一红外成像系统其各个噪声分量有不同的表现方式和来源。

3.1 三维噪声分类

用 $U(t, \nu, h)$ 代表 t 帧 ν 行 h 列的输出,包含信号和噪声,信号和噪声的单位都是“灰度”:

$$U(t, \nu, h) = S + N_t + N_\nu + N_h + N_{\nu\nu} + N_{hh} + N_{\nu h} + N_{t\nu h} \quad (1)$$

式中, S 为观察均匀背景时各个单元输出的均值, S 项后的七个噪声项是随时间、空间的波动,由上知它们为均值为0、均方根为 σ 的输出噪声。

3.1.1 时间噪声

时间噪声是随着时间变化的噪声。根据三维噪声模型,时间噪声可以分为四个噪声分量 $N_t, N_\nu, N_{hh}, N_{t\nu h}$ 。

3.1.1.1 时间噪声 N_t

代表与时间有关帧随机噪声。这类噪声很少出现,可以忽略。 N_t 均方根为 σ_t 。

3.1.1.2 时间行噪声 N_ν

代表帧变换时不同行平均值输出所受的影响。主要是在合并焦平面阵列探测元输出时,多重通道补偿电平上的低频噪声。 N_ν 均方根为 σ_ν 。

3.1.1.3 时间列噪声 N_h

代表帧变换时不同列输出所受的影响。主要来自于 $1/f$ 噪声和其他一些低频噪声。 N_h 均方根为 σ_h 。

3.1.1.4 时间行列噪声 $N_{t\nu h}$

代表帧变换时不同行列的探测元输出所受的影响。它与典型的电子探测器噪声很相近,其功率谱为白噪声。经过滤波作用后不再是白噪声。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。 $N_{t\nu h}$ 均方根为 $\sigma_{t\nu h}$ 。

3.1.2 空间噪声

空间噪声是另外一个评价成像质量的重要参数。根据三维噪声模型,空间噪声可分为三个噪声分量 $N_\nu, N_h, N_{\nu h}$ 。

3.1.2.1 行噪声 N_ν

代表基于不同行之间的差异的噪声。它表示数据在行与行之间固定的非均匀性。这类噪声是由 $1/f$ 噪声和通道之间不正确的增益归一化处理引起的。 N_ν 均方根为 σ_ν 。

3.1.2.2 列噪声 N_h

代表基于不同列之间的差异的噪声。这种噪声由探测器不同探测元输出合并时多重通道补偿电平的变化和时间延迟、积分序列中不同探测元多种多样的增益差异所导致。 N_h 均方根为 σ_h 。

3.1.2.3 行列噪声 $N_{\nu h}$

代表基于不同行列之间的差异噪声。这类噪声对应于图像中二维固定空间图形,通常发生在凝视成像系统中。 $N_{\nu h}$ 均方根 $\sigma_{\nu h}$ 。

系统总噪声可以表示为:

$$\sigma_{\text{sys}} = \sqrt{\sigma_t^2 + \sigma_\nu^2 + \sigma_h^2 + \sigma_{t\nu h}^2 + \sigma_\nu^2 + \sigma_h^2 + \sigma_{\nu h}^2} \quad (2)$$

红外成像系统各个噪声分量噪声均方根、系统信号传递函数 SiTF (灰度/K) 和其对应等效温差满足公式(3)^[3-4]:

$$\sigma_{\text{NETD}} = \frac{\sigma}{\text{SiTF}} \quad (3)$$

3.2 红外系统噪声分析

对于不同的红外系统,其主要的三维噪声分量与其系统工作方式相关:串扫系统等效于单元红外成像系统,其噪声主要为时间噪声,而并扫系统和凝视系统由于探测像元的差异问题,除时间噪声外行噪声、行列噪声等空间噪声成为影响红外成像系统性能不可忽略的因素。

目前为止,3D 噪声因子中只有 $\sigma_{t\nu h}$ 建立了计算模型,其他噪声因子可以参照美国 NVEOD FLIR92 模型给出的缺省值。在红外成像系统噪声仿真中,可应用这些缺省值,也可以用测量值^[1]。

3.3 噪声测量

为了方便求出7种噪声的大小,引进方向操作因子 D_t, D_ν, D_h 的概念,其定义为^[1]:

$$D_t = \frac{\overline{g(t, \nu, h)}}{L} = \frac{1}{L} \sum_{\nu_0}^L g(t, \nu, h) \quad (4)$$

$$D_\nu = \frac{\overline{g(t, \nu_0, h)}}{M} = \frac{1}{M} \sum_{\nu_0}^M g(t, \nu_0, h) \quad (5)$$

$$D_h = \overline{g(t, \nu, h_0)} = \frac{1}{N} \sum_{h_0}^N g(t, \nu, h_0) \quad (6)$$

方向操作因子 D_t, D_ν, D_h 的物理意义很明确: 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_ν 是某一帧中某一行所有像元信号的平均值。当操作因子作用于图像时, 意味着去除该方向的噪声。因此要求出此方向噪声对三维噪声的贡献量, 必须引入相反操作, 求取信号与噪声的公式为:

$$N_{\nu h} [(1 - D_t)(1 - D_\nu)(1 - D_h)] \{U(t, \nu, h)\}$$

$$N_{\nu h} [D_t(1 - D_\nu)(1 - D_h)] \{U(t, \nu, h)\}$$

$$N_\nu [(1 - D_t)(1 - D_\nu)D_h] \{U(t, \nu, h)\}$$

$$N_\nu [D_t(1 - D_\nu)D_h] \{U(t, \nu, h)\}$$

$$N_{th} [(1 - D_t)D_\nu(1 - D_h)] \{U(t, \nu, h)\}$$

$$N_h [D_tD_\nu(1 - D_h)] \{U(t, \nu, h)\}$$

$$N_t [(1 - D_t)D_\nu D_h] \{U(t, \nu, h)\}$$

$$S [D_t D_\nu D_h] \{U(t, \nu, h)\}$$

操作因子满足交换定律、分配率和等幂律:

$$D_\nu D_h \{U(t, \nu, h)\} = D_h D_\nu \{U(t, \nu, h)\}$$

$$D_\nu \{U(t, \nu, h) + V(t, \nu, h)\} = D_\nu \{U(t, \nu, h)\} +$$

$$D_\nu \{V(t, \nu, h)\}$$

$$D_\nu D_\nu \{U(t, \nu, h)\} = D_\nu (D_\nu \{U(t, \nu, h)\})$$

以某常温黑体为目标, 使用某红外成像系统录取 1500 帧图像, 使用上述方法提取的噪声如图 1 ~ 图 4 所示。

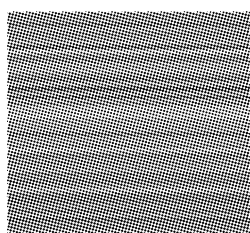


图1 行(时间行)噪声

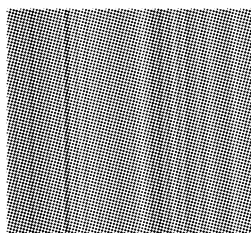


图2 列(时间列)噪声

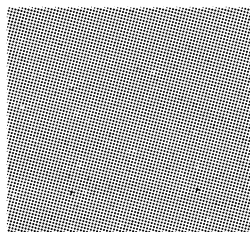


图3 行列噪声

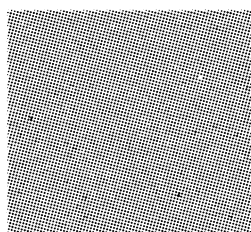


图4 时间行列噪声

各种噪声的复合即可以得到红外图像的总噪声如图 5 所示。叠加所有图像平均灰度值后与某帧原始图像相减结果如图 6 所示, 只差约 1 个灰度的时间噪声。

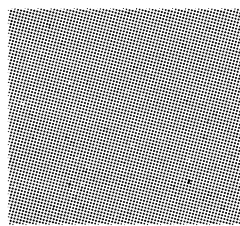


图5 图像总噪声

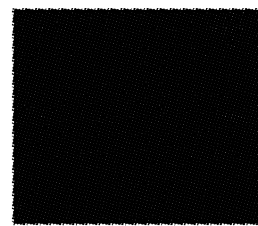


图6 剩余噪声

4 数据处理

4.1 噪声数据的准备

试验数据准备: 要有一个符合一定要求的数据源, 分析三维噪声的数据源要求如下。

(1) 以一个均匀黑体源为目标, 热像仪采集其连续的数字化图像, 形成噪声数据库。

(2) 得到的数据流可分为三维, 即帧方向 t , 垂直方向 ν , 水平方向 h , 如果一帧图像中共有 $M \times N$ 个像素, 数据库中包含 L 帧图像, 则:

$$0 \leq \nu \leq M - 1$$

$$0 \leq h \leq N - 1$$

$$0 \leq t \leq L - 1$$

(3) 数据库大小受硬件内存、带宽、数据处理时间的约束, 原则上越大越好, 太小的数据库会降低 3D 元素的分辨率。

(4) 当不需要整帧数据时, 应尽可能采用图像中心部分的数据。

本文使用红外某系统常温黑体和高温黑体作为目标, 红外成像系统每次录取 1min 图像。根据情况取均匀图像区域进行噪声测量。

4.2 时间、空间噪声

在图 7 和图 8 边缘存在灰度变化剧烈像素点, 因为: 首先成像系统与面源黑体未使用平行光管对接, 像边缘包含反射了环境辐射; 其次红外成像系统探测器边缘存在死点。所以要尽可能取靠近目标中心的图像进行噪声的测量。

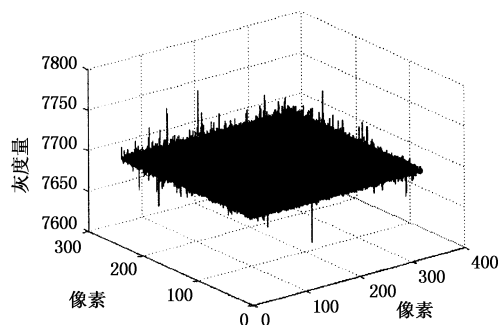


图7 时间噪声

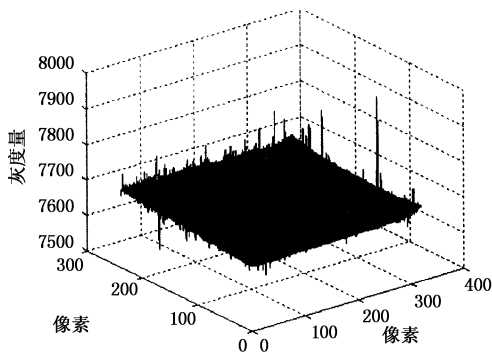


图8 空间噪声

表1 噪声测量结果

(单位:灰度)

	S	σ_{vh}	σ_h	σ_v	σ_{vth}
1	7332	1.4186	1.6025	0.8694	2.4297
2	7647	1.4367	1.6229	0.8811	2.4607
3	7704	1.4450	1.6322	0.8862	2.4749
4	12242	2.0812	1.7862	0.9698	2.7083
5	11381	2.1822	1.9002	1.0317	2.8812
6	11010	2.1287	1.8159	0.9859	2.7534
均值		1.7821	1.7266	0.9373	2.6183

表1 列出部分在不同温度下均匀背景所测量的某红外成像系统三维噪声。其总三维噪声 σ 平均值为 4.1271 灰度。在前期的鉴定试验中测得系统 NETD 为 21mK, SiTF 为 194.5124(灰度/K), 结合公式(3)计算系统噪声为 4.085 灰度。由试验和表3得, σ_{vth}, σ_v 和 σ_h 随背景温度变化不大, 变化剧烈的是 σ_{vh} , 但上述四种噪声的灰度均值都在 10^{-12} 量级。这对内场红外图像噪声仿真很有意义: 对于某一装备其 σ_{vth} 是一个相对固定的值, 通过装备固有参数和式(3)可以计算得到 σ_{vth} , 根据设备情况、使用环境和噪声模型估计其他噪声分量大小; 也可以根据试验前的实测数据直接进行噪声测量, 确定各个噪声的关系实现红外系统的噪声仿真。

4.3 初步仿真

图9 为实测红外告警图像。为实现对比, 假设 σ_{vth} 为 4.7 个灰度, 中等噪声情况, 采用已有试验数据和模型默认参数进行噪声的仿真^[5-6]。仿真图像如图10所示。

由图10 对比实测图像知使用红外实测数据结合三维噪声模型, 可以很好地仿真红外成像系统噪声对图像的影响, 红外图像更加逼真, 并已经应用于某光电对抗试验的侦查告警注入式仿真。为后期的红外捕获跟踪等红外注入式试验提供支持, 由红外

图像所提取的三维噪声还可以用于红外成像系统作用距离的修正和估算。

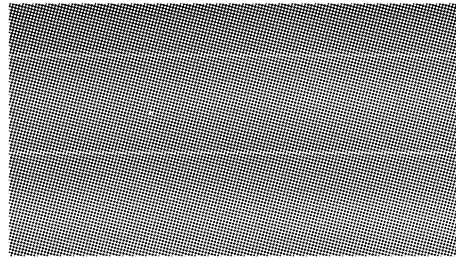


图9 实测红外告警图像

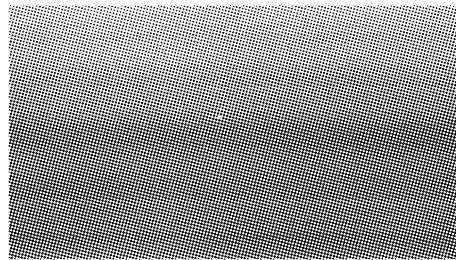


图10 噪声叠加后长波红外图像

5 结束语

通过试验数据的对比, 在试验过程中测量计算得到红外成像系统的时间行列噪声与背景温度关系不大。这为内场红外成像系统噪声仿真提供了新思路: 试验前通过在红外成像系统前放置均匀背景, 提取得到红外成像系统的各个噪声分量, 确定需要仿真的各个噪声分量与时间行列噪声的关系, 然后结合红外系统固有参数完成红外成像系统的噪声仿真, 因有实测数据的介入噪声仿真结果更有说服力。多次积累的噪声与背景温度、噪声与使用条件的关系对未来红外注入式仿真有很大意义。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Phil Richardson, Brian Miller. Third generation FLIR simulation at NVESD [J]. SPIE Proceeding, 2007, 6543: 65430K-1-65430K-11.
- [3] Zuo Yue-ping, Zhang Jian-qi, Huang Xi. Influence of detector noise on infrared images [J]. SPIE Proceeding, 2001, 4548: 381-386.
- [4] 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.
- [5] 史忠彦, 张坤, 宋凯. 红外多元探测器的噪声仿真研究[J]. 红外技术, 2003, 25(6): 59-63.
- [6] 魏宏建, 任浩, 沈同圣. 红外图像探测器噪声的数值模拟方法[J]. 航天电子对抗, 2002, 6: 33-35.