

512×8 中波 TDI 红外探测器成像系统设计

潘胜达, 林长青

(上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘要: 针对 TDI 型红外探测在各个领域的重要作用, 设计并实现了一个中波 TDI 红外扫描成像系统。该扫描成像系统采用国产 512×8 元线列 MCT (碲镉汞) 焦平面阵列、自行研制的光学系统和一维角度扫描系统。当探测器在 300 K 黑体的照射下, 积分时间为 500 μs 时, 整个成像系统的平均噪声等效温差 (NETD) 约为 0.3 K。实验结果表明该系统能够满足设计要求。

关键词: 512×8 元线列; 焦平面阵列; TDI 红外探测器; 扫描成像系统

中图分类号: TN216 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8891(2013)02-0074-04

Design of Scanning Imaging System Based on 512×8 MW TDI IRFPA

PAN Sheng-da, LIN Chang-qing

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

Abstract: According to the crucial functions of the TDI IRFPA (Time-Delayed-Integration infrared focal plane array), an imaging system based on MWIR FPA is designed and implemented. It consists of a 512×8 TDI IRFPA, optical system and a 1-D equality angle scanner. The average NETD of the whole imaging system is about 0.3K, when the detector is radiated by the 300 K blackbody and the integral time is set to 500 μs. The experimental result shows that a better IR picture has been obtained by using this system.

Key words: 512×8 IRFPA, focal plane array, TDI IRFPA, scanning imaging system

0 引言

随着科技的进步, 人们对卫星的地面分辨率的要求不断提高。为了满足不断提高的分辨率要求和与之相对应的图像信噪比的要求, TDI 技术应运而生。现今, 可见光 TDI CCD 已经在航空航天遥感和卫星侦察等领域中得到了广泛使用, 例如美国的 IKONOS 和 QuickBird 卫星。

相对于可见光 TDI 探测器而言, 由于红外 TDI 探测器的发展起步时间较可见光晚并且考虑到红外探测器的材料加工工艺复杂等原因, 因此关于红外 TDI 探测器在成像系统中的应用与分析还并不多见^[1]。

为了对红外 TDI 探测器在红外成像系统的应用进行分析, 相应成像系统必不可少。本文以国产 512×8 探测器为例, 详细介绍了以该探测器为核心的扫描成像系统的设计过程。特别地, 对于探测器结构特点和输出信号特点、后端电子学系统设计及系

统采用的光学系统和扫描机构进行了详细描述, 并且给出最终的成像结果。

1 512×8 红外探测器结构

实验所用的中波 512×8 元焦平面器件是由红外碲镉汞探测器阵列与读出电路通过钢柱倒焊互连而成。读出电路完成对碲镉汞光敏元探测阵列的信号进行积分、存储、转换与输出。

该探测器响应波长为 3~5 μm, 最终信号输出有效电压范围≥2 V, 读出电路噪声 RMS 值为 0.38 mV, 动态范围约为 74 dB, 最大工作频率 4 MHz。其光敏元排列如图 1 所示。

探测器沿扫描 (in-scan) 方向上光敏元大小为 24 μm, 穿越扫描 (cross-scan) 上光敏元大小为 33 μm。该探测器的 512 个像元分奇偶两部分交错排列, 奇偶两排各 256 行探测器。

该探测器的 512 个像元每行各含 8 级 TDI, 8 级 TDI 单元结构如图 2 所示, 其基本结构就是一个

收稿日期: 2013-01-05; 修订日期: 2013-01-17.

作者简介: 潘胜达 (1986-), 男, 在读博士, 研究方向为红外遥感仪器信号获取与处理技术。

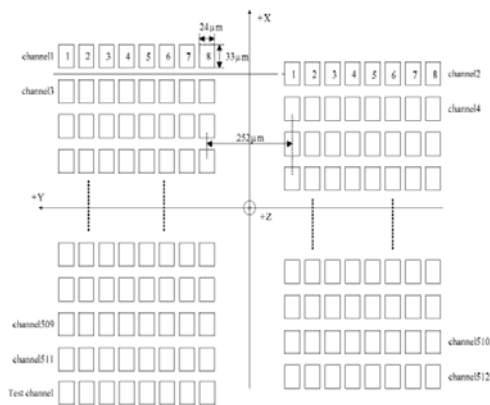


图 1 光敏元排列结构图

Fig.1 PV array topology

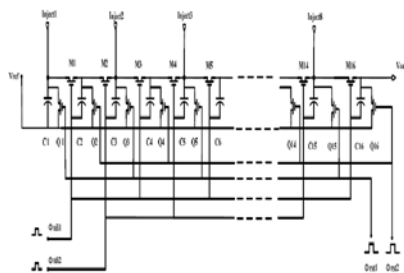


图 2 8 级 TDI 原理图

Fig.2 The schematic of 8-stage BBD structure

8 级的 BBD (Bucket-Brigade Device, 扞链器件) 电路, 它主要由 DI 注入级、转移控制 MOS 管、存储电容和复位 MOS 管等组成^[2]。

2 系统总体实现

本系统中主要由以下部分组成: 光机扫描系统、望远成像系统、TDI 红外探测器和成像电子学系统。其中, 光学系统处于整个成像系统的最前端, 主要完成光学变焦的功能, 光机扫描系统主要完成对所拍摄的景物进行一维水平方向上的扫描功能^[3]。后端的 TDI 红外探测器主要完成光信号至电信号的转换, 完成对光信号的采集, 之后的成像电子学系统完成最后的图像信息获取功能, 整个成像系统工作原理的示意图如图 3 所示。

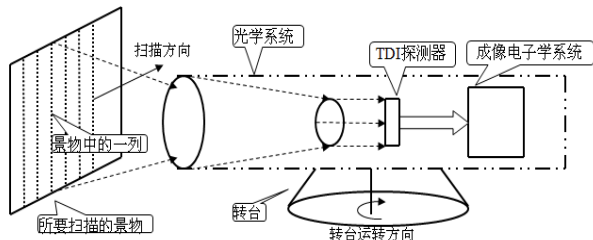


图 3 系统总体框架图

Fig.3 Frame diagram of system

2.1 光学系统设计

本试验系统的光学系统采用三透镜望远镜方案, 消色差设计, 三片透镜分别为硅、锗、硅材料。光学系统主要参数如表 1 所示。

表 1 光学系统主要参数

Table 1 The parameters of the optics

参 数	指 标
口径	90 mm
工作波段	2~5 μm
焦距	270.6 mm
F 数	3
后工作距离	>24 mm

红外系统的杂散光主要来自光学或机械零部件的热辐射。实验用 512×8 TDI 致冷型中波红外探测器封装于真空杜瓦内, 在探测器的光敏面前设置了冷屏以尽量降低来自视场外的背景的红外热辐射, 如图 4 所示。

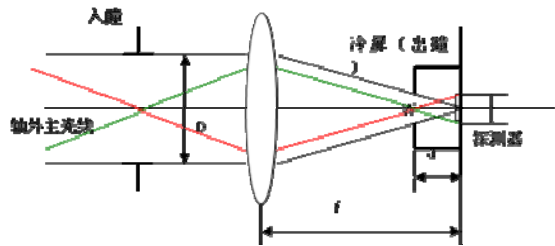


图 4 冷屏结构示意图

Fig.4 Frame diagram of system

考虑到探测器中心对冷屏孔的张角过大将会降低冷屏效率, 过小则会限制轴上光束, 冷屏成为孔径光阑。因此为提高冷屏的屏蔽效率, 本设计中将探测器中心对冷屏孔的张角与光学系统的 F 数 (或数值孔径) 相匹配, 即光学系统的出瞳与冷屏重合。

2.2 机械扫描系统及扫描同步

在本次试验中, 采用的扫描系统为卓立汉光的 RSA400, 该转台支持最大 5°/s, 角分辨率为 0.0003125°。

如前文所述, 探测器像元大小 d 为 24 μm, 像元间距 p 为 28 μm, 而所采用的光学系统的焦距为 270.6 mm, 因此探测器的行周期对应的瞬时视场角为:

$$\theta=\arctan(d/f)=0.00593^{\circ}$$

由于探测器的行周期必须与扫描速度匹配, 则可以按照转台的转动速度推算探测器的行周期为:

$$T_s=IFOV/V_{scan}=1.192\text{ ms}$$

即当转台以 5°/s 的速度进行扫描时, 探测器的行周期应设定为 1.192 ms。

2.3 成像电子学系统

实验用成像电子学系统的总体框图如图 5 所示, 整个电子学系统按照各模块负责的具体功能大致可划分为 5 个模块: 探测器工作与偏置电源模块、模拟信号调理模块、A/D 转换模块、FPGA 数字驱动模块、FPGA 非均匀性校正模块和图像传输与显示模块组成。

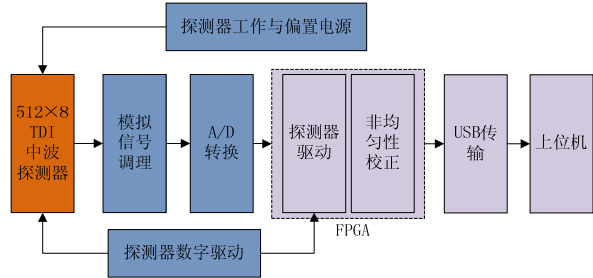


图 5 电子学结构示意图
Fig.5 Frame diagram of electronic system

电子学系统总体工作流程如下: 当整个系统上电后, 探测器工作与偏置电源模块给探测器提供所需的工作和偏置电压使其工作于正常的偏置条件下准备获取信号。之后, 当中波红外光信号经过光学系统聚焦到达探测器焦平面后, 由 FPGA 提供探测器所需的各驱动信号, 使探测器完成光电转换, 输出模拟信号。输出的信号先经过信号调理电路、A/D 量化并在 FPGA 内部对其完成非均匀性校正, 最后发送至 USB 芯片传输至上位机显示并存储。

1) 探测器工作与偏置电源模块, 其中包括探测器的模拟电源、数字电源以及探测器的偏置电压, 各电压大小及其噪声需求如表 2 所示。由于探测器的偏置电压对于探测器输出幅度大小和噪声特性都起着关键性作用, 此外对于室外成像时需要其温度的稳定性较高。因此探测器的偏执电压采用精密稳压源 LT1021 供电, 并在其输出端口进行滤波进行带宽限制来满足噪声需求。而探测器的模拟和数字供电模块则由 LDO 芯片 LT1763 组成^[4]。

表 2 探测器所需电压源列表

Table 2 The power supply of the detector			
名称	功能	数值	噪声容限
V_g	偏置电压	1~1.5 V	$\leq 100\ \mu\text{V}$
V_{ref}	参考电压	3.9~4.1 V	$\leq 100\ \mu\text{V}$
V_b	偏置电压	0.1~0.5V	$\leq 100\ \mu\text{V}$
V_{dd}	数字电源	5 V	$\leq 10\ \text{mV}$
V_{ddA}	模拟电源	5 V	$\leq 1\ \text{mV}$

2) 模拟信号调理模块。该模块按照探测器输出的信号特征先采用由 AD8052 组成的一级仪表放大电路抑制由于探测器的杜瓦接线引起的共模噪声, 并减去探测器输出信号中无用的直流分量, 以扩大

后端 ADC 可用的动态范围。之后为了减小输出信号的噪声带宽, 在仪放电路后接一级二阶 Sallen-key 滤波器。后端完成模数转换的 ADC 采用 ADI 公司的 14 bit 模数转换器 AD9243^[5]。

3) 探测器数字驱动模块。512×8 TDI 探测器的数字控制电路通过不同的外部时钟和偏置产生读出电路所需的所有内部信号, 读出电路内部的时序随输入改变而改变。探测器数字部分的输入时序如图 6 所示。

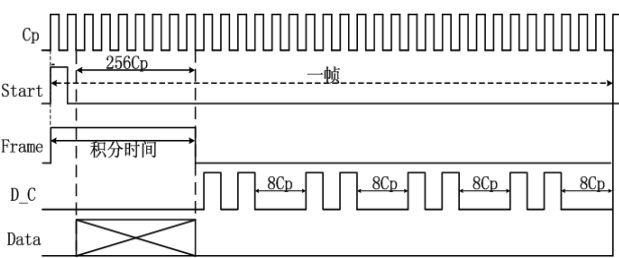


图 6 探测器驱动时序图
Fig.6 Timing diagram for 512×8 ROIC key signals

在图 6 中, C_p 为探测器的工作时钟, 此次试验中 C_p 为 500 kHz, Start 为数据输出开始标志, Start 高电平脉冲 0.5 个 C_p 时钟后, 探测器输出图像数据。Frame 为积分控制脉冲, 高电平有效, 可按需调整积分时间。D_C 为 TDI 转移脉冲, 高电平有效。Data 为探测器数据输出, 共有奇偶两路输出。

4) 非均匀性校正模块。红外探测器由于受到材料和工艺的限制, 每个探测器的响应率不可能完全一致, 这种不一致性就是我们常说的非均匀性。因此需要对探测器的输出进行非均匀性校正。

在各类非均匀性校正算法中, 两点校正法有算法计算量少、算法结构简单等优点, 适合用 FPGA 硬件实现。其校正的基本原理为: 假设探测器响应近似为线性的, 探测元的输出信号可以用式(1)表示:

$$V_o = K_i V_i + B_i \tag{1}$$

式中: V_i 为探测器直接输出未校正的信号; V_o 为经过非均匀校正的信号; K_i 为探测器非均匀性的增益因子; B_i 为探测器非均匀性的偏移量。其中 K_i 和 B_i 计算方式如下所得:

$$K_i = \frac{V_{MT_1} - V_{MT_2}}{V_{T_1}(i) - V_{T_2}(i)} \tag{2}$$

$$B_i = \frac{V_{MT_1} V_{T_2}(i) - V_{MT_2} V_{T_1}(i)}{V_{T_2}(i) - V_{T_1}(i)} \tag{3}$$

式中: V_{MT_1} 和 V_{MT_2} 为 TDI 探测器的 512 个像素分别

在 T_1 、 T_2 黑体定标温度点下 M 帧响应输出的均值, $V_{T_1}(i)$ 、 $V_{T_2}(i)$ 分别指的是第 i 个像元在在 T_1 、 T_2 黑体定标温度点下的不同输出^[6]。

系统实际运行时, 将计算所得到的增益因子 K_i 和偏移量 B_i 先通过 coe file 格式存储在 FPGA 的 Singel Port ROM 中, 在工作过程中以此对各个对应像元的实时值同步 FPGA 的内部硬件乘法器进行乘和加的运算, 以此来实现探测器输出信号的非均匀性的实时校正。

5) 图像传输与显示模块。经过非均匀性校正的图像数据通过 FPGA 内部设置的 FIFO 缓冲输出至 USB 芯片, 为了配合整个成像系统的实时性, 本系统中选用 Cypress 的 CY7C68013A 作为 USB 传输芯片, 并使其工作于只负责数据的封装与上传的 Slave Fifo 模式下。数据传输至上位机缓存中后, 上位机程序通过调用 USB 的通用驱动中相应的接口函数来获取 USB 传送过来的图像数据。

3 实验结果

图 7 是在室温 22℃, 300 K 黑体直接照射, 探测器工作时钟 500 kHz, 全级 TDI 模式下, 整个成像系统在不同积分时间情况下所测得的 NETD 的 RMS 值的变化曲线。横轴代表的是积分时间, 纵轴代表成像系统 NETD 的 RMS 值。

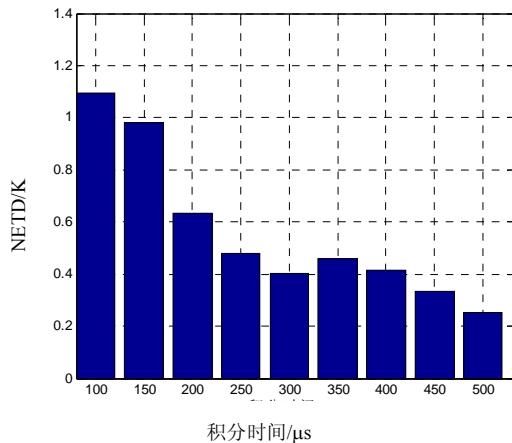


图 7 NETD 与积分时间关系图
Fig.7 NETD at different integration times

从图 7 可以看出当积分时间为 500 μs, 整个成像系统的 NETD 均值约为 0.3 K。在该成像条件下

在室外进行成像, 整个扫描成像系统的最终成像结果如图 8 所示。



图 8 系统成像结果图
Fig.8 Scanning experiment result

4 结语

扫描型焦平面探测器作为二代热成像系统的主要探测器类型, 是世界各国重点发展和装备的关键技术, 红外 TDI 探测器更是其中的佼佼者。本系统针对国产 512×8TDI 探测器设计并制作了相对应的光学系统、机械扫描机构及电子学系统, 整个成像系统在工程实践中, 取得了较好的实时性、成像效果, 为后续红外 TDI 探测器在实际成像中的应用分析构建了一个良好成像平台。

参考文献:

[1] 谢恺, 孙振江, 安玮, 等. 新型空间红外扫描传感器[J]. 红外技术, 2006, 28(4): 230-233.

[2] ZHANG Jun-ling, FENG Qi, CHEN Hong-lei, et al. A novel 512×8 ROIC with time-delayed-integration for MW infrared focal plane array[C]//Proc. of SPIE, 2011, 8139: 1-10.

[3] 简献忠, 裴云天, 孙胜利, 等. MCT1024 红外阵列扫描成像系统[J]. 红外技术, 2006, 28(5):17-19.

[4] 安永泉, 禹健. 576×6 长波红外探测器成像系统设计[J]. 激光与红外, 2009, 39(2): 173-177.

[5] Analog Devices. Complete 14-Bit, 10MSPS Monolithic A/D Converter AD9243[M]. USA: 2010.

[6] 陈锐, 谈新权. 红外图像非均匀性校正方法综述[J]. 红外技术, 2002, 24(1): 1-3.