

低温背景下红外焦平面阵列的噪声分析

余菲^{1,2}, 任栖锋¹, 李素钧^{1,2}, 金和^{1,2}

(1. 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 对红外探测器在低温背景下的噪声模型及特性进行了分析与实验研究。利用探测器噪声四参数法计算模型与方法; 搭建实验平台对红外探测器在不同低温背景温度下的性能进行测试, 得到红外探测器的低频时间噪声, 高频时间噪声, 低频空间噪声各自与温度、积分时间的关系。实验表明: 在一定温度区间内, 低频时间噪声表现出较强的温度相关性, 低频空间噪声表现出较明显非线性响应特性, 高频空间噪声表现出积分时间相关性。

关键词: 制冷型红外探测器; 时间噪声; 空间噪声; 深空环境

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0304003

Analysis of noise for infrared focal plane array in low temperature background

Yu Fei^{1,2}, Ren Qifeng¹, Li Sujun^{1,2}, Jin He^{1,2}

(1. Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The noise model and characteristics of the infrared detector in low temperature background were analyzed and experimentally researched. Detector noise calculation model and method of four parameters method were used in this paper. The experimental platform was set up for test the performance of the infrared detector under different low temperature. Results of the relationship of the low-frequency temporal noise, high frequency temporal noise, low frequency spatial noise, high frequency spatial noise respectively with temperature and integration time were obtained. Within a certain temperature range, experiments prove that low frequency temporal noise shows a strong correlation with temperature, low frequency spatial noise exhibited obvious nonlinear response of detector, high frequency noise is dependent on integration time significantly.

Key words: cooled infrared detector; temporal noise; spatial noise; deep space environment

收稿日期: 2016-07-11; 修订日期: 2016-08-15

作者简介: 余菲(1990-), 男, 硕士生, 主要从事红外辐射方面的研究。Email: falcon_yufei@126.com

导师简介: 任栖锋(1978-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事低温红外方面的研究。Email: renqf@ioe.ac.cn

0 引言

近十年来红外探测器应用在空间探测、对地观测、军用遥感等方面越来越多^[1]。红外探测器在空间中的应用尤为重要,也向着更高灵敏度的方向发展,而对其工作的深空低温环境的状态的测试却报道不多。为了更为准确测量和分析探测器在该环境中的噪声,这里比较 4 种噪声分析方法,并提出详细的计算方法,进行实验分析验证。

1 红外探测器的噪声分析模型

红外探测器噪声会严重影响探测系统的成像质量,缩短探测距离。噪声的分析方法有 4 种。

1.1 三维噪声模型^[2-3]

三维噪声模型将噪声分为 7 个相互独立,不相关的分量。噪声分为 3 组,时间上,空间相关噪声成分为 N_{vh} 、 N_h 、 N_v ;空间上,时间相关噪声成分为 N_t 、 N_{th} 、 N_{tv} ;随机时空噪声分为 N_{vth} 。

三维噪声模型理论使用要求高,要通过正确的测量,准确的标校,适当的简化,才能结合算法和实际的探测器噪声情况去分析和减少噪声。

1.2 单一参数法

单一参数法,即计算噪声等效温差(NETD),根据定义可由信噪比为 1 时的目标与背景的温差得到^[4],此测试计算方法简单;另一种方法是空间和时间的等效噪声温差^[5]:

$$NETD = \sigma * [\text{Mean}(TH) - \text{Mean}(TL)] \quad (1)$$

此方法是在高、低两个目标温度辐照下的帧平均响应灰度和相应的温差之比。能够避免黑体的非均匀性,单在两个不同的时间点下环境的不一致性会导致一定的误差;也可以通过均方根噪声值和信号传递函数的比值计算得到^[6]。可通过多组数据计算出信号传递函数,以提高计算的精度。

1.3 RMS 噪声分布模型^[7]

$$F(x) = \phi(\gamma + \delta \sin^{-1} z) \quad (2)$$

$$z = \frac{x - \xi}{\lambda} \quad (3)$$

这是个四参数的分布模型,含有 4 个变量。 γ 为均值,为标准差, ξ 为峰值, λ 为偏度。主要用于分析像元的缺陷和 $1/f$ 噪声,是大量的探测器的质量的评估方法。说明 RMS 模型和探测器材料质量和低频噪

声有较强的相关性。通过 RMS 噪声模型来分析,热压力和热循环对探测器的影响。

1.4 四参数法

将图像的噪声分为时间噪声和空间噪声^[8],再将时间和空间噪声进一步细分为低频噪声和高频噪声,即有 4 种噪声分量:低频时间噪声、高频时间噪声、低频空间噪声、高频空间噪声。低频时间噪声又常被称为 $1/f$ 噪声,常由附加噪声组成,相对于其他的噪声,对图像的成像质量影响较小,可在较长的帧间隔后发现。高频时间噪声,在较短的帧间隔内可以看出:在功率谱上视为白噪声;低频空间噪声,常被称为非均匀性,指大范围的图像灰度值的非均匀性分布。高频空间噪声是在固定模式下的图像噪声,是相同的读出电路在短时间内读出的不同的像元灰度值。

三维噪声模型,虽然能够全面地分析探测器的噪声成分,但是要准确地应用,对标校和测量的精度要求很高,并要结合实际情况进行简化。单一参数法,虽然计算方法多,但定义方式多,容易混淆,理解不易。RMS 噪声模型,适用于生产中大量的红外探测器的 $1/f$ 噪声研究,不适用于实验室条件。四参数法将噪声简单分为时间噪声和空间噪声,再从低频和高频的角度分析,概念清晰、简单易懂,并能够充分说明探测器噪声情况,适用于实验条件。

2 噪声的四参数法计算

2.1 低频时间噪声的计算

低频时间噪声是图像灰度值随着时间缓慢变化的,可通过较长时间间隔的图像灰度值计算出来,也叫 $1/f$ 噪声。

计算步骤:

$$A = \sum_{i=1}^{i=100} |DN(i) - DN(i+100)| \quad (4)$$

$$B = \sum_{i=1}^{i=100} \frac{DN(i) - DN(i+100)}{2} \quad (5)$$

$$C = \frac{1}{100} \times \frac{A}{B} \quad (6)$$

式中: i 指第 i 帧图像; $DN(i)$ 为第 i 帧图像灰度值; C 为低频时间噪声。

公式(3)和公式(4)中求平均是为了减小空间噪声对低频时间噪声的影响,尤其是减小低频空间噪声对低频时间噪声的影响。

2.2 高频时间噪声

高频时间噪声是图像灰度值随着时间快速变化的,在两帧图像之间可以区别出来,在功率谱上可以看作是白噪声,随机性较强。

计算步骤:

$$A = \sum_{i=1}^{i=199} |DN(i) - DN(i+1)| \quad (7)$$

$$B = \sum_{i=1}^{i=199} \frac{DN(i) - DN(i+1)}{2} \quad (8)$$

$$C = \frac{1}{199} \times \frac{A}{B} \quad (9)$$

同样公式(7)和公式(8)多次求平均是为了减小空间噪声对低频时间噪声的影响,尤其是减小低频空间噪声对高频时间噪声的影响。

2.3 低频空间噪声的计算

低频空间噪声是每帧像元灰度值随着空间分布缓慢变化的,也就是常说的图像整体的均匀性。去除坏点后图像中心区域和整个图像的低频空间噪声相近。但在实际的应用中多对中心区域的图像的均匀性进行分析。

计算步骤:

公式(11)的求均值目的是减少时间噪声对低频空间噪声的影响。

$$A(i) = |DN_i(j) - \overline{DN}(i)| \quad (10)$$

$$B = \sum_{i=1}^{i=200} \frac{\sum_{j=1}^{j=81\ 920} A(j)}{DN(i)} \quad (11)$$

$$C = \frac{B}{200 \times 81\ 920} \quad (12)$$

2.4 高频空间噪声的计算

高频空间噪声是每帧像元灰度值随着空间快速变化,也就单个像元在该帧中与其附近像元的变化情况。多被称为固定模式下的图像噪声。在某一时刻相同的读出电路输出不同的灰度值响应。高频空间噪声会影响目标细节的呈现,其计算示意图如图 1 所示。

$$\begin{aligned} \Delta DN - A1 = & |DN2 - DN1| + |DN3 - DN1| + \\ & |DN4 - DN1| + |DN5 - DN1| + \\ & |DN6 - DN1| + |DN7 - DN1| + \\ & |DN8 - DN1| + |DN9 - DN1| \end{aligned} \quad (13)$$

$$\Delta DN - A1 = \Delta B1 \quad (14)$$

$$\Delta DN - A2 = \Delta B2 \quad (15)$$

$$\Delta DN - A3 = \Delta B3 \quad (16)$$

.....

$$\Delta DN - A36 = \Delta B36 \quad (17)$$

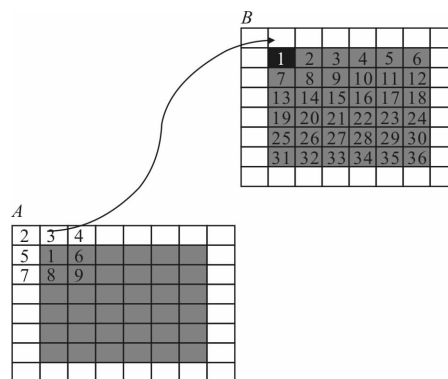


图 1 高频空间噪声计算示意图

Fig.1 High frequency spatial noise calculation schematic

3 红外探测器在深空环境模拟舱中测试实验

3.1 实验设备及方法

真空低温环境模拟舱,能够模拟出红外探测器在空间所处的深空真空低温环境。真空度优于 $1.0 \times 10^4 \text{ Pa}$,最低温度可达 100 K 以下。舱内配置高精度低温真空面源黑体,在真空环境中作为热辐射测试的标准源,对红外探测器进行辐射测试。实验所测试的探测器为制冷型中波红外探测器,工作波段为 $3.7 \sim 4.8 \mu\text{m}$,像元数为 320×256 ,像元尺寸为 $30 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$ 。

实验原理如图 2 所示,被测中波红外探测器和黑体置于真空低温环境模拟舱中,并使二者中心在同一条直线上,让面源黑体充满探测器视场。将真空

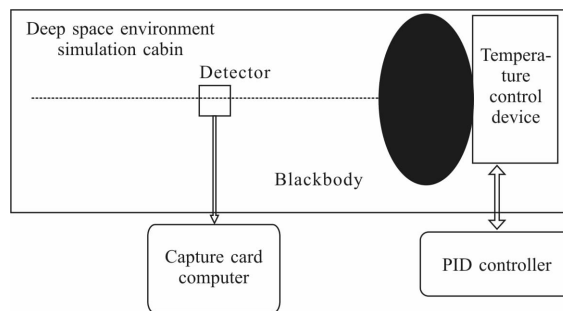


图 2 实验设备简图

Fig.2 Schematic diagram of laboratory equipment

低温环境模拟舱制冷抽气到较低的气压下,再进行制冷获得所需的低温测试条件。低温黑体温度通过

控制器调节,加热从 175 K 开始,间隔 5 K,升温到 285 K,每个温度点都改变积分时间,连续采集 200 帧。在不同的温度条件下、不同的积分时间下,对红外探测器标定测试。

3.2 实验噪声分析

由图 3 可知在深空环境模拟舱中,当黑体温度小于 215 K 时,同一积分时间下,低频时间噪声主要是 $1/f$ 噪声,不依赖于温度,即在低温真空环境中,低温(215 K 以下)对 $1/f$ 噪声有较好的抑制作用;当温度大于 215 K 后,低频时间噪声也就是 $1/f$ 噪声表现出较强的温度相关性。由于 $1/f$ 噪声是与固有载流子浓度相关的^[9],当温度大于一定值时,内部载流子浓度随温度增大,故温度的升高也导致 $1/f$ 噪声变大。固有载流子浓度所产生的电流,随积分时间的提高而变大,换句话说,同一温度下积分时间越大,其相应的 $1/f$ 噪声越大。由测试实验结果分析可知,中心区域的低频时间噪声和整个图像的低频时间噪声变化规律是一致的。

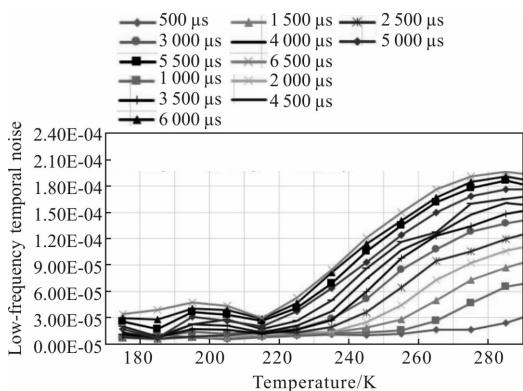


图 3 低频时间噪声和黑体温度、积分时间的关系

Fig.3 Relations of low-frequency temporal noise, blackbody temperature and integration time

图 4 表明在较小的积分时间内($<2\ 000\ \mu\text{s}$),高频时间噪声变化平稳。而在积分时间较大($>2\ 500\ \mu\text{s}$)时,高频时间噪声的峰值点的温度值随着积分时间的增大而变小。在较短的积分时间内,增长缓慢,较长的积分时间内增大迅速。如在 $3\ 000\ \mu\text{s}$ 时,高频时间噪声峰值点在 265 K,而 $5\ 000\ \mu\text{s}$ 时峰值点在 245 K, $6\ 500\ \mu\text{s}$ 时峰值点在 235 K。表明两帧之间的高频时间噪声,在温度和积分时间共同影响下,所产生的噪声电压较为突出。

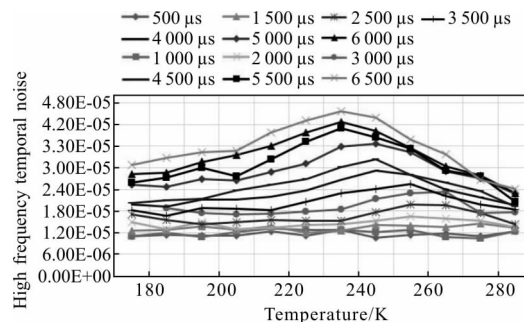


图 4 高频时间噪声和黑体温度、积分时间的关系

Fig.4 Relations of high frequency temporal noise, blackbody temperature and integration time

图 5 表示在同一积分时间下,不同的黑体温度时,低频空间噪声是先逐渐减小,再反弹增大。符合参考文献[10]中红外焦平面阵列的非线性响应分析计算的非线性响应的百分比变化规律。低频空间噪声随着温度的增大而逐渐减小的过程中,主要是探测器的量子效应对入射光子波长的非线性变化引起的。而在 245~290 K 温度区间内,在不同的积分时间内,由输入强度变化引起的非线性响应,主要是由于读出电路和 A/D 转换器的非线性效应导致的。

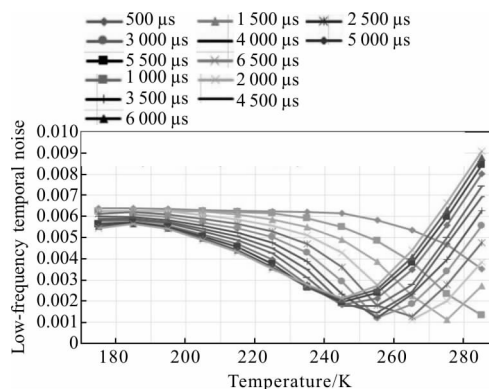


图 5 低频空间噪声与黑体温度、积分时间的关系

Fig.5 Relations of low-frequency spatial noise, blackbody temperature and integration time

表 1 说明制冷型红外探测器在真空低温环境模拟舱中由于读出电路和 A/D 转换器的非线性效应和量子效率对入射光子波长的非线性变化规律共同作用,导致图像的非均匀性的最小时的积分时间和温度点都不一样。结合图 5 可知,积分时间越大,读出电路和 A/D 转换器的非线性效应对图像非均匀性的影响越突出。高频空间噪声实际计算选择中心

表 1 不同积分时间的最小非均匀性的温度点
Tab.1 Minimum non-uniformity temperature points at different integration time

Integration time/ μs	Temperature/K	Non-uniformity
6 500	245	0.002 138
6 000	245	0.002 071
5 500	245	0.001 939
5 000	245	0.001 884
4 500	245	0.001 759
4 000	255	0.001 645
3 500	255	0.001 519
3 000	255	0.001 422
2 500	265	0.001 384
2 000	265	0.001 312
1 500	275	0.001 234

区域的 180×180 像素的矩形, 计算其 ΔB 的分布情况。由于在低频时间噪声和高频时间噪声的分析中, 可知在 235 K 时各个积分时间点时都是增加的, 而低频空间噪声较小, 重点分析在 235 K 下的高频空间噪声。

由表 2 可知, 第一帧和第二帧、第 100 帧的分布情况在相同的积分时间下, ΔB 的大小和灰度值大于 2 000 的个数上差别也较小。该方法简单有效地说明, 低频时间噪声和高频时间噪声对高频空间噪声的影响较小, 从最小的 ΔB 可得出: 随积分时间增大后, 中心区域的低频空间噪声较小, 而高频空间噪声增大。

同一温度(235 K)下, 不同的积分时间的变化, 高

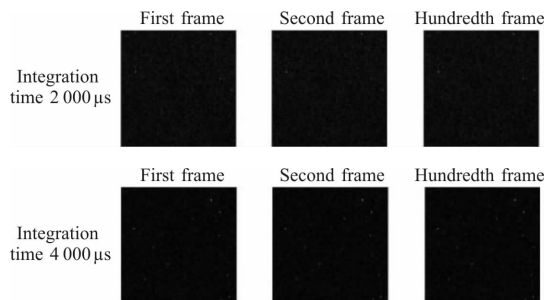
表 2 在 235 K 下不同积分时间的 ΔB 分布

Tab.2 Distribution of ΔB under different integration time at 235 K

Integration time / μs	Max of ΔB in the first frame	Max of ΔB in the second fram	Max of ΔB in the hundredth frame	Min of ΔB in the first frame	Min of ΔB in the second frame	Min of ΔB in the hundredth frame	Number of ($\Delta B > 2\ 000$) in the first frame	Number of ($\Delta B > 2\ 000$) in the second frame	Number of ($\Delta B > 2\ 000$) in the hundredth frame
500	2 440	2 439	2 445	28	33	32	4	4	4
1 000	2 235	2 201	2 222	25	25	24	1	2	3
1 500	3 049	3 049	3 018	23	26	26	4	5	5
2 000	3 582	3 492	3 196	28	32	29	4	4	3
2 500	3 935	3 357	3 495	26	26	23	4	3	3
3 000	4 273	4 382	4 361	21	18	23	4	4	4
3500	3 972	4 138	4 053	23	21	22	7	7	7
4 000	3 692	3 684	3 835	12	12	17	10	10	10
4 500	3 342	3 347	3 490	13	14	12	12	11	11
5 000	4 222	4 139	4 148	11	9	9	17	17	18
5 500	4 792	4 822	4 920	8	6	7	18	18	18
6 000	4 947	4 970	5 056	5	4	5	13	13	13
6 500	5 264	5 297	5 298	3	4	3	13	13	13

频空间噪声 ΔB 的位置变化如图 6 所示。

同样在排除低频时间噪声和高频时间噪声的影响下, 高频空间噪声的位置没有明显的变化规律。这种噪声随背景辐射和探测器的工作状态的漂移无规律变化。主要是由于单个像元在相同的黑体温度下的非线性响应造成的。而高频空间噪声的出现, 和点目标很相近, 会严重影响微弱信号的探测, 导致不必要的误测, 给局部非均匀性校正带来一定的困难。



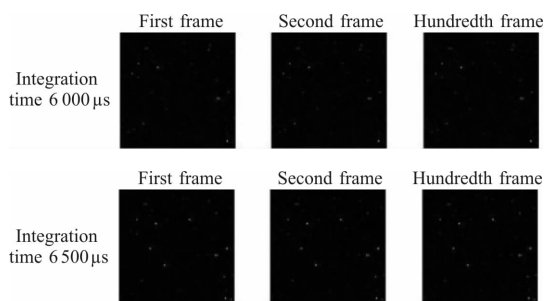


图 6 235 K 时不同的积分时间的变化, 高频空间噪声 ΔB 的位置变化

Fig.6 High frequency spatial noise ΔB change of position at different integration time at 235 K

4 结 论

文中利用了简单有效的低频时间噪声、高频时间噪声、低频空间噪声、高频空间噪声的计算方法, 并对红外探测器在真空低温背景下的噪声特性进行了测试与分析。在时间噪声和空间噪声无相关性下, 充分有效地说明了在深空环境中低频时间噪声、高频时间噪声、低频空间噪声、高频空间噪声的各自与温度、积分时间的变化情况, 表明在一定温度区间内, 低频时间噪声表现出较强的温度相关性, 低频空间噪声表现出较明显的探测器非线性响应特性, 高频空间噪声表现出积分时间相关性。

参考文献:

- [1] Gong Haimei, Liu Dafu. Developments and trends in spaceborne infrared detectors [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 30(1): 18-24. (in Chinese)
龚海梅, 刘大福. 航天红外探测器的发展现状与进展 [J]. *红外与激光工程*, 2008, 30(1): 18-24
- [2] Patrick O Shea, Stephen Sousk. Practical issues with 3D-noise measurements and application to modern infrared sensors [C]//Proceedings of SPIE, 2005, 5784: 262-271.
- [3] Lin Hui, Tian Xinfeng, Su Xiuqin. Noise of CCD reduction based on three-D noise model [C]//Proceedings of SPIE, 2012, 8558: 85582J.
- [4] AraoKamoi, Yoshiz Okamoto, Toshimitsu Ishii. Evaluation methods of NETD and MRTD for IR camera by using FLIR collimato [C]//Proceedings of SPIE, 2001, 4360: 412-419.
- [5] Don Rafol, Eric Cho, Wah Lim. Characterization of very large format 1 K×1 K LWIR QWIP focal plane array [C]//Proceedings of SPIE, 2007, 6678: 66780X.
- [6] Li Yingwen, Pan Debin, Yang Changcheng, et al. NETD test of high-sensitivity infrared camera[C]//Proceedings of SPIE, 2007, 6723: 67233Q.
- [7] Cathignol A, Vauquelin G, Brunner A, et al. RMS noise modeling and detection for high reliability HgCdTe Infrared Focal Plane Arrays development [C]//Proceedings of SPIE, 2015, 9451: 945126.
- [8] Li Xiangmin, Ni Guoqiang. Noise analysis of infrared cameras [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(S): 523-526. (in Chinese)
李相民, 倪国强. 红外热像仪的噪声分析 [J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(S): 523-526.
- [9] Strong Roger L, Kinch Michael A, Armstrong John M. Temperature dependence of $1/f$ noise, defects and dark current in small pitch MWIR and LWIR HDVIP HgCdTe FPAs[C]//Proceedings of SPIE, 2013, 8704: 87042O.
- [10] Liu Huitong, Wang Qi, Zheng Zhiwei, et al. Analysis and calculation of the nonlinear response in infrared focal plane arrays [J]. *Infrared Millim Waves*, 2001, 20 (4): 253-258. (in Chinese)
刘会通, 王骥, 郑志伟, 等. 红外焦平面阵列的非线性响应分析计算[J]. *红外与毫米波学报*, 2001, 20(4): 253-258.