

# 480 × 6 长波红外探测器的低噪声采集系统设计

谢宝蓉<sup>1</sup>, 傅雨田<sup>1</sup>, 张滢清<sup>2</sup>

(1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083; 2. 上海太阳能工程技术研究中心有限公司, 上海 200241)

**摘要:**480 × 6 长波制冷红外探测器是一款 480 列, 6 阶 TDI 的高探测器率的 CMOS 探测器。以此探测器为例, 介绍了长波红外探测器采集系统的低噪声设计过程。着重解决了硬件电路在满足驱动的条件下如何降低噪声的问题, 试验结果表明采集系统工作正常, 且具有较好的噪声特性, 在 300 K 黑体直接照射情况下, 整个采集系统所测得的均值噪声为 1.20 mV, 信噪比可达到 55 dB 以上。

**关键词:**CMOS; TDI; 长波; 采集系统; 低噪声

**中图分类号:**TN215      **文献标识码:**B

## Design of the acquisition system with low noise based on 480 × 6 long wavelength infrared detector

XIE Bao-rong<sup>1</sup>, FU Yu-tian<sup>1</sup>, ZHANG Ying-qing<sup>2</sup>

(1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. Shanghai Solar Engineering and Technical Research Center Ltd., Shanghai 200241, China)

**Abstract:**The 480 × 6 cooled long wavelength infrared detector is a 480 row, 6-stage TDI, high detection rate CMOS detector. The paper gives a detailed description of design procedure on the principle of low noise. It focuses on the problem how to reduce noise under the circumstance of guarantee ability of drive load. The experiment result demonstrates that system works well and has a comparably good noise characteristic. The RMS noise of the acquisition system is 1.20 mV and the SNR reaches over 55 dB under the irradiation of blackbody at 300 K.

**Key words:**CMOS; TDI; long wavelength; acquisition system; low noise

### 1 引言

近年来,长波红外成像技术对地和太空观测已经成为一个重要的发展方向<sup>[1]</sup>。而探测器成像质量的好坏直接关系到观测的精度。其中,探测器的采集系统噪声处理是十分关键的技术环节之一,较大的噪声会降低探测系统的探测灵敏度,减小工作动态范围,降低图像质量,从而影响系统测量的精度。

本文以 480 × 6 探测器为例,详细介绍了长波红外探测器采集系统的低噪声设计过程。特别地,对于如何减小探测器驱动电路噪声、A/D 量化噪声以及图像背景减除、非均匀性校正去噪方法给出了详细描述,并在理论上分析了电路各部分产生的噪声

值,且给出实际图像信噪比。

### 2 采集系统概述

应用于 8 ~ 12 μm 大气窗口的 480 × 6 探测器,是一款具有 6 阶 TDI 功能的斯特林制冷探测器。该探测器图像信号的动态范围大于 74 dB,比探测率在 300 K 时,可达  $2.6 \times 10^{11} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ <sup>[2]</sup>。图像采集系统完成了此探测器的时序驱动、电路低噪声设计以及 PCI 卡数据采集、图像显示及处理等功能。

**基金项目:**福建省青年科技人才创新项目(No. 2007F3066)资助。

**作者简介:**谢宝蓉(1980 -),女,在读博士,研究方向为红外遥感仪器信号获取与处理技术。E-mail: littlecrab1024@126.com

**收稿日期:**2009-05-27; **修订日期:**2009-06-10

采集系统如图1所示,当长波红外信号经过光学系统汇聚到达探测器后,由FPGA驱动各时钟信号产生模拟信号,输出的信号首先经过滤波、差分放大、A/D采样量化、并在FPGA内部进行存储、处理后,转化为LVDS串行差分信号传输到主机中的PCI

采集卡中,并由计算机应用程序控制进行采集、实时显示并处理图像数据<sup>[1]</sup>。

### 3 数据采集系统组成

#### 3.1 探测器时序驱动

探测器的时序如图2所示。

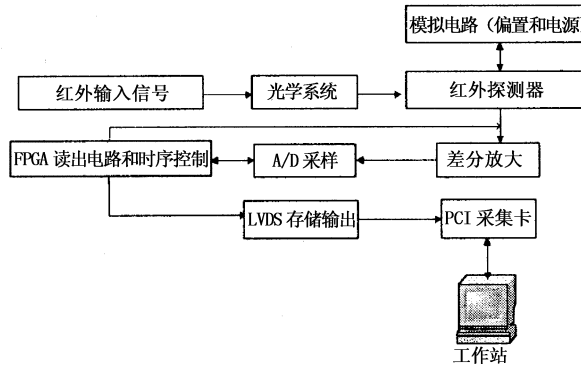


图1 采集系统框图

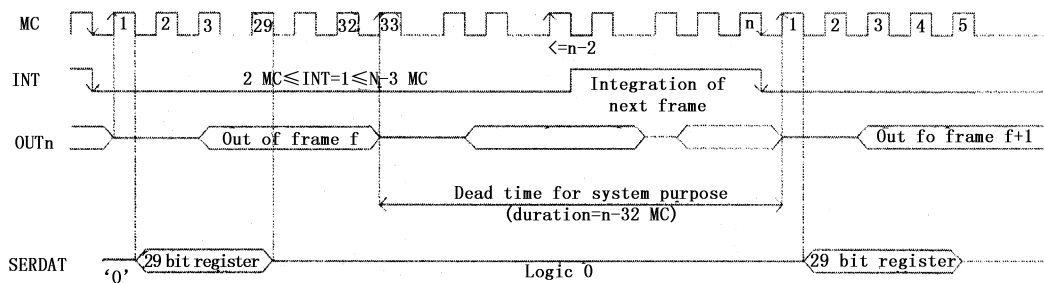


图2 探测器时序图

其中,MC为探测器主时钟,最大为5MHz,它同步读出电路的所有信号。INT为积分时间以及读出时间控制信号。SERDAT是串行输入数据控制字,用于控制TDI模式下积分的方向、调节积分增益、取消选定某些像素。

FPGA根据图3所示时序,设定帧周期为2.12ms,MC主时钟为1MHz,每帧积分时间为20μs,SERDAT配置为增益为1,选定全部像素曝光输出。仿真初始波形如图3所示。

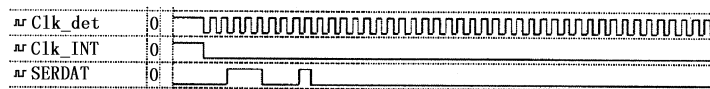


图3 主时钟、积分信号等仿真波形

#### 3.2 探测器偏压驱动

如表1所示,此款探测器共需提供9种直流偏压。其中有2种可调电压和7种固定电压。

由于各偏压的噪声要求较高,一般来说,DC/DC或LDO输出噪声较大,设计中不采取DC/DC或LDO电压转换,而采用低噪声的基准电压源进行变换输出,并且在基准电压源的前后端都进行滤波。

特别地,PV二极管偏置电压Gpol对于探测器输出幅度大小和噪声特性都起着关键性的作用,它需要根据不同的探测器进行调节大小,从而起着优化探测器噪声和输出信号幅值的作用。Gpol

表1 直流偏置电压

名称	功能	范围/V	噪声容限/ $\mu\text{V}$
Gpol	PV二极管偏置	0.5~2	100
Vpd	非选择像素偏置	1.6~4.4	100
Vdda	模拟电压	5	$1 \times 10^3$
Vdd	数字电压	5	$1 \times 10^4$
Vddo	多路复用器及采样保持电压	5	$1 \times 10^3$
Vr	积分电容重置	3	100
Vref和Vswsref	TDI参考电平1	3.1	100
Vswref	TDI参考电平2	3.1	100
Vswsref	采样保持参考1	2.4	100
Vsref	采样保持参考2	2.4	100
Ajtref	输出动态范围调整电压	2.65	100

偏压的实现选用 ADI 公司的低噪声参考电压源 ADR430,通过可调电阻分压进行调节得到所需电压,如图 4 所示。ADR430 电压噪声峰峰值为

3.5 μV(0.1 ~ 10 Hz),温漂系数为 2 × 10<sup>-6</sup>/°C,远小于要求的最大均方根噪声(100 μV)。通过实验调节与发现,Gpol 选在 0.80 V 较为合适。

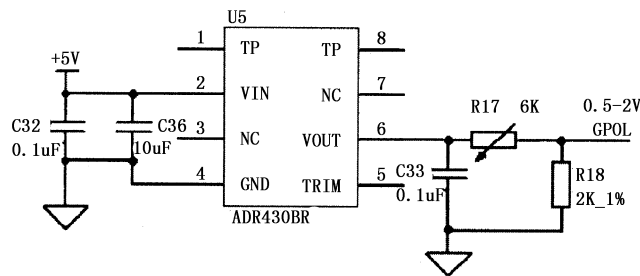


图 4 ADR430 电路图

### 3.3 信号输出滤波

当杜瓦的外部负载输出电阻大于 100 kΩ,输出电容小于 10 pF 时,信号输出动态范围为 1.6 ~ 4.4 V。探测器信号 16 路并行输出,共分 30 次选通 480 个像素值。选通后的像素点首先经过滤波处理,这里采用一阶低通滤波,设定 MC 主时钟的最高频率为 1 MHz,则模拟信号变化的频率也为 1 MHz,那么设计中 RC 低通滤波的截止频率设为 3 MHz,即:

$$f_{3dB} = \frac{1}{2\pi RC} = 3 \text{ MHz} \quad (1)$$

选择 R = 1 kΩ, C = 50 pF。

### 3.4 射随放大器

为提高输入阻抗,减少输出阻抗,在滤波后的模拟信号后面加入一级射随放大器。为保证杜瓦的输出电阻大于 100 kΩ,采用输入阻抗为 1 MΩ 的 AD8130,噪声系数为 12.5 nV/√Hz,对于 1 MHz 模拟输入信号,噪声为 12.5 μV。运放是模拟输入处理的前级,其对于信号的总噪声影响最大,因此,在选择运放时,尽可能地选择噪声系数小的运放。

### 3.5 A/D 模数转换器

在选择 A/D 时,需要根据模拟信号的动态范围确定 A/D 的输入范围,根据模拟信号的频率确定采样率,以及模拟信号要分辨的最小幅值确定 A/D 的位数。

根据量化噪声与 A/D 位数的关系<sup>[3]</sup>:

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{dB} = 6n + 10.8 \quad (2)$$

其中,  $\left(\frac{S}{N}\right)_{dB}$  为 A/D 量化信噪比; n 为量化位数。可见,A/D 位数越高,量化信噪比也越高。

对于输出动态范围为 2.8 V,频率为 1 MHz 的模拟信号,选用 ADI 公司生产的 AD9240,它是低噪声的 14 位 A/D 转换器,10MSPS 采样率,单一 +5 V 供电,典型的信噪比为 78.5 dB(1 MHz),则其最小分辨的电压值为 0.305 mV。当输入信号动态范围为 2.8 V 的信号时,噪声约为 0.333 mV。

如图 5 所示,为减少 A/D 输入端串入 30 Ω 的电阻,并且并联上一个 1 nF 的电容,相当于对输入信号进行一阶低通滤波。另外,与 BIAS 引脚相连的

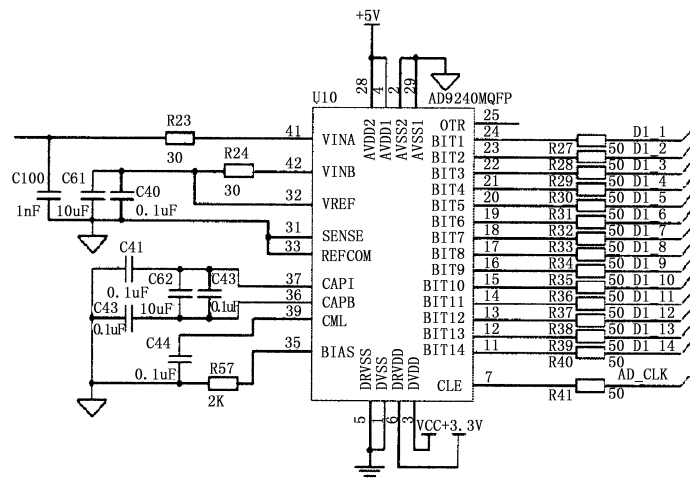


图 5 AD9240 电路图

电阻为  $R_{bias}$ ,  $R_{bias}$  不同的阻值对应着不同的信噪比和功耗, 在同一频率时钟驱动下,  $R_{bias}$  越小, 信噪比越高, 但功耗越大。此时选择尽量小的阻抗提高信噪比, 设定  $R_{bias} = 2 \text{ k}\Omega$ 。

为减少高频信号的反射和振铃效应, 在 A/D 输出的数字信号中串入  $33 \text{ }\Omega$  电阻。

根据理论估算, 由运放引入噪声为  $12.5 \text{ }\mu\text{V}$ , A/D 模数转换器的噪声为  $0.333 \text{ mV}$ , 两部分引入噪声应为功率相加, 值为:

$$V_i = \sqrt{0.0125^2 + 0.3330^2} \text{ mV} \approx 0.33 \text{ mV}$$

长波  $480 \times 6$  探测器动态范围 DR 大于  $74 \text{ dB}$ , 动态电压范围为  $V_{sat}$ , 那么其最大噪声为:

$$V_d = \frac{V_{sat}}{DR} = 0.56 \text{ mV}$$

原则上, 模拟电路部分引入噪声要小于探测器

本身的噪声, 设计中的模拟电路部分噪声要小于探测器本身噪声, 因此符合要求。

驱动电路部分噪声计算得:

$$V_{total} = \sqrt{V_i^2 + V_d^2} = 0.65 \text{ mV}$$

### 3.6 FPGA 数字信号处理

FPGA 是整块采集控制板的核心部分, 主要完成探测器的驱动、A/D 数据的读取、各像素数据的存储、处理以及数据的发送等。

设计中 FPGA 芯片采用的是 ALTERA 公司的 Cyclone3 EP3C25Q240CBNES, 此芯片是 2007 年新上市的芯片, 内部约有 24624 个逻辑单元, 594 Kbits RAM, 66 个 Multipliers, 4 个 PLL, 以及 148 个 I/O 引脚, 较适合于视频处理。

FPAG 流程图如图 6 所示。

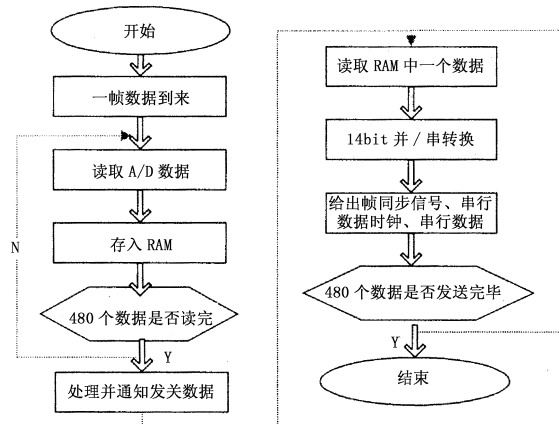


图 6 FPGA 算法流程图

图像数据在转化为串行数据后, 需要传送到 PCI 采集卡中进行图像显示, 中间需要经过一段较长距离的传输。LVDS 是一种低摆幅的差分信号技术, 它使得信号能在差分 PCB 线对或平衡电缆上以几百 Mbps 的速率传输, 其低压幅和低电流驱动输出实现了低噪声和低功耗。实际设计中采用 National Semiconductor 公司生产的 DS90C031 芯片作为发送芯片, 它能以超过  $155.5 \text{ Mbps}$  的速度驱动双绞线对, 并且传输距离超过  $10 \text{ m}$ 。同时使用 DS90C032 作为接收芯片, 在接受端完成数据的串并转换。

### 4 图像显示与处理

传输过来的并行数据采集采用 ADLINK 公司的 PCI7300 A 采集卡, 此采集卡的传输速率超过  $80 \text{ M Bytes/s}$ , 且内部含有  $16 \text{ K Words}$  FIFO, 可用于数据块高速传输。在应用程序图像显示中, 采用 DirectDraw 技术, 有效提高程序对显示硬件的性能

访问效率。

程序界面如图 7 所示。

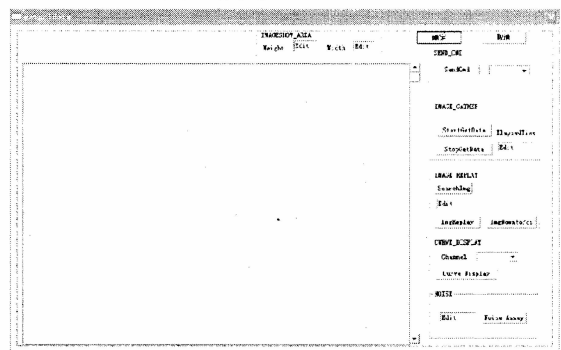


图 7 图像显示软件

为进一步减少系统的噪声, 采集到的图像做如下处理:

(1) 背景减除: 由于长波红外系统获取信号时, 不仅接收来自目标的热辐射, 也接收来自进入视场的系统内部热辐射, 如镜筒、机械结构等。这部分非

目标的辐射为背景噪声,背景噪声通常在低照度的情况下占据很大一部分动态范围,因此需要进行背景减除。在实际的操作中,即采集一次某温度下盖上光学镜头时的背景图像,每次得到的目标图像都减去背景图像值<sup>[4]</sup>。

(2)非均匀性校正:由于红外探测器固定图案噪声等影响,采集到的图像需要进行非均匀性校正。校正的方法有很多,如基于参考辐射源定标的校正、场景法等。设计中采用两点法进行标定。具体校正方法<sup>[5]</sup>如下:

在黑体温度为  $T_1$  时,采集  $M$  帧图像数据,取  $m$  帧平均响应为:

$$Y_i(T_1) = \frac{\sum_{m=1}^M Y_{mi}(T_1)}{M} \quad (3)$$

在黑体温度为  $T_2$  时,测得探测器  $m$  帧平均响应各单元响应为:

$$Y_i(T_2) = \frac{\sum_{m=1}^M Y_{mi}(T_2)}{M} \quad (4)$$

计算各单元的校正系数。为  $T_1$  和  $T_2$  指定两个标准响应值  $X(T_1), X(T_2)$ , 值的大小要充分考虑到探测器的响应范围,然后计算各单元的校正系数:

$$G'_i = \frac{X_i(T_2) - X_i(T_1)}{Y(T_2) - Y(T_1)} \quad (5)$$

$$O'_i = X(T_1) - G'_i Y_i(T_1) \quad (6)$$

根据校正方程  $X_i = G'_i Y + O'_i$  校正。

## 5 试验结果

### 5.1 探测器输出信号与时序

图 8 为示波器所采集到的实时数据。程序设定积分时间为  $20 \mu s$ , 帧频  $2.12 \text{ ms}$ 。图中通道 1 为积分信号 INT, 下降沿对应一帧数据的开始, 通道 2 为输出的多帧图像信号。

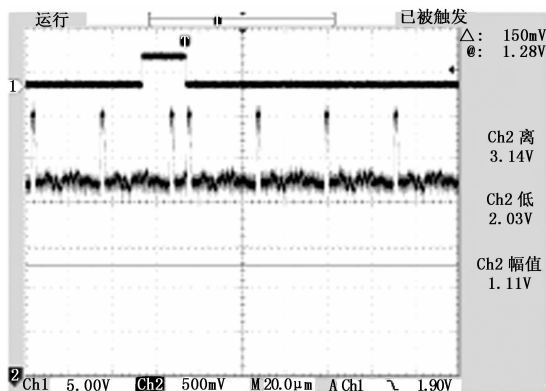


图 8 探测器输出时序图

### 5.2 噪声的测量

在红外成像系统中,噪声的定义实际上比较复杂,本文要测试的噪声和信噪比是基于时域的测量,并通过计算 RMS 的方法来求得 SNR 值。

RMS 即均方差 (Root Mean Square), 代表了时域的噪声值, 时域信噪比 SNR 为信号的时域平均值和时域均方差的比值, 计算公式如下所示<sup>[6]</sup>:

$$RMS_i = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (S_{ij} - \bar{S}_i)^2}{n}} \quad (7)$$

$$SNR = \frac{\bar{S}_i}{RMS_i} = \frac{\bar{S}_i}{\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (S_{ij} - \bar{S}_i)^2}{n}}} \quad (8)$$

其中,  $S_{ij}$ , 即第  $i$  个像元的第  $j$  个输出值 (Pixel Value);  $j$  为测量顺序号;  $n$  为测量次数。

图 9 是在室温  $22 \text{ }^\circ\text{C}$ , 探测器积分时间为  $20 \mu s$ ,  $300 \text{ K}$  黑体直接照射情况下整个采集系统所测得的均值噪声  $RMS_i$ 。横轴代表的是像元序号, 纵轴代表各像元噪声电压值。可以看出, 在整个采集系统中, 各像元噪声分布较为均匀, 并且平均噪声值在  $1.20 \text{ mV}$  左右。

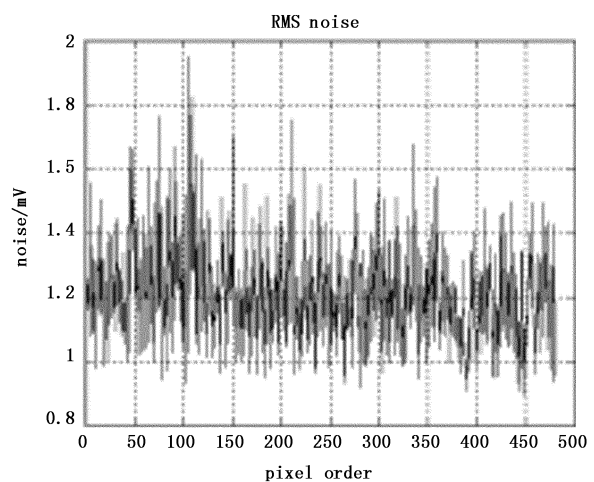


图 9 探测器各像素噪声电压值

图 10 给出了图 9 所述条件下测得的图像信噪比。由图可知, 所有像元的信噪比都大于  $55 \text{ dB}$ 。图 9 和图 10 结果表明, 设计的采集系统具有较好的噪声特性, 为下一步长波红外成像试验的展开奠定了良好的基础。

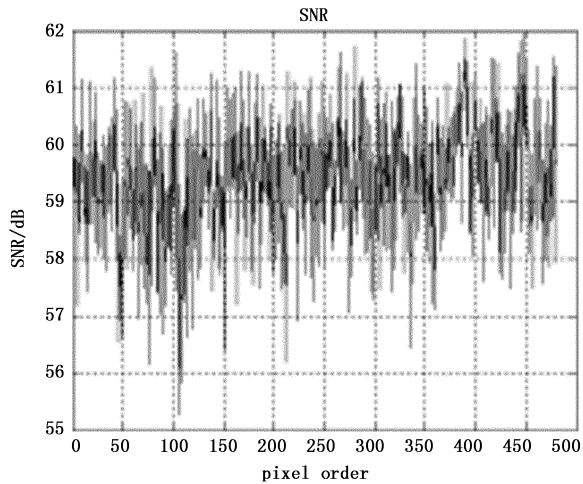


图10 探测器各像素信噪比

## 6 结语

480×6长波红外探测器的采集系统,为减少探测器驱动电路噪声,器件选型在满足探测器要求的前提下,尽可能选择低噪声器件。对于背景信号、固定图案噪声以及非均匀性噪声,分别采取背景减除、辐射标定的方法予以减小或消除。系统由于暂时未安装光学镜头,无法对景物成像,但在探测器积分时间为20 μs,采用300 K黑体直接照射对探测器曝光的实验中,平均噪声值在1.20 mV左右,且所有像

元信噪比都大于55 dB,采集系统取得了较好的信噪比特性。

## 参考文献:

- [1] Jian Deng, Shujun Wang, Yuanyuan Shang, et al. An infrared imaging system based on SWIR FPA of sofradir[J]. Proc. of SPIE, 2006, 6276:62761L\_1-62761L\_9.
- [2] Sofradir. Technical Data Package IDTL05604 of 480X6 focal array detector of Sofradir[Z]. France: Sofradir, 2001.
- [3] Kenji Irie, Alan E McKinnon, Keith Unsworth, et al. A technique for evaluation of CCD video-camera noise[C]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2008, 18:280-284.
- [4] Hui Tian, Boyd Fowler, Abbas El Gamal. Analysis of temporal noise in CMOS photodiode active pixel sensor[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2001, 36(1):92-101.
- [5] 蔡海蛟. 基于InGaAs短波红外线列探测器的成像技术研究[D]. 上海:中国科学院上海技术物理研究所, 2009, 2:30-31.
- [6] 张滢清, 王建宇, 傅雨田. 细分采样叠加技术在推扫式长波红外成像中的应用[J]. 量子电子学报, 2006, 23(2):263-267.