

〈材料与器件〉

288×4 红外 TDI 探测器光敏元尺寸与间距设计研究

潘胜达¹, 赵明², 林长青¹

(1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083; 2. 上海海事大学 上海 201306)

摘要: 针对国外进口 Sofradir 公司长波 288×4 扫描型时间延迟积分 (TDI) 探测器, 通过分析其沿扫描和沿线列方向上光敏元尺寸和间距对整个成像系统的系统调制传递函数 (MTF) 的影响, 给出了探测器光敏元尺寸和间距与整个成像系统分辨率之间的相互关系, 为新型 TDI 型探测器阵列光敏元排列设计提供了理论参考。

关键词: TDI 型探测器; 光敏元间距; 光敏元尺寸; 调制传递函数;

中图分类号: TN215 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8891(2013)06-0355-05

The Study of 288×4 TDI IRFPA's Photosensitive Pixel Size and Pitch

PAN Sheng-da¹, ZHAO Ming², LIN Chang-qing¹

(1. Shanghai Institute of Technical Physics of Chinese Academy of Sciences, Shanghai 20083, China;

2. Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract: According to the Sofradir 288×4 long wave Time Delay and Integration (TDI) infrared focal plane assemblies, it analyzes the effects between the photosensitive pixel size and pitch of in-scan and cross-scan direction and the modulation-transfer-function of the imaging system. After that we show the relationship between the photosensitive pixel size and pitch of the scanning detector and the resolution of the imaging system. For the new type scanning TDI detector, it will provide a good theoretical reference to the design of the photosensitive array.

Key words: TDI detector, photosensitive pixel, detector pitch, detector size, MTF

0 引言

近年来扫描型红外焦平面探测器技术发展和器件的产品化引人注目, 成为高性能二代热成像系统主要的探测器类型之一。该类型的探测器生产商主要包括德国的 AIM 公司, 以色列的 SCD 公司, 法国的 Sofradir 公司, 英国的 BAE 与 DRS 公司和美国 Raytheon 公司等^[1]。其中 288×4 长波红外 TDI 探测器更是其中的典型代表, 上述几家生产商皆有生产。该类型的 288×4 的 TDI 型红外探测器的光敏元皆采用相同的尺寸及排列方式, 其具体结构如图 1 所示。

如图 1 所示, 该 TDI 探测器沿线列方向上的光敏元尺寸 d_y 为 28 μm, 中心间距 p_y 为 28 μm; 沿扫描方向上探测器光敏元的尺寸 d_x 为 25 μm, 中心距 p_x 为 43 μm。(后文中对 d_y , p_y , d_x , p_x 的引用都参照图 1)

的定义)

可见该探测器的光敏元尺寸和间距与一般探测器光敏元的尺寸和间距相比, 存在比较大的差异^[2]。为分析此类探测器的光敏元的尺寸及其排列的设计原理, 本文先对从 MTF 理论的角度对整个 TDI 型长波红外扫描探测器成像系统进行了分析, 之后在此基础上从数据采样理论和实际 TDI 探测器制作工艺等方面出发, 最终给出探测器光敏元尺寸和间距与成像系统分辨率之间的相互关系, 并对光敏元尺寸和间距的设计给出了参考意见。

1 TDI 成像系统调制传递函数

MTF 是现今评价一个光电成像系统的成像质量的主要的较为客观的手段, 它反映成像系统对物体不同频率成分的传递能力。

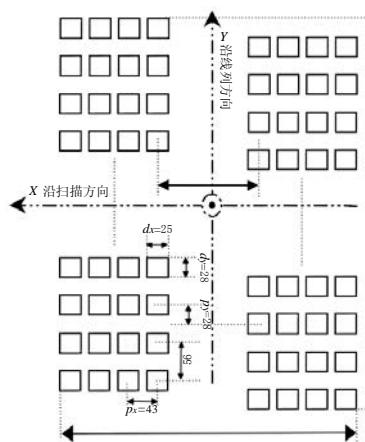


图1 288×4红外探测器光敏元排列图 (单位 μm)

Fig.1 PV array topology (dimensions in μm)

从 MTF 的角度而言, 整个 TDI 探测器的成像系统可以分为以下几个部分: 一个无像差衍射受限的光学系统, 一个红外 TDI 探测器以及后端的图像重建系统。由于本文主要研究探测器的光敏元设计, 因此关注的重点是光学系统和探测器系统的 MTF。整个成像系统 MTF 结构模型如图 2 所示。

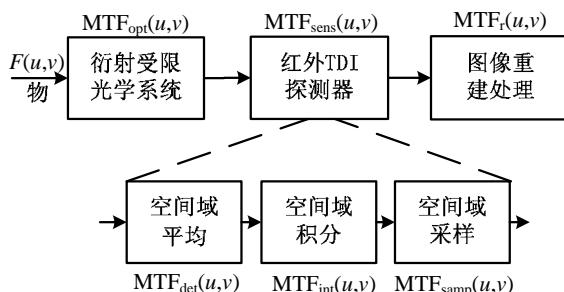


图2 TDI成像系统的 MTF 模型

Fig.2 Model of the TDI imaging system for the MTF modeling purposes

如图 2 所示, 整个成像系统成像过程如下: 目标场景经光学系统 (MTF_{opt}) 聚焦至探测器焦平面, 探测器的光敏元在有限区域 (MTF_{det}) 内对图像信号进行卷积, 之后由于扫描积分效应 (MTF_{int}) 再对之前的卷积结果进行累加, 同时探测器利用其光敏元位置对接收到的累加图像信号之和进行采样 (MTF_{samp}), 之后经过后端电子学系统量化转化为离散数字信号, 最后再利用这些采样所得到的数字信号重建得到原始图像。

1.1 光学系统 MTF

已经证明, 一般情况下, 衍射极限光学系统中, 由像差引起的弥散圆的能量分布为第一类贝赛尔曲线。对此式进行傅里叶变换并取其模值可以得到衍射

受限的光学系统的 MTF。由于点扩散函数 (point spread function) 及相应的 MTF 被认为在直角坐标系中水平和垂直是相互独立。为了便于理解, 这里只给出其在 1-D 方向上的表达式:

$$MTF_{opt} = \frac{2}{\pi} \left\{ \cos^{-1}(\xi\lambda F_N) - (\xi\lambda F_N) \left[1 - (\xi\lambda F_N)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (1)$$

式中: $1/\lambda F_N$ 为光学系统 MTF 的截止频率; λ 为波长; F_N 为光学系统 F 数; ξ 为空间频率。

1.2 红外 TDI 探测器 MTF

由于现实中红外探测器阵列中只包含有限数量的光敏元, 是一个典型的连续输入/离散输出的采样系统, 不满足线性空间不变性。因此为了描述离散过程初相位的影响, 在红外成像系统性能评价中一般以初相位在周期内平均分布为条件下得到的平均调制传递函数来作为探测器的调制传递函数, 其表达式如下所示^[3]:

$$MTF_{sensor} = MTF_{det} * MTF_{samp} = [sinc(\pi df) * sinc(\pi pf)] * comb(pf) \quad (2)$$

式中: d 和 p 分别代表了光敏元的尺寸和采样间距; * 代表卷积 (后同); sinc 函数表达式如下所示:

$$sinc(x) = \sin(\pi x)/\pi x \quad (3)$$

comb 函数为梳状函数, 由 δ 函数阵列构成, 其表达式为:

$$comb(x) = \sum_m \delta(x - m) \quad (4)$$

值得注意的是, 上式是探测器静止状态下的 MTF, 当探测器进行扫描成像时由于存在扫描积分效应, 因此还需要在式(2)的基础上乘以一个扫描积分的 MTF, 其表达式如下:

$$MTF_{int} = sinc(\pi lf) \quad (5)$$

式中: l 为光敏元于积分时间内在焦平面扫描方向上经过的距离。

图 3 分别从频域即 MTF 的角度描述了整个红外 TDI 成像系统的工作流程。从图 3 中我们可以发现 TDI 成像系统属于一个经典的离散采样系统。根据香农采样定理, 如果经过光学系统和 TDI 探测器之后的图像信号的最高频率近似由探测器自身的截止频率 $1/d$ 所限制决定, 那么当探测器的采样频率 (采样间距 p 的倒数) 大于等于该截止频率的 2 倍时, 即 $1/p \geq 2 \cdot (1/d)$ 时, 就可以理想地重建被数字化的图像信号, 否则高于系统的 Nyquist 频率 (采样频率的一半, 即 $1/(2p)$) 的任何输入信号都将沿其对折混入低频当中, 如图中最后频域内出现的混叠现象所示, 混淆后的初始信号

将无法被正确恢复。

可见在设计光敏元的尺寸及间距时需要满足以上的分析才能够充分利用光学系统和探测器的自身的分辨率性能, 避免最终成像结果的混叠。

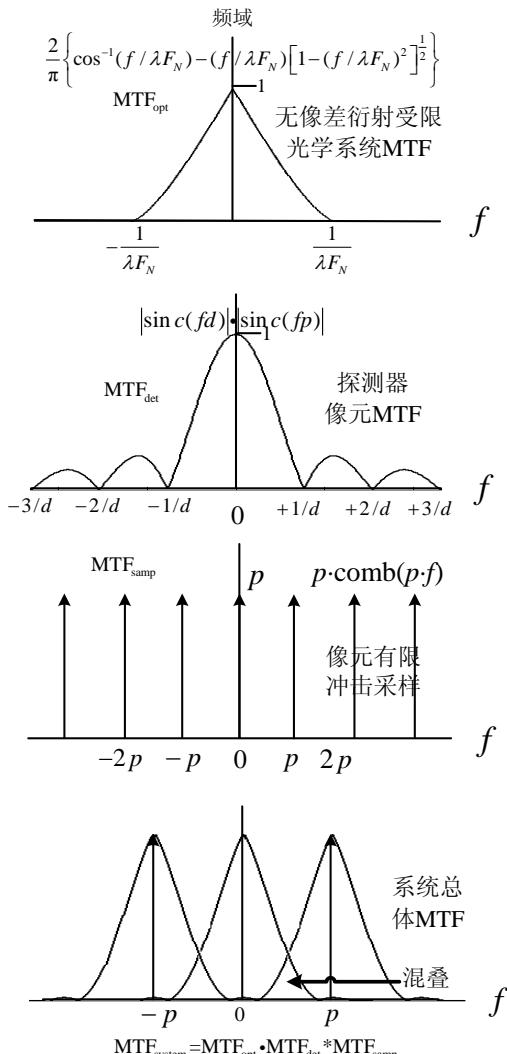


图3 TDI 成像系统成像过程图解

Fig.3 Operation process of the imaging system

2 TDI 探测器光敏元尺寸及间距设计分析

2.1 沿线列方向探测器光敏元尺寸及间距设计分析

通过 288×4 TDI 探测器的数据手册可知该探测器的最佳匹配的光学系统的 F 数为 1.67, 工作波长为 7.7~10.3 μm , 可知该 TDI 探测器所匹配的光学系统的截止频率为 1/20 μm 左右, 再者考虑当时的生产工艺水平限制等因素, 因此将沿线列方向上的光敏元尺寸 d 设为 28 μm 是比较合理的选择。

在确定探测器间距时主要考虑的因素有以下两点: 首先, 对于红外 TDI 探测器而言, 由于工艺等问题导致的光学串音和电子学串音相对于可见光而言大的多。因此在设计红外探测器沿线列方向上光敏元

排列时一般会选择品字形排列^[4-5], 以此来增大各光敏元之间的间距, 减少串音。

其次, 即使通过品字形排列得到了等效填充因子为 100% 的光敏元排列, 对于实际该 288×4 TDI 探测器最佳匹配的成像系统来说, 也属于欠采样系统。因为通过前文的计算可知, TDI 探测器所要采样的信号在经过光学系统和 TDI 探测器滤波之后, 其最高频率约为 $1/d_y = 1/28$, 但是此时探测器的实际采样间距 p_y 为 28 μm , 未能达到采样定理的要求 Nyquist 采样频率。

为弥补欠采样系统所造成的系统高频分量的混叠, Sofradir 公司在 288×4 TDI 探测器的应用中 (SADA、SADA II 等) 使用了名为“点头”隔行采集的微扫描技术。其实现方式如图 4 所示。

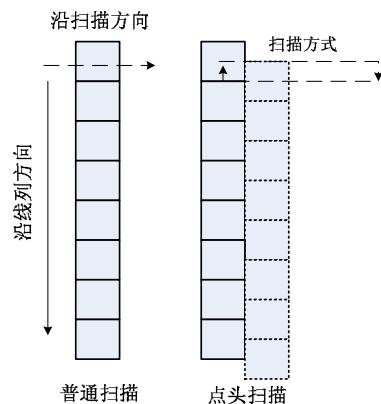


图4 点头扫描方式示意图

Fig.4 Operation process of micro-scan

从上图可见, “点头”隔行采集的作用等于将沿线列方向上的空间采样间距从原来的 28 μm 减小到 14 μm , 等效地提高了 2 倍的采样频率, 以此充分利用了探测器光敏元自身的分辨率极限^[6]。

据此并参照式(2), 可得 288×4 探测器成像系统沿线列方向上的总 MTF 为:

$$\begin{aligned} MTF_{\text{system_y}} &= MTF_{\text{opt_y}} \cdot MTF_{\text{det_y}} \cdot MTF_{\text{samp_y}} = \\ MTF_{\text{opt_y}} &\cdot \left[\sin c(d_y f) \cdot \sin c\left(\frac{p_y}{2} f\right) \right] * \text{comb}\left(\frac{p_y}{2} f\right) \end{aligned} \quad (6)$$

图 5 对沿线列方向上的系统 MTF 进行了描述, 其中蓝色虚线为光学系统的 MTF, 红色虚线为探测器的采样孔径的 MTF, 绿色曲线为沿线列方向上系统的总 MTF, 黑色虚线为未采用微扫描后的 Nyquist 频率, 黑色实线是微扫描之后的 Nyquist 频率。

如图可见在沿线列方向上采用如图 1 的光敏元尺寸和排列不仅能够减少沿线列方向上的串音, 还充分地利用了光学系统和探测器光敏元的分辨力。

2.2 沿扫描方向探测器光敏元尺寸及间距设计分析

在设计沿扫描方向光敏元尺寸和间距时也需要考虑光敏元间串音和欠采样问题。由于在扫描方向上存在扫描积分过程且 TDI 结构的探测器对与扫描成

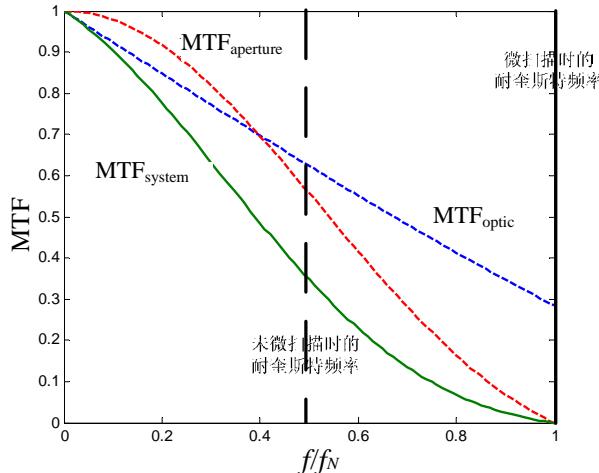


图 5 沿线列方向上系统 MTF

Fig.5 MTF of cross-scan

像的时序有着比较严格的限制，因此无法将亚像元技术直接应用于沿扫描方向上，所以为了解决串音和欠采样的问题，TDI 探测器生产厂商现在一般会在沿扫描方向采用过采样技术。

图 6 说明了 4 级 TDI 的工作方式下的超采样工作原理及其与未采用过采样技术的探测器的工作方式的区别。

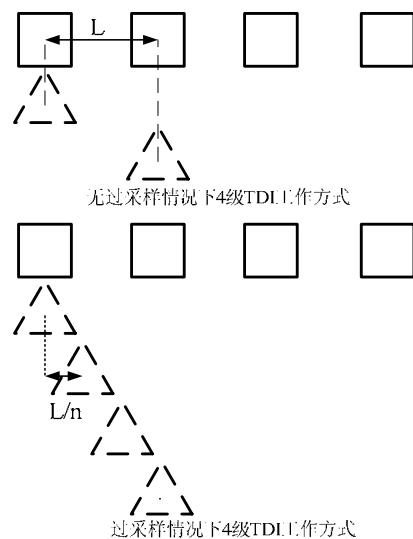


图 6 过采样与非过采样下 TDI 的实现

Fig.6 Representation of TDI with supersampling and without supersampling

由图 6 可见，和普通 TDI 探测器不同，采用过采

样技术的 TDI 探测器在原来的采样间距 L 内采样 n 次，以此将系统的等效采样间距减小了 n 倍。

本文分析所用的 288×4 TDI 探测器中也使用了该种过采样技术，其具体实现方式如图 7 所示。

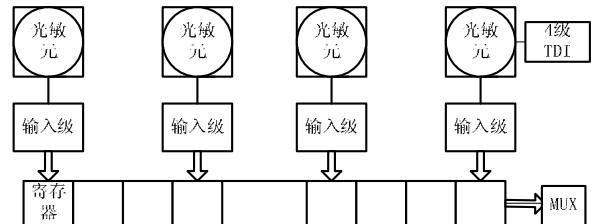


Fig.7 4 级 TDI 实现结构

Fig.7 The schematic of 4-stage TDI structure

图 7 中 288×4 TDI 探测器的每行光敏元对应 4 级 TDI 光敏元，对应 10 个存储寄存器。其中，第 1 级到第 3 级光敏元每级对应 3 个寄存器，第 4 级对应 1 个寄存器，4 个光敏元产生的信号在存储寄存器中经过连续 3 次转移，与相邻光敏元的采样信号相加。若 t 为当前时间， T 为转移周期， $s_i(t)$ 为第 i 级光敏元输出的信号， $S_4(t)$ 为 t 时刻 TDI 级数为 4 的光敏元输出的信号，则有：

$$S_4(t) = [s_4(t) + s_3(t-3T) + s_2(t-6T) + s_1(t-9T)]/4 \quad (7)$$

可见，前级光敏元扫描到下一级光敏元所对应的空间位置时需要 3 次转移，这样一个转移周期 T 的时间，景物运动对应探测器阵列上移动了 $1/3$ 个光敏元间距 ($p_y/3$ ，即 $14.3 \mu\text{m}$)，因此在该工作模式下探测器沿扫描方向上的等效采样间距为 $14.3 \mu\text{m}$ 。这样的设计既保证了沿扫描和沿线列两个方向上的截止分辨率近似相等，又保证了沿扫描方向上相邻光敏元之间有足够的间距以降低串音^[7]。

此外，为了使得最终的成像效果不发生压缩或者拉伸现象，还应该尽量使得沿扫描和沿线列方向上的 MTF 近似相等，于是有：

$$MTF_{system_x} \approx MTF_{system_y} \quad (8)$$

式中： MTF_{system_y} 是沿线列方向上的总系统 MTF，如式(6)所示； MTF_{system_x} 是沿扫描方向上的总系统 MTF，按照上文所述并参照式(2)，可得其表达式如式(9)所示：

$$MTF_{system_x} = MTF_{opt_x} \cdot MTF_{det_x} \cdot MTF_{int_x} \cdot MTF_{samp_x} = \\ MTF_{opt} \cdot \left[\sin c(d_x f) \cdot \sin c\left(\frac{p_x}{3} f\right) \right] \cdot \sin c(l_x f) \cdot \text{comb}\left(\frac{p_x}{3} f\right) \quad (9)$$

式中： l_x 为光敏元于积分时间内在焦平面扫描方向上经过的距离，可以通过该探测器手册中默认最佳工作方式：20 μs 帧时间，19 μs 积分时间计算得出^[8]。其

值如式(9)所示:

$$l_x = \frac{19}{20} \cdot \frac{p_x}{3} \quad (10)$$

将以上各式代入式(8), 可得到使该式成立的 $d_x \approx 25 \mu\text{m}$, 可见计算结果和图 1 中探测器实际采用的光敏元尺寸基本相等。

图 8 中对沿扫描方向上采用两种光敏元尺寸的探测器 MTF 和沿线列方向上的探测器 MTF 进行比对。其中红色曲线 $\text{MTF}_{dx=25}$ 为光敏元尺寸 d_x 为 $25 \mu\text{m}$ 时沿扫描方向上的 MTF, 绿色曲线为 $\text{MTF}_{dx=28}$ 光敏元尺寸 d_x 为 $28 \mu\text{m}$ 时沿扫描方向上的 MTF, 蓝色曲线 MTF_y 为沿线列方向上的 MTF。

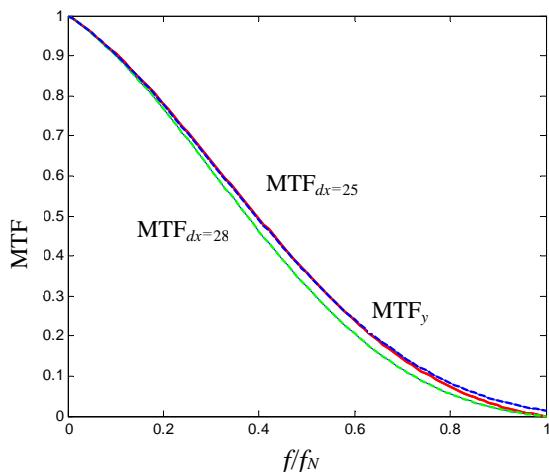


图 8 两方向上 MTF 对比

Fig.8 MTF Comparison of in-scan and cross-scan

由图 8 可见, TDI 探测器与面阵探测器不同, 由于面阵探测器不存在扫描积分的过程, 因此其探测器光敏元一般都设计成正方形即可, 而扫描型 TDI 探测器由于在沿扫描方向上存在扫描积分效应, 因此需要稍微减小沿扫描方向上的光敏元尺寸以此来补偿扫描积分效应带来的 MTF 的衰减, 使得两个方向上的 MTF 近似相等。值得注意的是, 在一些成像应用中若积分时间占据整个行周期的极小的一部分情况下, 由于扫描积分效应的影响基本可以忽略, 因此探测器在这种情况下亦可以设计成正方形。

3 结论

为使 TDI 探测器探测器具有良好的成像质量, 探测器两个方向上光敏元尺寸和间距应满足如下关系:

首先需要保证两个方向上通过过采样或者亚像元技术后的系统采样间距相等, 即两个方向上的 Nyquist 频率相等, 这样可以保证两个方向上都有相同的分辨率; 其次, 要求两个方向上的 MTF 近似相等。

按照如上描述, 在设计 TDI 探测器时可使得沿线列方向上的光敏元尺寸 d_y 为 $2L$, 通过品字形排列后将该方向上的间距 p_y 也设定为 $2L$, 之后通过 2 倍微扫描可在沿线列方向上等效得到 L 的分辨率。在沿扫描方向上, 可将光敏元的间距 p_x 设为 $3L$, 之后通过 3 倍过采样将分辨率提高至 L , 然后通过两个方向上 MTF 的表达式计算得到使得两个方向上 MTF 相等的情况下 d_x , 最后得到沿线列方向和沿扫描方向上分辨率都为 L 。

采用上述这样的设计既提高了探测器的采样频率, 充分利用了探测器光敏元自身的分辨力, 进而提高了两个方向上的空间分辨率, 又合理地利用了为减小串音而产生的光敏元间的间距, 最后还弥补了因扫描效应而引起的两个方向上 MTF 的误差。

参考文献:

- [1] 吴铮, 陆剑鸣, 白丕绩, 等. 俄罗斯与西方国家的长波 MCT 红外焦平面探测器比较与分析[J]. 红外技术, 2010, 32(5): 291-296.
- [2] 程有度, 孙光英, 李煜, 等. 扫描型探测器光敏元尺寸设计研究[J]. 红外技术, 2010, 23(7): 384-386.
- [3] Stephen K Park, Robert Schowengerdt, Mary-Anne Kaczynski. Modulation-transfer-function analysis for sampled image systems[J]. *Applied Optics*, 1984, 23(15): 2572-2582.
- [4] Fiodor F Sizov, Yuriy P Derkach, Sergei V. Korinets, et al. 576×6 ROIC for MCT LWIR Arrays [C]//Proc. of SPIE, 2005, 5726: 140-145.
- [5] Dong Mei-feng, Chen Xing, Qiu Guang-yin, et al. The characteristic analysis and optimization design for HgCdTe TDI infrared detector array [C]//Proc. of SPIE, 2011, 8193: 1-9.
- [6] 金伟其, 王春勇, 张楠, 等. 扫描型焦平面热成像系统的亚像元处理算法研究[J]. 红外与毫米波学报, 2005, 24(4): 261-264.
- [7] Kai M Hock. Effect of oversampling in pixel arrays[J]. *Optical Engineering*, 1995, 34(5): 1281-1288.
- [8] Sofradir. PLUTON LW K508 288×4 LWIRCMOS integrated detector dewar cooler assembly(IDDCA) with microcooler type K508 technical specification[Z]. France: Sofradir, 2005.