

文章编号 1004-924X(2003)03-0265-05

关于红外探测器与红外焦平面阵列探测器 性能参数描述方法的商榷

崔敦杰

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130022)

摘要:对中国国标 GB/T 13584 与 GB/T 17444 关于红外探测器和红外焦平面阵列探测器噪声和相关性能参量定义方法提出了异议和见解。在国标中关于噪声的定义没有说明背景辐亮度和信号辐照度水平,因此容易导致关于噪声和相关参量的模糊观念。当信号很强时,光子噪声占主导地位,信噪比(SNR)与信号水平不成正比,此时由信噪比导出噪声等效功率(NEP)和 D^* 时应格外小心。当信号很弱时,可以忽略光子噪声,由信噪比导出 NEP 和 D^* 就变为很简单。

关键词:红外探测器; 红外焦平面阵列探测器; 探测器的性能参数

中图分类号: TN215 **文献标识码:** A

How to define noise and associated performance parameters for infrared detector and infrared focal plane array detectors

CUI Dunjie

(State Key Lab of Applied Optics, Changchun Institute of Optics,
Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022, China)

Abstract: Different opinions are presented on the definition of noise and associated performance parameters for infrared detectors and infrared focal plane array detectors in Chinese National Standards GB/T 13584 and GB/T 17444. Without background radiance and signal irradiance level given, the definition of noise in the Chinese National standard can easily lead to fuzzy conceptions of noise and associated performance parameters. When the signal is very strong, the photon noise predominates, signal to noise ratio is not directly proportional to signal level, and care must be exercised in deriving NEP and D^* from signal to noise ratio. When the signal is weak, and the photon noise can be ignored, it is very simple to derive NEP and D^* from signal to noise ratio.

Key words: infrared detector; infrared focal plane array detector; property parameters of detector

1 引言

近几十年来红外探测器与红外焦平面阵列探测器的发展很快,对其性能参数的描述方法也有

相应的发展,从描述单元探测器时间域噪声的方法发展到统筹考虑红外探测器和阵列探测器的时间—空间域三维噪声的描述方法^[1-4]。但是,笔者认为我国国标中关于红外探测器与红外阵列探测器噪声的定义有些不妥,本文提出来进行商榷。

2 噪声的概念

按 G. C. Holst 的描述^[5], 广义上讲, 噪声是信号中所有多余的成份, 也就是无用和有害的成份。但在信号处理领域, 这种说法也不够确切, 因为这种多余成分中能够扣除和修正的成分不能算噪声, 只有其中不能扣除和修正的部分才算噪声。比如, 暗信号中有一部分是可以扣除的, 暗场电流(电子数)的散粒噪声不能扣除。对阵列探测器中空间域像元响应的不均匀性而言, 有一部分是可以修正的, 但是不能修正的剩余不均匀性就表现为固定图像噪声。有信号就有噪声, 在暗场下也有噪声。处于绝对零度以上的任何电阻两端就有热噪声。下面考察一下国标中关于噪声的定义。

2.1 国标 GB/T 13584 中关于噪声的定义

在国标 GB/T 13584 中规定:“探测器噪声是探测器在无穷大负载时, 扣除前置放大器噪声后, 探测器两端的噪声。”在负载无限大时只要探测器的电阻有限, 则前置放大器噪声对探测器两端噪声的贡献极小, 扣不扣除没有多大意义。这就是说可把这一定义简化为:“噪声是……探测器两端的噪声。”很像一种同义语反复。这个定义中没有指出有没有背景辐射照射探测器, 也没有说明在多大的信号辐射条件下测噪声, 因此对于用噪声值再定义的 NEP 和 D^* 容易产生模糊概念。

2.2 国标 GB/T 17444 中关于噪声的定义

在国标 GB/T 17444 中关于红外焦平面阵列探测器像元噪声电压的定义是:“焦平面在背景辐射条件下, 像面输出信号电压涨落的均方根值, 单位为伏特(V)。”这个定义的前半句“在背景辐射条件下”似乎多余, 因为在绝对零度以上背景下工作的探测器都在“背景辐射条件下”工作, 都能满足这一定义前半句的要求。问题是背景辐射的强弱对探测器噪声的影响很大, 常常压倒其它噪声, 测试者或使用者应该在什么样的“背景辐射条件下”测量噪声才能算符合国标呢? 还应指出的是, 该定义中也没有规定信号辐射条件怎样。一般情况下信号辐射也产生噪声(与背景产生的噪声一起被称为光子噪声)。

3 重新考察噪声的描述与分类方法

关于单元探测器噪声的描述和分类方法在早期的有关著作中有详细论述^[6-7], 关于阵列探测器和红外成像系统噪声的描述与分类方法有新的发展^[1-4], 可参阅有关文献。这一节的目的是为了尽量避免易产生一些模糊观念, 强调其中的有关内容。

3.1 单元探测器的噪声

单元探测器的噪声基本上都是时间域的噪声, 其输出信号的涨落是在时间轴上显现的。对于用单元探测器构成的扫描系统而言, 只要噪声不是由于与之一起使用的存储器而产生, 就不发生与时间无关的“固定图像噪声”。

单元探测器的噪声可分为三类: 第 1 类是探测器固有的噪声, 如载流子的产生—复合噪声、 $1/f$ 噪声、热噪声、暗电流产生的噪声等; 第 2 类是由背景辐射与信号辐射产生的光生电子起伏引起的噪声, 称为光子噪声, 与光生电子数的 $1/2$ 次方成正比; 第 3 类是具有—定频率带宽的下联放大器产生的噪声, 计算时习惯于换算成探测器上的噪声进行计算。在下联电路中进行 A/D 变换时产生的量化噪声也是属于这一类噪声。这 3 类噪声都是独立的, 服从几何相加定律, 即:

$$(V_n)_{\text{total}} = [(V_n)_D^2 + (V_n)_A^2 + (V_n)_{\text{ph}}^2]^{1/2}, \quad (1)$$

其中: $(V_n)_{\text{total}}$: 探测器的总噪声电压;

$(V_n)_D$: 探测器固有的噪声电压;

$(V_n)_A$: 换算到探测器上的放大器与下联电路噪声电压;

$(V_n)_{\text{ph}}$: 光子噪声电压。

最容易产生模糊观念的成份就是光子噪声, 因为它是由背景与信号的辐射产生的, 所以用噪声值定义探测器的其它性能参数时必须指明背景和信号辐射的量值, 不然就没有实际意义。在早期的有关著作中, 对没有放大器噪声的理想探测器, 分背景噪声受限的情况和信号噪声受限的情况论述较多, 在国标中对这种情况也没有加以区分, 这是一种遗憾。

3.2 阵列探测器的噪声

红外焦平面阵列探测器的噪声分为时间域噪声和空间域噪声。时间域噪声的类型与单元探测

器的情况相同,但在成像系统中阵列探测器的每个像元与景物中的特定区域(也称为像元)相对应,其背景辐射与信号辐射情况与单元探测器的情况有区别。在这里谈“噪声”时也应指出背景和信号辐射条件。阵列探测器的“空间噪声”指的是在帧与帧之间不随时间变化的空间范围的响应的涨落。可以想像如下情况:用均匀的辐射照射阵列探测器时,在空间域上不随时间变化而又无法修正的响应上的涨落,通常称为固定图像噪声。D. Agostino 和 Webb 等人统筹考虑红外成像系统时间域和空间域噪声,发展了三维噪声模型^[1-3],使噪声的分类方法清楚和方便。

4 信噪比

常常用探测器输出端上的信号与噪声电压比表示探测器的信噪比:

$$(S/N) = \frac{V_s}{V_n}, \quad (2)$$

其中: V_s ——信号电压(V);

V_n ——噪声电压(V)。

有时也用一个积分时间内探测器上的光生信号电子数和噪声电子数表示信噪比:

$$(S/N) = \frac{N_s}{N_n}, \quad (2a)$$

其中: N_s ——一个积分时间内的光生信号电子数;

N_n ——一个积分时间内的噪声电子数。

探测器的不少性能参数是用信噪比来定义的。探测器的信噪比只有明确地规定背景辐射和信号辐射水平的条件下才有确定值。这里值得注意的是:在一般情况下式(2)和式(2a)表示的信噪比不一定与信号成正比,因为噪声中隐含信号产生的光子噪声。比如,对于受背景噪声限制的探测器而言,信噪比确实与信号成正比,但是对于受信号噪声限制的探测器而言,信噪比与信号的(1/2)次方成正比。这是用信噪比定义探测器的其它参数时容易产生模糊观念的原因之一。

5 噪声等效功率(NEP)

按定义,噪声等效功率(NEP)是使信噪比等于1时所需要的信号功率。在这里也应注明背景

辐射与信号辐射的条件。在早期的红外辐射探测理论中就有明确的论述^[6]。

5.1 受信号噪声限制的探测

对于理想探测器(没有放大器噪声,探测器固有的噪声也可忽略不计)而言,如可忽略背景辐射,这时探测只受信号噪声限制。如用这种系统观测窄光谱带的辐射源,则这时的噪声等效功率为:

$$(NEP)_{SL} = \frac{2h}{\eta} f, \quad (3)$$

其中 $(NEP)_{SL}$ 为受信号噪声限制情况下的噪声等效功率, h 为 Planck 常数, η 为量子效率, f 为下连电路滤波器的带宽, Δf 为量子效率。如果利用滤波器带宽和有效时间常数 τ 的关系式:

$$f = \frac{1}{2\tau}, \quad (4)$$

并令 $\eta = 1$, 则得

$$(NEP)_{SL} = \frac{h}{\tau}, \quad (5)$$

式(5)的物理意义是:对于单位量子效率的探测而言,平均来说,在一个观测时间内可以探测到一个光子。对于红外探测而言,这是极特殊的情况。

5.2 受背景噪声限制的探测

对于受背景噪声限制的探测而言,背景辐射在可见区域可能是由于云层对太阳光的散射引起的;对与红外区域而言,可能是由于周围的热辐射引起的。如果背景辐射较稳定,其强度的涨落不处于探测器下联滤波器带宽频率之内,则受背景限制探测的噪声等效功率为^[6]:

$$(NEP)_{BL} = \sqrt{\frac{2h}{\eta} f (P_s + P_B)}, \quad (6)$$

在 $P_s \ll P_B$ 时可写成:

$$(NEP)_{BL} = \sqrt{\frac{2h}{\eta} f P_B}, \quad (6a)$$

其中: $(NEP)_{BL}$ ——受背景噪声限制的探测的噪声等效功率;

P_s, P_B ——分别表示照射探测器的信号功率与背景辐射功率;

式(3)和式(6a)是两种极端情况下的噪声等效功率,是在忽略放大器噪声和探测器固有噪声的情况下推导出来的。在一般情况下 NEP 可能与信号辐射、背景辐射、探测器固有噪声以及放大器噪声有关。

在国标 GB/T 13584 和 GB/T 17444 中,在没有任何附加说明的情况下对 NEP 分别定义为:

$$\text{NEP} = \frac{P}{V_s/V_n} \quad (\text{GB/T 13584})$$

和

$$\text{NEP} = \frac{\bar{V}_N}{\bar{R}} \quad (\text{GB/T 17444}),$$

其中 P 为信号辐射功率, V_s 为信号电压, V_n 为噪声电压, \bar{V}_N 为平均噪声电压, \bar{R} 为平均响应率。这种关系在信噪比与信号成正比的情况下是成立的(亦即小信号、小信噪比时成立),但是信号很大、信噪比很高时就有疑问了(参见上几节的说明)。而且对于这种定义应注明背景辐射的水平,因为对于同一探测器来说(可认为固有噪声和放大器噪声不变),在不同的背景下可有不同的 NEP 值。

6 探测率 D^*

在国标 GB/T 13584 中对探测器黑体探测率 D_{bb}^* 的定义是:

$$D_{bb}^* = \frac{R_{bb}}{V_n} \cdot \sqrt{A_n \cdot f}, \quad (7)$$

式中: A_n ——探测器标称面积, cm^2 ;

f ——频谱仪带宽;

R_{bb} ——探测器对黑体的响应率;

V_n ——探测器的噪声电压 V 。

在国标 GB/T 17444 中规定,阵列探测器的像元探测率为:

$$D^*(i, j) = \frac{\sqrt{A_D}}{\sqrt{2} \cdot t_{\text{int}}} \cdot \frac{R(i, j)}{V_N(i, j)}, \quad (8)$$

式中: A_D ——像元面积;

t_{int} ——积分时间;

$R(i, j)$ ——像元响应率;

$V_N(i, j)$ ——像元噪声;

(i, j) ——像元序号。

这些公式与探测率的原始定义完全等效。原始定义是^[67]:

$$D^* = \frac{\sqrt{A_D \cdot f}}{\text{NEP}}, \quad (9)$$

在式(8)中利用了下联电路带宽和积分时间的关系式(4)。在这里应注意的是:不能在信号产生的光子噪声占很大比重的情况下测量噪声,算出 NEP,并且对计算 D^* 时的背景辐射应有个交待。

对于红外辐射探测而言,在绝大多数的情况下信号产生的光子噪声远小于背景产生的光子噪声,因此能够很容易地找到满足信噪比与信号成线性关系的区域。

7 噪声等效温差(NE T 或 NETD)

在国标 GB/T 17444 中关于噪声等效温差的定义是:平均噪声电压与目标温差产生的信号电压相等,该温差称为等效噪声温差,即目标温差与信噪比的比值,符号为 NETD,单位为绝对温差(K),由下式表示:

$$\text{NETD} = \frac{T - T_0}{(V_s/\bar{V}_N)}, \quad (10)$$

式中: T ——面元黑体温度, K;

T_0 ——背景温度, K;

V_s ——对应面元黑体与背景温差的焦平面信号电压, V;

\bar{V}_N ——平均噪声电压。

这里应该指出的是:目标与背景都是设定为一定温度下的黑体,而且 $T - T_0$ 不能太大,如果太大, $(T - T_0)$ 就不一定与 (V_s/\bar{V}_N) 成正比,即使 (V_s/\bar{V}_N) 与 V_s 成正比也不能保证温差与信号成正比。NETD 在实用红外系统中常被认为是很重要的参量,但是很难认为是探测器的性能参数,因为它不仅与目标温度、环境温度、工作波长(波长区域)有关,还与红外光学系统的 F 数、透过率等有关。

8 结束语

本文对国标中有关红外探测器与红外焦平面阵列探测器的某些性能参数的描述方法提出了浅显的见解,目的是引起国内红外领域学术界的重视和讨论。

参考文献:

- [1] D A GOSTINO J , WEBB C. 3-D Analysis framework and measurement methodology for imaging system noise[J]. *SPIE* , 1992 ,1689 :118-121.
- [2] SCOTT L ,A GOSTINO J D. NVEOD FL IR92 thermal imaging system performance model[J]. *SPIE* ,1992 ,1689 :194-203.
- [3] WEBB C M. An approach to 3-dimensional noise spectral analysis[J]. *SPIE* , 1995 ,2470 :288-299.
- [4] NELSON M D ,JOHNSON J F. General noise processes in hybrid infrared focal plane arrays[J]. *Opt Eng* ,1991 ,30(11) : 1682-1700.
- [5] HOLST G C. Testing and evaluation of infrared imaging systems[J]. *SPIE* , 1998 ,PM58 :203-207.
- [6] 金斯顿 R H. 光学和红外辐射探测[M]. 北京 :科学出版社 ,1984.
KINGSRON R H. *Detection of optical and Infrared Radiation* [M]. Beijing: Science Press. 1984.
- [7] WOLFE W L ,ZISSIS G J. *The infrared handbook* [M]. USA :Environmental Reseach Institute of Michigan ,1978.

作者简介:崔敦杰(1938 -) ,男 ,吉林汪清人 ,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研究员 ,长期从事光辐射测量、光学遥感器研制与辐射定标工作。