

文章编号:1001-5078(2024)08-1241-09

· 红外材料与器件 ·

## 凝视型红外探测系统的三维噪声研究

赵晟, 赵亚南, 刘建旭, 朴宇鹏, 吴玮  
(上海航天控制技术研究所, 上海 201109)

**摘要:**应用三维噪声模型分析了凝视型中波红外探测系统的噪声特性,并研究了信息处理方法对各类噪声分量的抑制效果。在不同积分时间下对不同温度的面源黑体连续采集图像数据并进行分析,发现增加积分时间和黑体入射能量时,各噪声分量都先以非线性形式迅速减小再逐渐趋于恒定,且各噪声分量会呈现出各自特有的图像模式。研究发现在未经任何信息处理的原始图像中,空间噪声是系统噪声的主要成分;综合运用空间和时间噪声抑制方法后,空间噪声几乎被完全抑制,时间噪声降低约一半,瞬态像素噪声成为噪声的主要成分。

**关键词:**三维噪声;中波红外;凝视型探测系统;噪声抑制

**中图分类号:**TN215;TP73 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2024.08.010

### Research on three-dimensional noise of staring infrared detection system

ZHAO Sheng, ZHAO Ya-nan, LIU Jian-xu, PIAO Yu-peng, WU Wei  
(Shanghai Aerospace Control Technology Institute, Shanghai 201109, China)

**Abstract:**In this paper, a three-dimensional noise model is applied to analyze the noise characteristics of a gaze-type mid-wave infrared detection system, and the suppression effects of information processing methods on various types of noise components are investigated. The image data are continuously collected and analyzed at different integration times for different temperatures of surface source blackbodies, and it is found that when the integration time and the incident energy of the blackbody increase, each noise component decreases rapidly and then tends to be constant in a nonlinear form, and each noise component presents its own unique image pattern. It is also found that spatial noise is the main component of system noise in the original image without any information processing. After comprehensive application of spatial and temporal noise suppression methods, the spatial noise is almost completely suppressed, the temporal noise is reduced by about half, and the transient pixel noise becomes the main component of noise.

**Keywords:**three-dimensional noise;midwave infrared;staring detection system;noise suppression

#### 1 绪论

红外探测系统的性能受系统噪声影响很大,因此有必要对噪声进行准确的建模和分析。凝视型红外探测系统的噪声相当复杂,此类系统采用先进的焦平面阵列技术和复杂的信号处理电路,其噪声包括散粒噪声、 $1/f$ 噪声、固定图形噪声等多种不同类型和来源的分量,这些分量参杂在一起,所形成的总体噪声在图像的水平 and 垂直方向都具有独特特征且

会随着时间变化,呈现出复杂的三维特性,这种复杂性对噪声模型的准确性提出了很高的要求。

目前国内通常以噪声等效温差(Noise Equivalent Temperature Difference, NETD)评价时间噪声,以非均匀性评价空间噪声,对噪声的分类较为笼统,没有精确地分离和评价各个噪声分量,不能体现凝视型探测系统中噪声的复杂三维特性。美国陆军夜视与电子传感器管理局<sup>[1-2]</sup>提出的三维噪声模型将

噪声置于一个三维坐标系中(时间轴、图像垂直轴及水平轴)来考察,将系统噪声划分为7个线性无关的分量来分析。该方法有助于对噪声细节的解析和控制,经过数年发展已成为美国凝视型红外探测系统静态性能评估体系的重要基础。

目前国内已有研究人员使用三维噪声模型对凝视型红外探测系统的噪声进行了分析<sup>[3-9]</sup>。房红兵<sup>[3]</sup>等人介绍了三维噪声技术的分析方法和理论框架,指出三维噪声技术比传统的噪声分析方法更能体现凝视型红外探测系统的噪声特性。唐海蓉<sup>[4]</sup>等人着重研究了三维噪声模型中各个分量的含义和测量方法,并通过与文献数据的比较初步证实了三维噪声模型的合理性。陈凯<sup>[5]</sup>等人针对长波红外系统信噪比低的突出问题,指出了传统噪声分析方法的不足,并设计出一套长波红外三维噪声测试系统。王晓璇<sup>[6]</sup>等人对比分析了采用32元线列探测器的一代扫描型热像仪和采用288×4焦平面探测器的二代热像仪的三维噪声,发现一代热像仪中空间噪声占主导地位,空间噪声和时间噪声相差较大,而二代热像仪的时间与空间噪声相对比较平均。胡明鹏<sup>[7]</sup>等人就三维噪声各分量对NETD的影响进行了探讨。邹前进<sup>[8]</sup>等人尝试将模型与实测数据结合起来用于红外图像噪声仿真,并在某光电对抗试验的侦查告警环节中进行了初步应用。

上述工作主要聚焦于三维噪声分析方法的可行性和准确性研究,大多只在单一积分时间和黑体温度下采集有限的样本进行分析,没有进一步考察积分时间和黑体温度变化时各噪声分量的变化规律,也没有研究信息处理算法对各类噪声分量的影响。针对这两方面问题,这篇论文首先基于在不同条件下获取的大量数据,研究了各个三维噪声分量的大小和图像特征关于系统入射能量和积分时间的变化规律,然后分析了典型噪声抑制算法对各个噪声分量大小的影响。

## 2 三维噪声模型

设探测器以一个均匀黑体源作为目标连续采集T帧的H行V列图像,把得到的图像序列看作一个三维数据集 $U(h, v, t)$ ,其中 $h, v, t$ 分别代表水平、垂直和时间(帧)方向。如公式(1)所示, $U(h, v, t)$ 可以分解为信号值S和7个线性无关的噪声分量:

$$U(h, v, t) = S + N_H + N_V + N_{HV} + N_{HT} + N_{VT} + N_{HVT} + N_T \quad (1)$$

各个噪声分量的含义如表1所示,其中 $N_H, N_V$ 和 $N_{HV}$ 与时间无关,对应于探测中的固定空间图形,可通称为空间噪声; $N_{HT}, N_{VT}, N_{HVT}$ 与时间和空间均有关, $N_T$ 仅与时间相关,相对于空间噪声而言,这四个分量最明显的特征就是其瞬态特性,因此后文将它们统称为时间噪声。各个噪声分量的具体含义与主要来源如表1所示。

表1 各噪声分量的含义与来源

Tab.1 Meanings and sources of noise components

噪声分量		噪声含义	噪声主要来源
空间噪声	固定行噪声, $N_H$	不同行之间的差异	探测器非均匀性、通道增益、入射能量非均匀性
	固定列噪声, $N_V$	不同列之间的差异	探测器非均匀性、入射能量非均匀性
	固定像素噪声, $N_{HV}$	不同像素之间的差异	探测器非均匀性
时间噪声	瞬态行噪声, $N_{HT}$	逐帧变化时,不同行输出平均值所受的影响	散粒噪声、暗电流噪声、放大器噪声、数字化噪声
	瞬态列噪声, $N_{VT}$	逐帧变化时,不同列输出平均值所受的影响	1/f噪声和其他低频噪声
	瞬态像素噪声, $N_{HVT}$	逐帧变化时,不同像素输出所受的影响	1/f噪声和其他低频噪声
	帧间噪声, $N_T$	图像整体均值的帧间变化	探测器制冷深度变化、入射能量起伏

信号值S和7个噪声分量可由公式(2)~(12)计算,其中算符 $D_H$ 表示某一帧某一列所有像元信号的平均值;算符 $D_V$ 表示某一帧某一行所有像元信号的平均值;算符 $D_T$ 表示某一像元各帧信号的平均值。

$$N_H = (1 - D_H)D_V D_T U(h, v, t) \quad (2)$$

$$N_V = (1 - D_V)D_H D_T U(h, v, t) \quad (3)$$

$$N_T = (1 - D_T)D_H D_V U(h, v, t) \quad (4)$$

$$N_{HV} = D_T(1 - D_H)(1 - D_V)U(h, v, t) \quad (5)$$

$$N_{HT} = D_V(1 - D_H)(1 - D_T)U(h, v, t) \quad (6)$$

$$N_{VT} = D_H(1 - D_V)(1 - D_T)U(h, v, t) \quad (7)$$

$$N_{HVT} = (1 - D_H)(1 - D_V)(1 - D_T)U(h, v, t) \quad (8)$$

$$S = D_H D_V D_T U(h, v, t) \quad (9)$$

$$D_H = \frac{1}{H} \sum_{h=1}^H U(h, v, t) \quad (10)$$

$$D_V = \frac{1}{V} \sum_{v=1}^V U(h, v, t) \quad (11)$$

$$D_T = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T U(h, v, t) \quad (12)$$

可以用  $N_H$ 、 $N_V$ 、 $N_{HV}$ 、 $N_{HT}$ 、 $N_{VT}$ 、 $N_{HVT}$ 、 $N_T$  的均方根  $\sigma_H$ 、 $\sigma_V$ 、 $\sigma_{HV}$ 、 $\sigma_{HT}$ 、 $\sigma_{VT}$ 、 $\sigma_{HVT}$ 、 $\sigma_T$  衡量各个噪声分量的大小。需要说明的是,  $N_T$  代表了单帧图像整体均值的变化, 而对图像信息处理系统而言, 此类变化并不影响图像角点、边缘等空间高频信息的提取<sup>[9~13]</sup>, 对系统的危害可忽略不计, 因此后续的分析将不涉及  $N_T$ 。则可定义总空间噪声  $N_{Space}$ 、总时间噪声  $N_{Time}$ 、总体噪声  $N_{Total}$  如公式(13)~(15)所示, 且它们的大小  $\sigma_{Space}$ 、 $\sigma_{Time}$  和  $\sigma_{Total}$  与其他噪声分量的大小满足关系式(16)~(18):

$$N_{Space} = N_H + N_V + N_{HV} \quad (13)$$

$$N_{Time} = N_{HT} + N_{VT} + N_{HVT} \quad (14)$$

$$N_{Total} = N_{Space} + N_{Time} \quad (15)$$

$$\sigma_{Space} = \sqrt{\sigma_H^2 + \sigma_V^2 + \sigma_{HV}^2} \quad (16)$$

$$\sigma_{Time} = \sqrt{\sigma_{HT}^2 + \sigma_{VT}^2 + \sigma_{HVT}^2} \quad (17)$$

$$\sigma_{Total} = \sqrt{\sigma_{Space}^2 + \sigma_{Time}^2} \quad (18)$$

### 3 试验方案

如图 1 所示, 完整的试验方案包括面源黑体、中波红外探测设备和数据采集设备, 黑体尺寸远大于探测设备光学系统的入瞳孔径大小, 以保证探测设备视场内均是黑体辐射面。其中红外探测设备采用国产制冷型中波焦平面探测器, 探测器分辨率为  $128 \times 128$  像素, 探元间隔  $30 \mu\text{m}$ , 工作波段  $3.7 \sim 4.8 \mu\text{m}$ , NETD 为  $30 \text{ mK}$ 。试验全程采用同一个探测器采集数据, 由 FPGA 采集并传输至数据存储设备中, 图像数据的采样频率为  $100 \text{ Hz}$ 。在各档积分时间和黑体温度下, 均选取 500 帧连续图像进行分析。

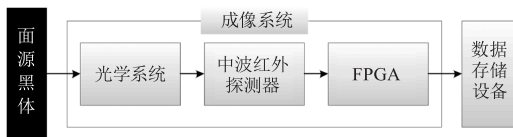


图 1 试验方案

Fig. 1 Experimental scheme

为了贴近人眼直观感受和一般图像信息处理流程, 研究中所有涉及噪声图案的部分使用灰度表达; 而为了体现噪声对系统信噪比的影响, 涉及噪声大小的部分则以 NETD 表达(单位:  $\text{mK}$ )。以积分时间

等于  $2.1 \text{ ms}$  的情况为例, 如图 2 所示, 探测系统的图像灰度与黑体温度间关系可以用二阶多项式拟合。因此在计算 NETD 时可以先对拟合曲线求导, 得出各个温度点下灰度关于黑体温度的斜率, 再用噪声的灰度统计值除以相应温度点下的斜率即可。

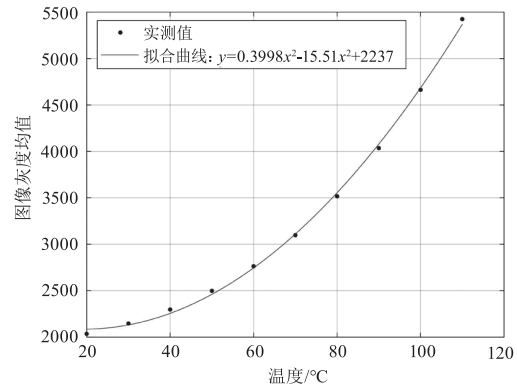


图 2 积分时间  $2.1 \text{ ms}$  下温度与图像灰度关系

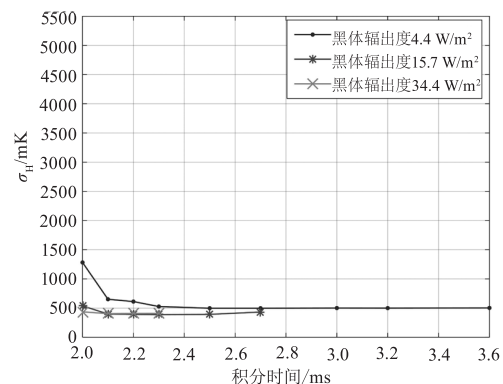
Fig. 2 The relationship between temperature and grayscale under the integration time of  $2.1 \text{ ms}$

### 4 三维噪声分析

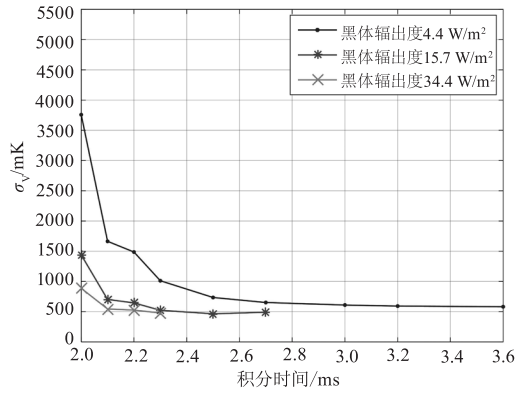
#### 4.1 空间噪声的变化规律

不同黑体辐出度下, 各空间噪声分量的大小随积分时间变化的情况如图 3 所示(由于探测器响应饱和, 辐出度越高的曲线对应的积分时间范围越窄)。由图可知, 各项空间噪声的大小与积分时间呈非线性关系, 随着积分时间的增大, 噪声首先迅速减小接着逼近恒定值, 黑体辐出能量越大噪声就越早接近恒定, NETD 也越小。三个噪声分量中  $\sigma_{HV}$  和  $\sigma_V$  明显大于  $\sigma_H$ 。

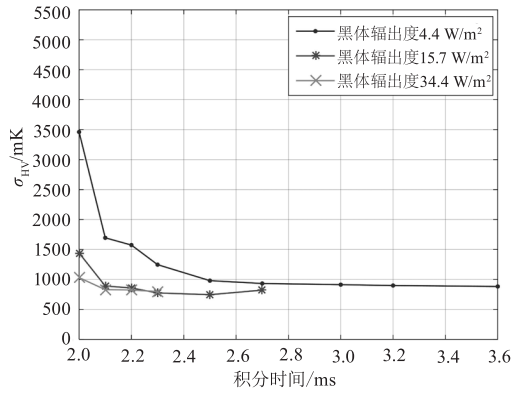
不同积分时间下, 各空间噪声分量的大小随黑体辐出度变化的情况如图 4 所示。由图可知, 与积分时间的影响相似, 黑体能量增大时空间噪声也是先以非线性方式迅速减小。积分时间为  $2.2 \text{ ms}$  且黑体辐亮度超过  $35 \text{ W/m}^2$  时, 各项噪声有随黑体能量逐渐增大的趋势, 这主要是探测器接近饱和, 响应进入非线性区, 图像灰度关于黑体辐出度的斜率变小所致。



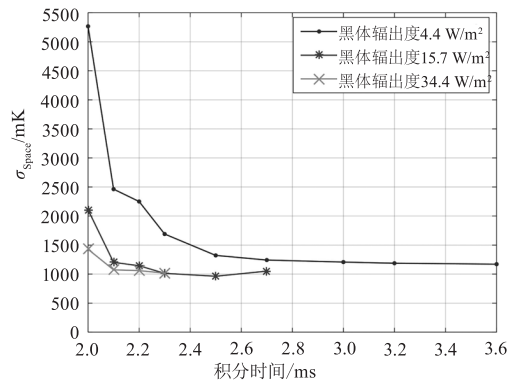
(a) 积分时间对  $\sigma_H$  的影响



(b) 积分时间对 $\sigma_v$ 的影响



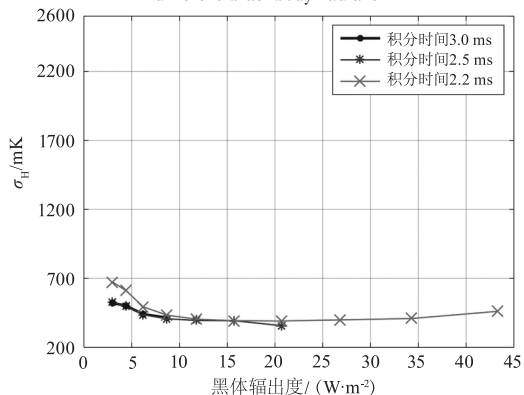
(c) 积分时间对 $\sigma_{HV}$ 的影响



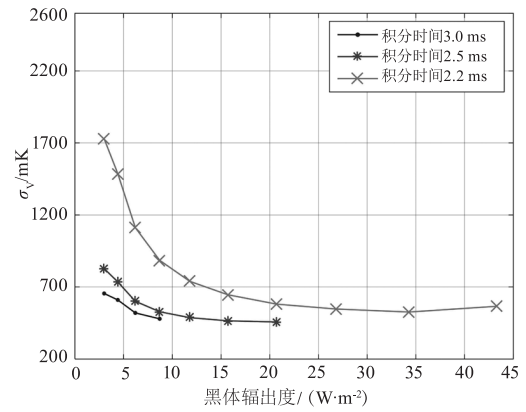
(d) 积分时间对 $\sigma_{Space}$ 的影响

图3 不同黑体辐出度下积分时间对空间噪声的影响

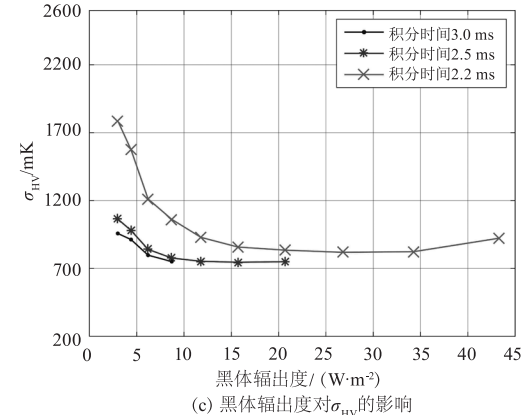
Fig.3 Effects of integration time on spatial noise under different blackbody radiant



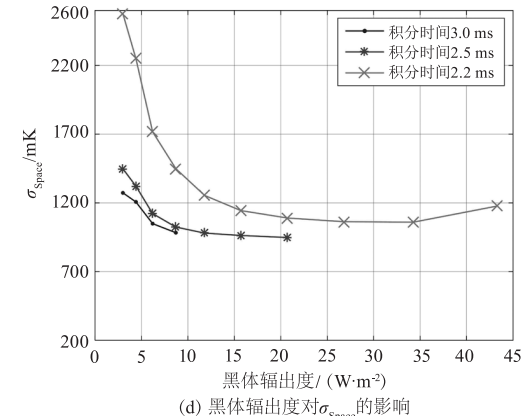
(a) 黑体辐出度对 $\sigma_H$ 的影响



(b) 黑体辐出度对 $\sigma_v$ 的影响



(c) 黑体辐出度对 $\sigma_{HV}$ 的影响



(d) 黑体辐出度对 $\sigma_{Space}$ 的影响

图4 不同积分时间下黑体辐出度对空间噪声的影响

Fig.4 Effects of blackbody radiant on spatial noise under different integration time

不同积分和黑体辐出度下,  $N_H$ 、 $N_V$ 、 $N_{HV}$  和  $N_{Space}$  的灰度图案如图5所示。当积分时间较长、黑体能量较高时, 图像的  $N_H$  和  $N_V$  图案呈中间亮两边暗的特征,  $N_H$  图中最亮与最暗点间差值的 NETD 为 1299 mK,  $N_V$  图中最亮与最暗点间差值的 NETD 为 1399 mK, 参考  $N_{Space}$  的图案可知, 这主要是因为光学系统透镜与探测器焦平面形状不一致, 探测器中心接收到的入射能量多于四个角, 进而导致中间的行、列具有更高的响应均值, 这是一种由入射能量引起的非均匀性。该非均匀性随着  $N_H$  和  $N_V$  被剥离后,

$N_{HV}$ 便呈现出均匀的随机分布特征,经统计其分布符合均值为0、标准差为750 mK的正态分布,该特征从 $N_{Space}$ 图中是无法观测到的。当积分时间较短、黑体能量较低时,空间噪声图案中呈现出几种和探测器非线性响应相关的模式: $N_H$ 和 $N_V$ 图不再出现中间高于两边的特征, $N_H$ 图会出现逐行明暗相间的条纹,相邻条纹间差值的NETD约为2 K,这主要是由于探测器以双通道模式逐行读取数据时,两个通道的增益系数不同所导致; $N_V$ 图的明暗变化较为随机,最亮与最暗点间差值的NETD为17 K左右,这种差异与探测器列通道增益的非均匀性、像元间差异有关; $N_{HV}$ 的分布呈现出固定条纹,最亮与最暗点间差值的NETD为12 K左右,这说明探测器像元间存在固定模式的差异,和电路设计、器件制造等因素有关。进一步地,受制造偏差等因素的影响, $N_{HV}$ 的条纹样式在不同探测器中可能存在差异,而此研究受试验条件所限,始终采用单一探测器采集数据,因此计划在后续研究中对多个探测器数据后进一步确认 $N_{HV}$ 的条纹特征和产生原因。在 $N_{Space}$ 图案中,三种非线性噪声模式混叠在一起,互相遮蔽或干扰,只有分解到三个子方向上才能被清楚地观测到。

综上所述,当积分时间较长、黑体辐出度较高时,探测器积分电容内电荷较充足,像元响应的线性度较好,空间噪声主要取决于入射能量的非均匀性、像元响应率差异等因素,总体分布较为均匀。但当积分电容内电荷较少时,探测器容易产生非线性响应,像元器件和读入电路等方面缺陷所导致的噪声变得较为显著。三维噪声法可以将混叠在一起的多种空间噪声清晰地分解开来,找到噪声中存在的固定模式,便于后续对噪声源的分析与定位。

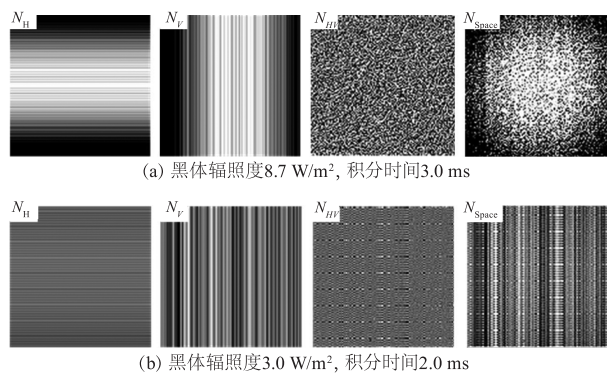
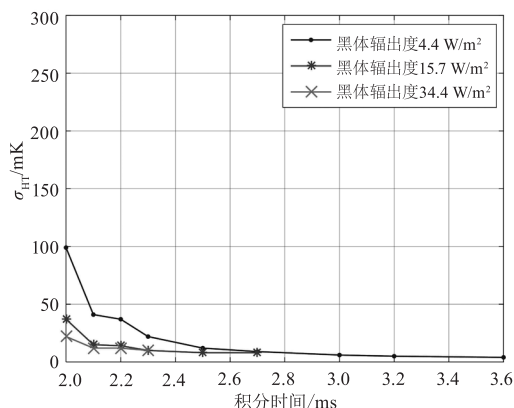


图5 不同条件下空间噪声的灰度图案

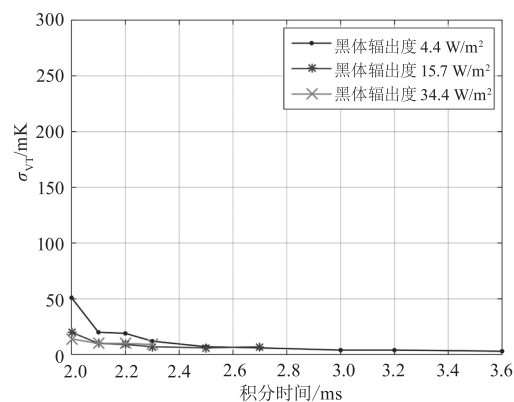
Fig. 5 Grayscale patterns of spatial noise under different conditions

#### 4.2 时间噪声的变化规律

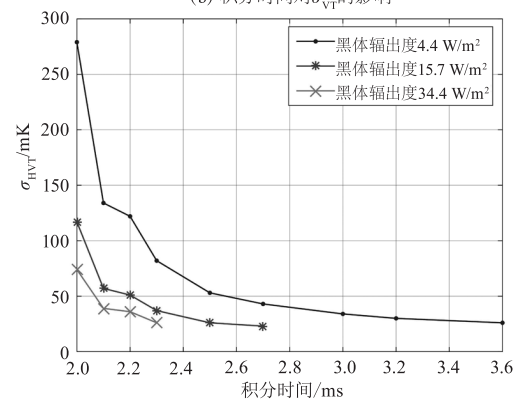
由图6和7所示,积分时间和黑体辐出度对时间



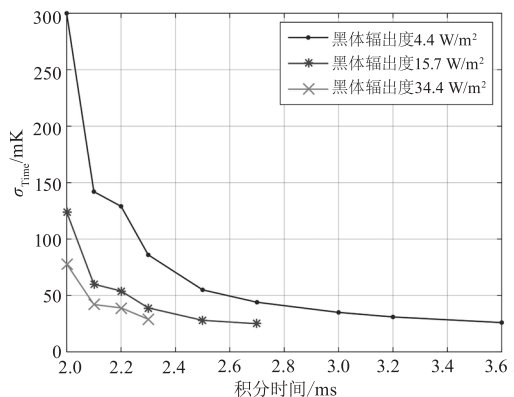
(a) 积分时间对 $\sigma_{HV}$ 的影响



(b) 积分时间对 $\sigma_V$ 的影响



(c) 积分时间对 $\sigma_{HVT}$ 的影响



(d) 积分时间对 $\sigma_{Time}$ 的影响

图6 不同黑体辐出度下积分时间对时间噪声的影响

Fig. 6 Effects of integration time on temporal noise under different blackbody radiant



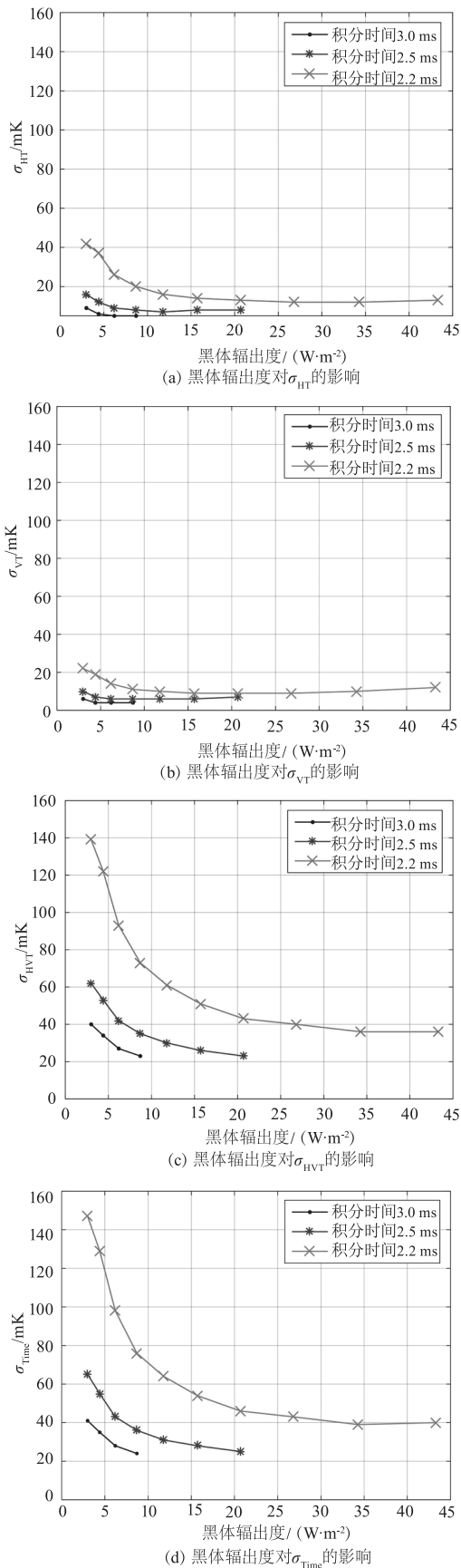


图7 不同积分时间下黑体辐出度对时间噪声的影响  
Fig. 7 Effects of blackbody radiant on temporal noise under different integration time

噪声的影响与空间噪声相似,随着积分时间和黑体辐出度的增大,各时间噪声分量以非线性形式迅速减小,后逐渐趋于恒定。三个噪声分量中  $\sigma_{HVT}$  显著大于  $\sigma_{HT}$  和  $\sigma_{VT}$ ,是时间噪声的主要成分。暗电流和载流子涨落是引起瞬态噪声的主要因素<sup>[14-16]</sup>,而黑体辐出度增加时暗电流和载流子浓度都会同步增大,但 NETD 并没有同步增加,由图 2 可知这主要是因为探测器关于温度的响应斜率也在同步增加,进而保持甚至提升了系统的信噪比。

$N_{HT}$ 、 $N_{VT}$ 、 $N_{HVT}$  和  $N_{Time}$  的灰度图案如图 8 所示。

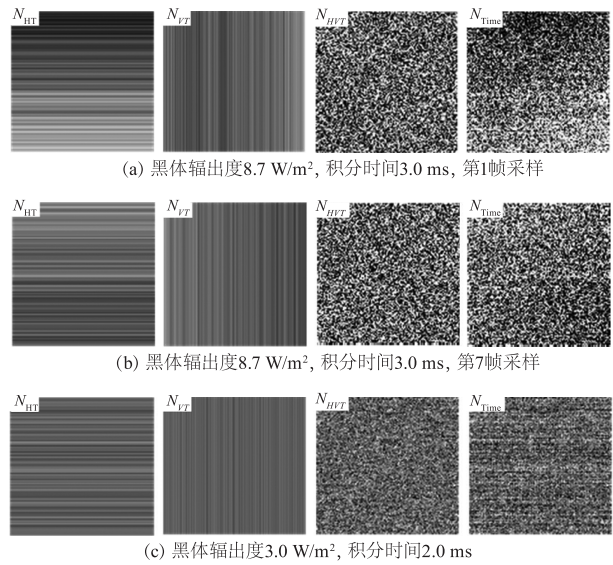


图 8 不同条件下的时间噪声灰度图案

Fig. 8 Grayscale patterns of temporal noise under different conditions

积分时间较长、黑体能量较高的条件下,  $N_{HVT}$  服从均值为 0、标准差为 22 mK 的正态分布,而  $N_{HT}$  和  $N_{VT}$  产生的条纹在像面上呈半明半暗分布且随着时间不断反转,使得  $N_{Time}$  出现不断旋转的明暗变化。目前有研究<sup>[4,7]</sup>认为  $N_{HT}$  和  $N_{VT}$  与 1/f 噪声有关,而 1/f 噪声属于低频时间噪声<sup>[17]</sup>。但是当积分时间和黑体能量较低时,  $N_{HT}$  和  $N_{VT}$  在像面上随机闪烁,不再有明显的低频变化,其最亮与最暗点间差值的 NETD 分别为 438 mK 和 205 mK 左右,因此可以认为低频时间噪声只有在载流子浓度较高、积分电容内电荷较多时才比较明显。此时  $N_{HVT}$  服从均值为 0,标准差为 246 mK 的正态分布。

### 5 三维噪声抑制

对于硬件条件已经固化的红外探测系统,通常通过图像信息处理方法抑制噪声、提升系统信噪比和探测能力。这一节首先介绍典型的噪声抑制算法,然后分析算法对三维噪声中各个分量的影响。

### 5.1 空间噪声抑制方法

工程中普遍采用非均匀校正方法对降低空间噪声、提高图像均匀性<sup>[18-20]</sup>，“两点校正法”是非均匀校正中最广泛采用的方法<sup>[21]</sup>，具体如式：

$$Y(i,j) = A(i,j)X(i,j) + B(i,j) \quad (19)$$

设焦平面第  $i$  行  $j$  列像元的理想输出为  $Y(i, j)$ ，实际输出为  $X(i, j)$ ，则在一定温度区间内  $Y(i, j)$  和  $X(i, j)$  间的关系可用式(19)线性近似，它表示对各像元的输出经与该像元对应的增益调节因子  $A(i, j)$  和偏置调节因子  $B(i, j)$  调节，可以得到不含空间噪声的理想输出  $Y(i, j)$ 。

欲确定  $A$  和  $B$  的值，可以在两个标定温度点  $T_1$  和  $T_2(T_1 > T_2)$  获得两组焦平面响应数据  $X_1$  和  $X_2$ ，将两组数据的均值  $Y_1$  和  $Y_2$  作为所有像元的理想输出，则有：

$$A(i,j) = \frac{Y_1 - Y_2}{X_1(i,j) - X_2(i,j)} \quad (20)$$

$$B(i,j) = Y_1 - A(i,j)X_1(i,j) \quad (21)$$

### 5.2 时间噪声抑制方法

时间噪声抑制算法可划分为帧间和帧内抑制两大类，帧间抑制算法是指对连续帧图像做滤波处理，对噪声进行时间维度上的平滑，但在目标和探测系统间存在相对运动时则需要考虑复杂的帧间图像配准问题，实用性相对较差，故此处仅考虑帧内噪声抑制算法。帧内抑制是指在单帧图内对噪声进行空间维滤波，包括均值和中值滤波、高斯平滑、边缘滤波、引导滤波等多种算法。

此处采用典型的高斯平滑方法进行分析。根据空间滤波相关理论，滤波后像素灰度值  $Y(i_0, j_0)$  是原图邻域内所有灰度值的加权和，如下所示，其中  $S$  是以像素  $(i_0, j_0)$  为中心的邻域， $w$  是权重系数，即滤波器卷积核：

$$Y(i_0, j_0) = \sum_{i,j \in S} w(i,j)X(i,j) \quad (22)$$

$w$  可取归一化的高斯核形式，如式：

$$w(i,j) = \frac{G(i,j)}{\sum_{i,j \in S} G(i,j)} \quad (23)$$

$$G(i,j) = A \exp\left[-\frac{(i-i_0)^2}{2\delta_x^2} - \frac{(j-j_0)^2}{2\delta_y^2}\right] \quad (24)$$

式中， $G$  为高斯核， $A$ 、 $\sigma_x$  和  $\sigma_y$  为滤波器参数，这些参数值和  $S$  的大小通常根据典型目标成像的尺寸和灰度分布决定，在尽量保证目标边缘的同时有效抑制噪声。

此研究中设  $S$  的大小为  $3 \times 3$  像素， $A$  为 425.5、 $\sigma_x$  和  $\sigma_y$  均为 0.7，进而得到如下滤波器卷积核

$$w = \begin{bmatrix} 0.025 & 0.113 & 0.025 \\ 0.113 & 0.448 & 0.113 \\ 0.024 & 0.113 & 0.025 \end{bmatrix} \quad (25)$$

### 5.3 噪声抑制效果分析

在探测系统的实际工作过程中，通常是先进行非均匀校正，然后再对校正图像做高斯滤波，综合地抑制空间和时间噪声。研究中以积分时间 3.0 ms、面源黑体 30 °C (对应辐出度 4.4 W/m<sup>2</sup>) 的数据为样本，对比分析仅做非均匀校正、仅做高斯滤波以及综合运用两种方法的噪声抑制效果，其中非均匀校正参数以相同积分时间下 20 °C 和 40 °C 黑体数据 (分别对应辐出度 3.0 和 6.2 W/m<sup>2</sup>) 作为低温和高温样本进行标定。

噪声抑制前后各个噪声分量的大小如表 2 所示，各噪声分量的图案如图 9 所示。由图可知，在原图中空间噪声明显大于时间噪声，是噪声的主要成分，其中  $\sigma_{HV}$  远大于其他各分量。进行非均匀校正后空间噪声大幅减少，各个时间噪声分量的大小没有变化， $\sigma_{HVT}$  成为噪声的主要成分。仅做高斯滤波时空间和时间噪声均有所减小。其中空间噪声的抑制幅度远低于非均匀校正，但优于时间噪声的抑制效果。如图 10 所示 (其中灰度值为无量纲数)，选取 500 帧图像统计  $N_{HV}$  和  $N_{HVT}$  的分布情况，可知两者均服从均值为 0 的正态分布，但  $N_{HV}$  的分布比  $N_{HVT}$  更离散，因此对其进行高斯滤波后变化更显著。

采用先非均匀校正后高斯滤波的综合方法，空间噪声几乎被完全抑制，时间噪声降低约一半， $\sigma_{HVT}$  成为噪声的主要成分。

表 2 噪声抑制前后各噪声分量大小 (单位:mK)

Tab.2 Values of noise components before and after noise suppression (Unit:mK)

图像	$\sigma_H$	$\sigma_V$	$\sigma_{HV}$	$\sigma_{HT}$	$\sigma_{VT}$	$\sigma_{HVT}$	$\sigma_{Space}$	$\sigma_{Time}$	$\sigma_{Total}$
原图	501	610	913	6	4	34	1207	35	1207
非均匀校正	2	1	5	6	4	34	5	35	35
高斯滤波	496	586	383	4	3	18	858	19	858
时空综合滤波	1	1	2	4	3	18	3	19	19

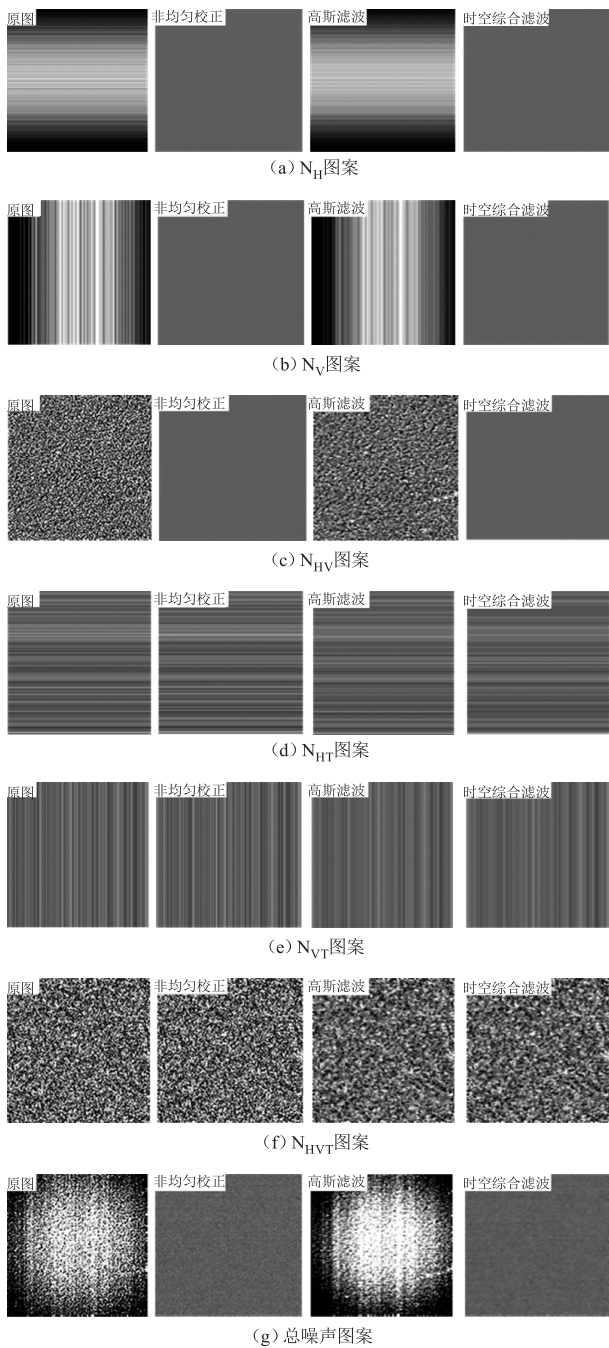


图 9 校正前后噪声图案对比

Fig. 9 Comparison of noise patterns before and after correction

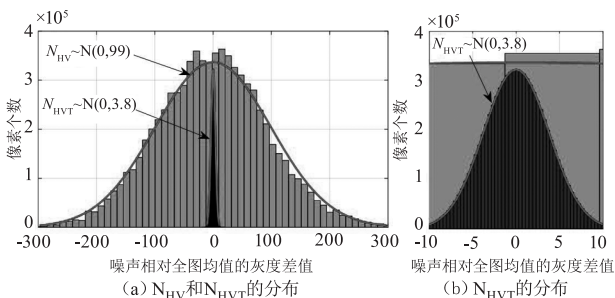


图 10 像素间噪声的统计分布情况

Fig. 10 Statistical distribution of pixel noise

## 6 结 论

此研究应用三维噪声模型分析了凝视型中波红外探测系统的噪声特性,考察了积分时间和黑体温度变化时各噪声分量的变化规律,研究了图像信息处理算法对各个分量的影响:

1) 积分时间和黑体辐出度对噪声的影响相似,随着积分时间和黑体辐出度的增大,各三维噪声分量都先以非线性形式迅速减小,然后逐渐趋于恒定。

2) 当积分时间和系统入射能量较大时,各噪声分量在图像上的分布都较为均匀;当积分时间和系统入射能量较小时,探测器容易产生非线性响应,三种空间噪声在图像上分别形成具有各自特征的明暗条纹,瞬态行、列噪声则呈现出低频特征。

3) 不同类型的噪声混叠后形成的总噪声图像较为复杂,变化规律不明显,不易分析和观测,三维噪声模型可以将总噪声图案分解为几个具有独特模式的子噪声图案,极大地方便了噪声的观测分析。

4) 在未经任何噪声抑制处理的原始图像中,空间噪声是系统噪声的主要成分;综合运用空间和时间噪声抑制方法后,空间噪声几乎被完全抑制,时间噪声降低至原图的 0.5 倍,瞬态像素噪声成为噪声的主要成分。

## 参考文献:

- [1] D'Agostino John A, Webb Curtis W. Three-dimensional analysis framework and measurement methodology for imaging system noise [J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 1991, 1488: 110 - 121.
- [2] D'Agostino John A. The modeling of spatial and directional noise in FLIR 90, part 1: a 3D noise analysis methodology [J]. Proceeding of SPIE - the International Society for Optical Engineering, 1992, 2075 (2): 207 - 227.
- [3] Fang Hongbing, Pi Defu, Wang Guangmin, et al. The 3-D noise analysis method of the staring thermal imaging system [J]. Infrared Technology, 2000, 22 (3): 8 - 11. (in Chinese)
- 房红兵, 皮德富, 王广民, 等. 凝视热探测系统三维噪声分析法 [J]. 红外技术, 2000, 22 (3): 8 - 11.
- [4] Tang Hairong, Jin Weiqi, Qiu Gufeng. 3-dimension noise model for second generation thermal imaging system [J]. Infrared Technology, 2000, 22 (6): 7 - 11, 22. (in Chinese)
- 唐海蓉, 金伟其, 仇谷峰. 二代热探测系统的三维噪声模型 [J]. 红外技术, 2000, 22 (6): 7 - 11, 22.
- [5] Chen Kai, Sun Dexin, Liu Yinnian. 3D noise model of LWIR system and analysis [J]. Infrared Technology, 2015, 37 (8): 676 - 679. (in Chinese)



- 陈凯,孙德新,刘银年.长波红外系统三维噪声模型及其分析[J].红外技术,2015,37(8):676-679.
- [6] Wang Xiaoxuan, Pu Jianxun, Zi Zhenghua, et al. Using the three-dimension noise model to test and analyze the scanning thermal imaging systems[J]. Infrared Technology, 2009, 31(8):453-457. (in Chinese)  
王晓璇, 普建勋, 字正华, 等. 用三维噪声模型对扫描型热像仪测试与分析[J]. 红外技术, 2009, 31(8):453-457.
- [7] Hu Mingpeng, Ma Dongmei, Li Hongzhuang, et al. The noise model of the staring image system[J]. Laser & Infrared, 2007, 37(9):863-866. (in Chinese)  
胡明鹏, 马冬梅, 李宏壮, 等. 凝视型热探测系统噪声模型研究[J]. 激光与红外, 2007, 37(9):863-866.
- [8] Zou Qianjin. Noise measurement and simulation of infrared imaging system based on measured data[J]. Laser & Infrared, 2008, 38(10):990-993. (in Chinese)  
邹前进. 基于实测数据的红外探测系统噪声测量仿真[J]. 激光与红外, 2008, 38(10):990-993.
- [9] Lin Jian, Zhang Weiwei, Zhang Kai, et al. Infrared target detection based on YOLO<sub>v5</sub> [J]. Flight Control & Detection, 2022, 5(3):63-71. (in Chinese)  
林健, 张巍巍, 张凯, 等. 基于 YOLOv5 的红外目标检测算法[J]. 飞控与探测, 2022, 5(3):63-71.
- [10] Wang Xing, Shao Yanming, Yu Yue, et al. Small target detection in clutter used feature point matching between frames[J]. Flight Control & Detection, 2019, 2(2):40-45. (in Chinese)  
王兴, 邵艳明, 余跃, 等. 基于帧间特征点匹配的红外弱小目标检测[J]. 飞控与探测, 2019, 2(2):40-45.
- [11] Zhang Z, Yang F. Hyperspectral image denoising and destriping based on sparse representation, graph Laplacian regularization and stripe low-rank property[J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2022, (1):96.
- [12] Liu T, Yin Q, Yang J, et al. Combining deep denoiser and low-rank priors for infrared small target detection[J]. Pattern Recognition, 2023, 135:109184.
- [13] Ma T, Yang Z, Wang J, et al. Gradient field divergence-based small target detection in infrared images[J]. Optical and Quantum Electronics, 2022, 54(8):484.
- [14] Li Su, He Dahua, Li Yapeng. Effect of shot noise on target detection rate [J]. Ship Electronic Engineerin, 2021, 41(12):196-199. (in Chinese)  
李苏, 何大华, 李亚鹏. 散粒噪声对目标探测率的影响[J]. 舰船电子工程, 2021, 41(12):196-199.
- [15] Gao Lei. Research on thermal noise modeling simulation of near hypersonic medium infrared imaging system[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2022. (in Chinese)  
高磊. 近高超声速中波红外探测系统热噪声建模仿真研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2022.
- [16] Xu Linan, Dong Jie, Dai Liqun, et al. Study and analysis of the detectivity of infrared detector[J]. Laser & Infrared, 2021, 48(4):196-199. (in Chinese)  
徐丽娜, 董杰, 戴立群, 等. 红外探测器探测率的研究与分析[J]. 激光与红外, 2021, 48(4):196-199.
- [17] Meng Chenxu. Investigation of noise performance and photocurrent performance of mid-wave and long-wave infrared InAs/GaSb type-II superlattice detectors [D]. Nanjing: Nanjing University, 2021. (in Chinese)  
孟晨旭. InAs/GaSb II 类超晶格中长波红外探测器的光电响应和噪声性能研究[D]. 南京: 南京大学, 2021.
- [18] Zhang Haibin, Deng Jian, Wang Yudong. Research and improvement of non-uniformity correction algorithm of infrared image based on blackbody[J]. Electro-optic Technology Application, 2022, 37(3):36-42. (in Chinese)  
张海斌, 邓剑, 王煜东. 基于黑体的红外图像非均匀性校正算法研究及改进[J]. 光电技术应用, 2022, 37(3):36-42.
- [19] Kim S. Two-point correction and minimum filter-based nonuniformity correction for scan-based aerial infrared cameras[J]. Optical Engineering, 2012, 51(10):106401-106401.
- [20] Wang Kun, Ye Zhaojun. Infrared images destriping method based on wavelet dilated residual U-Net [J]. Optical Technique, 2022, 48(5):616-626. (in Chinese)  
王坤, 叶招君. 基于小波空洞残差 U-Net 的红外图像去条纹噪声方法[J]. 光学技术, 2022, 48(5):616-626.
- [21] Guan Tonghui, Zhang Tonghe. A new real-time two-point non-uniformity correction method [J]. Aero Weaponry, 2021, 28(4):112-117. (in Chinese)  
关同辉, 张同贺. 一种新型实时两点非均匀性校正方法[J]. 航空兵器, 2021, 28(4):112-117.