

中长波红外探测器非线性度分析

邢艳蕾, 周 翠

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘 要:线性度作为评价探测器性能参数的一个重要指标,直接影响着用户的使用状况。以中长波两个波段的探测器作为实验器件,分析讨论了以全波段黑体辐照功率与像元响应率线性拟合及以波段辐照功率与输出信号电压进行线性拟合的两种不同的评价方案。全波段黑体辐照功率拟合出的线性度结果较差,非线性度在6%左右,而采用波段辐照功率拟合出的非线性度均在0.5%以内。最终确定以波段辐照功率拟合出的线性度有较高的准确性,为直观评价探测器性能的优劣提供了指导依据。

关键词:探测器;非线性度;黑体辐照功率;波段辐照功率

中图分类号:TN214 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2019.09.010

Nonlinearity analysis of medium and long wave infrared detectors

XING Yan-lei, ZHOU Cui

(North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

Abstract: Linearity, as an important index to evaluate the performance parameters of detectors, has a direct impact on the use of users. Two different evaluation schemes, which are linear fitting of full-band blackbody irradiation power and pixel response rate and linear fitting of wave-band irradiation power and output signal voltage, are analyzed and discussed using two band detectors as experimental devices. The results of linearity fitting of full-band blackbody irradiation power are poor, the non-linearity is about 6%, and the non-linearity fitting with wave-band is within 0.5%. So, it is determined that the linearity fitted by band irradiation power has higher accuracy, which provides a guidance basis for evaluating the performance of detector intuitively.

Keywords: detector; nonlinearity; blackbody irradiation power; band irradiation power

1 引 言

随着红外技术在民用与军事领域的广泛应用,红外探测器的发展备受关注,因此,确定各个参数用于评价红外焦平面的性能极为重要。在红外探测器的性能参数中,线性度是至关重要的一项^[1-2]。红外成像时普遍采用的两点校正法,则是建立在探测器像元的响应是线性的基础上^[3-6],所以器件的线性度准确性直接影响着校正的精确度,精准的测量线性度至关重要。

目前 GB/17444-2013 中非线性度采用黑体辐

照功率与响应率的方法进行最小二乘拟合^[7],红外探测器的工作原理是光子转换成电信号输出,二者之间近似线性,与黑体辐照的全波段能量并非线性关系。本文基于此,进行了中波、长波器件的线性度分析,并推荐了一种基于波段能量与输出信号电压进行线性拟合的测量方案。

2 实验原理

非线性度指在探测器的正常工作范围内,输出响应的实际值与拟合直线的偏离程度。实验框图如图1所示,由黑体辐射源、测试组件、信号采集系统

及处理系统等构成。黑体辐射源辐射出的红外光子数被探测器组件接收并转化为电信号进行输出,改变黑体温度,采集 16 个测试点,令输出在探测器的正常工作范围内,通过对不同黑体温度与其产生的对应电压信号的分析,进而对线性度进行分析。

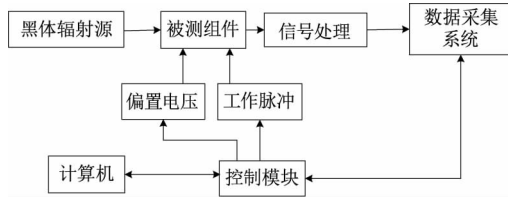


图 1 测试框图

Fig. 1 Test block diagram

普朗克辐射定律给出了黑体辐射的具体谱分布,在一定温度下,单位面积的黑体在单位时间、单位立体角内和单位波长间隔内辐射出的能量为:

$$P(\lambda, T) = \frac{2 \times h \times c^2}{\lambda^2 (e^{\frac{hc}{\lambda k T}} - 1)} \quad (1)$$

式中, $P(\lambda, T)$ 为黑体的光谱辐射亮度 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$)。如果把 $P(\lambda, T)$ 对所有的波长积分,同时也对各个辐射方向积分,那么可得到斯特藩-波耳兹曼定律 (Stefan-Boltzmann), 热力学温度为 T 的黑体单位面积在单位时间内向空间各方向辐射出的总能量为 $P(T)$:

$$P(T) = \sigma \times T^4 \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2}) \quad (2)$$

式中, σ 斯特藩常数 $5.67032 \times 10^{-12} (\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-4})$ 。

非线性度的测试从原理上是不同温度黑体辐照条件下的输出信号电压的测试,对于某一固定波段的探测器而言,产生的电信号 V 与波段内的辐射光子能量为线性关系,即 $V \propto P(\lambda, T)$; 对全波段响应的探测器而言, $V \propto P(T)$ 。以下为对两种方法的实验验证。

方法 1

基于像元响应率与全波段辐射功率拟合的非线性度方案 (GJB17444-2013):

(1) 输出信号电压

被测像元 (i, j) 在黑体温度为 T_k 时的输出信号电压 (F 帧平均值) 由下式计算:

$$V_k(i, j) = \frac{1}{F} \sum_{f=1}^F |V_k[(i, j), f] - V_{\text{ref}}(i, j)| \quad (3)$$

式中, $V_{\text{ref}}(i, j)$ 为输出参考电压,即像元在零辐照时

的输出电压。

在黑体温度为 T_k 时被测区域所有像元的平均输出信号电压为:

$$V_k = \frac{[\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N V_k(i, j) - \sum V_k(d_{(m, n)}) - \sum V_k(h_{(p, q)})]}{M \times N - (d + h)} \quad (4)$$

式中, M, N 为被测区域的总行数和总列数; d, h 为被测区域中的死元和过热元数; $\sum V_k(d_{(m, n)})$, $\sum V_k(h_{(p, q)})$ 分别为死元和过热元的总电压信号之和。

(2) 像元电压响应率

$$R(i, j) = \frac{V_k(i, j)}{P_k} \quad (5)$$

在黑体温度为 T_k 时,其辐射的总功率为:

$$P_k = \frac{\sigma \times T_k^4 \times A_d}{4(L/D)^2 + n} \quad (6)$$

式中, σ 为斯特藩常数 $5.67032 \times 10^{-12} (\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-4})$; A_d 为被测像元光敏面积; T_k 为黑体温度; L 为面源黑体测试时为冷屏孔面到焦平面像元之间的垂直距离;点源黑体测试时为黑体输出孔径到焦平面像元之间的距离,单位为 cm ; D 为面源黑体测试时为冷屏孔圆孔径,点源黑体测试时为黑体输出孔径,单位为 cm ; 当 L/D 大于 1 时, $n = 1$; 当 L/D 小于 1 时, $n = 0$ 。

(3) 线性拟合

通过最小二乘法对不同温度下被测像元或区像元响应率与辐照功率的 N 组数据 $(P_k, R_k) (k = 1, 2, \dots, N)$ 进行线性拟合理想直线方程:

$$R'_k = a \times P_k + b \quad (7)$$

通过式 (7) 算出每个测试点下的理想输出响应率 P'_k 后,各测试点实际测量值与理想值的偏差:

$$\Delta R_k = R_k - R'_k \quad (8)$$

(4) 非线性度计算

非线性度为各测试点实际测量值与理想值偏差绝对值的最大值和实际像元电压响应率之比,计算公式如下:

$$\text{NL} = \frac{\text{Max} |\Delta R_k|}{R_k} \times 100\% \quad (9)$$

方法 2

基于像元输出电压与波段辐射功率拟合的非线性度方案:

(1) 输出信号电压见公式 (3)。

(2) 像元波段辐射功率

黑体温度为 T_k 时,被测像元或区域在其光谱范围 $\lambda_{on} \sim \lambda_{off}$ 内的辐射功率:

$$P_k = \int_{\lambda_{on}}^{\lambda_{off}} \frac{2 \times h \times c^2}{\lambda^5 (e^{\frac{h \times c}{\lambda \times K \times T_k}} - 1)} \times \varepsilon \times FOV \times A_d \times d\lambda \quad (10)$$

式中, h 为普朗克常数, $6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$; c 为光速, $3 \times 10^8 \text{ m/s}$; K 为玻耳兹曼常数, $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$; A_d 为被测像元光敏面积, cm^2 ; ε 为黑体辐射率; FOV 为探测器组件的视场角, sr 。

(3) 线性拟合

通过最小二乘法对不同温度下被测像元或区域输出信号电压与波段辐射能量(或功率)的 N 组数据 (E_k, V_k) ($k=1, 2, \dots, N$) 进行线性拟合,理想直线方程:

$$V'_k = a \times E_k + b \quad (11)$$

通过式(11)算出每个测试点下的理想输出信号电压值 V'_k 后,各测试点实际测量值与理想值的偏差:

$$\Delta V_k = V_k - V'_k \quad (12)$$

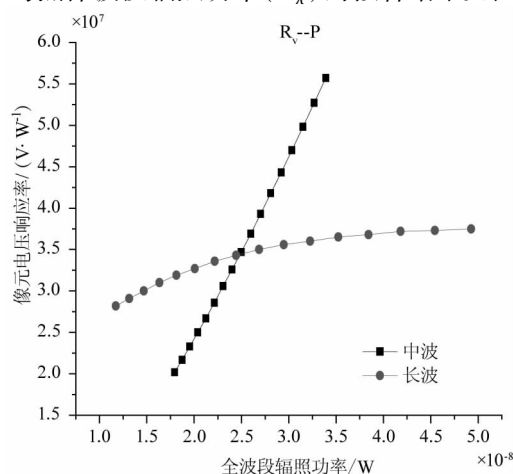
(4) 非线性度计算

非线性度为各测试点实际测量值与理想值偏差绝对值的最大值和实际输出信号电压范围(最大值减最小值)之比,计算公式如下:

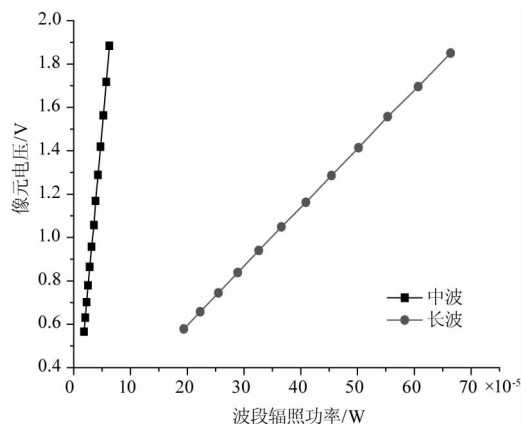
$$NL = \frac{\text{Max } |\Delta V_k|}{V_{\max} - V_{\min}} \times 100\% \quad (13)$$

3 实验及分析

为了选取一种评价探测器线性度的最佳方案,本文采用中波、长波两个波段的探测器分别采用两种方法进行了实验比较。器件的线性度用像元电压响应率(R_v)与黑体辐射功率(P)及像元信号电压(V_s)与黑体波段辐射功率(P_λ)的拟合结果见图2。



(a) 像元电压响应率与黑体辐射功率关系图



(b) 像元信号电压与波段辐射功率关系图

图2 方法1与方法2线性度拟合结果图

Fig. 2 Linearity fitting result diagram of method 1 and method 2

由图2可知,在进行线性拟合时,采用全波段能量与该波段下的像元电压响应率进行拟合时,由公式(6)可知,辐射功率受温度的影响,在改变温度进行线性度分析时,高于一定温度 T 时, $R_v - P$ 之间的线性关系逐渐变差。采用该方案进行线性拟合,则会带来较大误差。当采用该波段的输出信号与其波段对应的辐射能量进行拟合时,则会避免该类误差的出现。表1为采用不同方法的非线性度拟合结果。

表1 非线性度拟合各点结果

Tab. 1 Nonlinearity fitting point results

长波非线性度			中波非线性度		
温度/K	方法1	方法2	温度/K	方法1	方法2
278	6.59 %	0.06 %	278	3.20 %	0.01 %
286	4.57 %	0.07 %	281	1.77 %	0.04 %
294	2.50 %	0.15 %	284	0.88 %	0.11 %
302	0.63 %	0.11 %	287	0.01 %	0.12 %
310	0.76 %	0.03 %	290	0.53 %	0.14 %
318	1.85 %	0.02 %	293	0.84 %	0.18 %
326	2.76 %	0.00 %	296	0.90 %	0.09 %
334	3.28 %	0.14 %	299	1.10 %	0.14 %
342	3.44 %	0.20 %	302	1.14 %	0.10 %
350	3.27 %	0.20 %	305	1.01 %	0.04 %
358	2.59 %	0.01 %	308	0.76 %	0.15 %
366	1.81 %	0.11 %	311	0.48 %	0.13 %
374	0.56 %	0.05 %	314	0.13 %	0.15 %
382	0.55 %	0.28 %	317	0.25 %	0.06 %
390	2.69 %	0.25 %	320	0.68 %	0.15 %
398	4.58 %	0.26 %	323	1.23 %	0.38 %

从实验数据可知,在线性区域内对中长波器件进行线性度分析时,采用方法1测得的非线性误差分别为3.2%、6.59%,采用方法2测得的非线性误差分别为0.38%、0.26%,两种评价方案之间存在一定的差异性。这主要由于探测器的输出信号是由探测器所吸收的光子进行光电转化后得到的,即输出信号与入射的波段光子数(波段能量)是成近似比例关系的(忽略暗电流与冷屏辐射的信号,该信号在总体信号中所占比例很小,可以近似忽略,后续文章会深入进行分析),转换的比例即该探测器的量子效率;而黑体辐射的全波段能量中既包含进行光电转换的光子,又包含了不参与转换的其他波段的光子,因此与探测器输出的信号并非线性关系,该实验结果很好的验证了上述理论分析。

4 结 论

红外探测器为将光子转换为相应电信号的器件,以中长波两类探测器为实验器件,在探测器的线性区域内,通过两种方案的理论与实验结果的分析比较,基于像元输出电压与波段辐射功率拟合的非线性度方案对中长波器件分析的结果更加准确,且不受探测器波段、黑体温度的影响,应用范围具有普遍性,现为用户提供的测试报告中的非线性度均为采用波段黑体辐射功率拟合的结果,为红外探测器的线性度分析提供了参考方向。本文中未对短波、甚长波波段内的器件进行实验验证,后续在考虑暗电流、冷屏等辐射的信号的基础上对全波段的探测器进行深入研究讨论。

参考文献:

[1] DAI Shaosheng. Study on real-time non-uniformity correction of IRFPA [D]. Chongqing: Chongqing University, 2004. (in Chinese)

代少升. 红外焦平面阵列实时非均匀性校正研究[D]. 重庆:重庆大学,2004.

- [2] CUI Kun, CHEN Fansheng, SU Xiaofeng, et al. Adaptive non-uniformity correction method for IRFPA with integration time changing [J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(11): 67-73. (in Chinese)
崔坤, 陈凡胜, 苏晓峰, 等. 自适应积分时间改变的红外焦平面非均匀校正方法[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(11): 67-73.
- [3] XIA Wei. Measurement and analysis of linearity of infrared focal plane detector [J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(21): 141-143. (in Chinese)
夏威. 红外焦平面探测器线性度测试分析[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(21): 141-143.
- [4] DUAN Dong, SU Xiaofeng, HUANG Sijie, et al. Capturing parameter value of the medium wave area array IRFPA detector [J]. Infrared Technology, 2012, 34(2): 84-88. (in Chinese)
段东, 苏晓峰, 黄思婕, 等. 中波凝视红外焦平面探测器性能参数的提取[J]. 红外技术, 2012, 34(2): 84-88.
- [5] YU Yongtao, CHEN Yongguo, ZOU Liming, et al. Calibration techniques for data acquisition systems of IRFPA detectors [J]. Infrared Technology, 2012, 40(10): 961-965. (in Chinese)
余永涛, 陈勇国, 邹黎明, 等. 红外焦平面阵列探测器数据采集系统的校准验证方法[J]. 红外技术, 2012, 40(10): 961-965.
- [6] CHEN Honglei, HAO Lichao, DING Ruijun. Analysis of infrared FPA linearity test error [J]. Laser & Infrared, 2012, 42(6): 663-666. (in Chinese)
陈洪雷, 郝立超, 丁瑞军, 等. 红外焦平面器件线性度测试误差分析[J]. 激光与红外, 2012, 42(6): 663-666.
- [7] GB/T 17444-2013. Test methods for parameters of infrared focal plane arrays [S]. (in Chinese)
GB/T 17444-2013. 红外焦平面阵列参数测试方法[S].