文章编号: 1672-8785(2017)02-0011-10

512×8元双波段TDI红外探测器的 低噪声成像电路设计

李锋1,2,3 董峰2,3 冯旗2,3

(1. 中国科学院大学,北京 100049;2. 中国科学院上海技术物理研究所,上海 200083;3. 中国科学院红外探测与成像技术重点实验室,上海 200083)

摘 要:设计了一种基于 512×8 元双波段 TDI 红外焦平面探测器的低噪声实时成像数 据采集系统。根据器件内部的电路结构以及输出模拟信号的特点,设计了一种由偏置 电压、驱动电路、模数转换电路和数字信号处理模块等组成的低噪声采集电路。经噪 声测试可知,在 26℃的室温下,电路噪声为 0.02 ~ 0.18 mV;当积分时间为 300 µs 时, 短波红外和中波红外探测器各个像元的噪声电压分别为 2.5 ~ 4.5 mV 和 8 ~ 10 mV,其 各个像元的信噪比分别为 52 ~ 57 dB 和 43 ~ 48 dB。结果表明,该系统具有良好的噪 声特性,可以满足实际的工程应用需求。

关键词: 320×256; 中波红外; 低噪声; 采集系统

中图分类号: TN215 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2017.02.003

Design of the Acquisition System with Low Noise Based on 512×8 Dual Band TDI IRFPA

LI Feng ^{1,2,3}, DONG Feng ^{2,3}, FENG Qi ^{2,3}

(1. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 2. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China; 3. Key Laboratory of Infrared Detection and Imaging Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: A low noise real-time imaging data acquisition system based on a 512×8 dual band TDI IRFPA is designed. According to the characteristics of internal circuits and output analog signals, a low noise collection circuit composed of bias voltage, drive circuit, A/D conversion circuit and digital signal processing module etc is designed. It is found in the noise test that at the room temperature of 26 °C, the noise of the circuit is 0.02 mV to 0.18 mV. For the integration time of 300 µs, the noise voltage of each shortwave infrared detector element and that of each mid-wave infrared detector element are 2.5 mV to 4.5 mV and 8 mV to 10 mV respectively. Their signal-to noise ratios are 52 dB to 57 dB and 43 dB to 48 dB respectively. The test results show that the system has good noise characteristics and can meet the requirements of practical engineering application.

Key words: 512×8 ; dual band; low noise; acquisition system

收稿日期: 2016–12–12

作者简介: 李锋(1989-),男,江苏盐城人,博士研究生,主要从事电路与系统方面的研究。E-mail: lifengsitp@163.com

0 引言

双波段红外焦平面探测器是现阶段红外器 件朝多波段探测方向发展的一个典型^[1]。由于 能够同时接收两个波段的红外辐射信息,进而 增强对目标的探测能力,该探测器已经成为了 现阶段红外探测领域的研究热点之一。在红外 遥感系统中,对目标红外辐射的吸收只留有1~ 3 μm 短波红外、3~5 μm 中波红外和8~12 μm 长波红外三个主要辐射"窗口"^[2]。在双波段红 外焦平面成像系统中,最主要的器件是红外焦 平面阵列,即把敏感元阵列和读出电路集于一 体的探测器组件。根据探测器阵列敏感元的排 列形式,红外焦平面阵列可以分为面阵和线阵 两种,它们分别用于凝视和扫描成像系统^[2]。

本文结合实际工程项目,根据所内自制的 512×8元短波红外/中波红外双波段时间延迟积 分(Time Delay Integration, TDI)红外探测器的结 构及其输出信号特点,研究了一种扫描型短波 红外/中波红外双波段 TDI 探测器成像系统。该 系统能够检测出同一个被测目标在不同红外波 段的辐射信息。我们重点设计了低噪声图像信 息采集电路。通过三线制 LVDS 将采集到的数据 打包上传给地检系统,并在上位机中实时显示 所成的图像。最后,利用 MATLAB 软件对采集 到的数据进行计算处理,得到成像系统的电路 噪声和系统各个像元的噪声及信噪比。

1 512×8 元双波段 TDI 探测器

基于 MCT 外延材料加工的红外探测器阵 列芯片与 CMOS 读出集成电路通过铟柱倒焊直 接互连后构成 MCT 红外焦平面。然后利用微型 杜瓦对此红外焦平面进行密封封装,即可构成 512×8 元双波段 TDI 红外探测器杜瓦组件产品。 该探测器的响应波段包括短波红外和中波红外 两个波段,其光谱响应范围分别见图 1 和图 2。

通常说来,敏感元探测阵列模拟信号的积 分、存储、转换和输出等步骤都是由探测器的读 出电路完成的。读出电路负责将4行信号多路 传输到输出级。输出级为高速的跟随放大器, 其最高读出频率为4MHz。探测器有4路模拟 输出,分别为短波奇数信号输出端口、短波偶数 信号输出端口、中波奇数信号输出端口和中波 偶数信号输出端口。输出模拟电平大于2.0V。 图3所示为探测器的像元排列情况。像元排列成 "品"字型,其中每组含256×8个像元,单元中



图 1 短波红外波段的光谱响应范围

0.95 0.9 0.85 0.8 0.75 0.7

0.7 0.65 0.6 0.5 0.5 0.5 0.5

0.45 Normalized 0.4 0.35 0.3 0.25 0.2 0.15 0.1 0.05



图 2 中波红外波段的光谱响应范围



图3 像元排列情况

心距离为 28 µm×56 µm, 像元大小为 24 µm×33 μm。从图 3 中可以看出, 探测器的 512 个像元 是按照奇偶交错的方式来排列的。

2 数据采集系统的组成

512×8 元双波段 TDI 探测器的数据采集系 统以 FPGA 为核心, 主要由成像镜头、探测器组 件、模拟驱动电路、数字信号处理模块、改变积 分时间的指令收发模块、地检系统、显示器以及 电源模块等几部分组成。图 4 为整个系统的结 构框图。

图像数据采集系统的主要功能是, 当探测 器的偏置电压、驱动时序和积分时间均满足系



图 4 数据采集系统的结构框图

统条件时,探测器的输出端将会输出4路模拟 信号(中/短波奇/偶),然后通过模拟驱动电路 分别对这四路模拟信号进行阻抗变换、低通滤 波、单端转差分处理,并用4路模数转换电路将 模拟信号转换为数字信号;接着将该信号送给 FPGA内部,处理后通过LVDS利用三线制传输 格式将数据传输给地检系统。

红外探测器成像系统的性能可以直接从成 像质量中体现出来。成像质量取决于系统的探 测精度^[3]。因此,若要提高成像质量,则需提 高系统的探测精度。采集电路的噪声大小是影 响系统探测精度的一个重要因素。当噪声较大 时,会导致所获图像的分辨率下降,进而系统的 探测精度也会降低。因此需要对成像系统的采 集电路进行低噪声设计和处理。采集电路的低 噪声设计一般包括选择低噪声元器件,对模拟 信号进行滤波、跟随、差分处理以及在 PCB 布 局时进行模数分离等相关低噪声处理。

2.1 偏置电压设计

探测器的偏置电压设计是采集电路设计中的关键技术之一。要使焦平面器件工作在最优状态下,输出稳定的模拟电平,首先要保证偏置电压纹波小、电压准确^[4]。512×8元双波段TDI 探测器的偏置电压较多,共有11个(见表1)。

表1 偏置电压数据

名称	电压/V	电流/mA
VB_S/M	0	<10
VG_S	0.9	<10
VG_M	0.8	<10
VRST	4.0	<10
VBIAS_N	1.05	<10
VBIAS_P	3.65	<10
VBIAS_SF_P	3.55	<10
VBIAS_OUTAMP_P1	3.55	<10
VBIAS_OUTAMP_P2	3.55	<10
VBIAS_OUTAMP_N	1.5	<10
VREF_QAMP	3.0	<10

512×8 元双波段 TDI 探测器能否输出正确、 稳定的模拟信号,这 11 个偏置电压的稳定供电 以及电压调节至关重要。供电芯片的低频噪声、 时间漂移和温度漂移均是影响电压稳定度的主 要因素^[5]。由于偏置电压纹波小、负载电流小, 设计电路时选用美国 ADI 公司生产的 ADR441 和 ADR435 电压基准芯片,并通过高精度非精密 电阻分压获得所需的基准电压,而不是选用可 调的线性稳压芯片。ADR441 和 ADR435 的分压 电路设计原理相同。图 5 给出了 ADR441



图 5 ADR441 芯片的偏置电压产生电路

芯片的偏置电压产生电路的原理图。

ADR441和 ADR435这两款芯片都具有噪声 低、温漂低等优点。前者的噪声峰峰值为 1.2 µV (0.1~10 Hz),温漂为 10 ppm/℃;后者的噪声峰 峰值为 3.5 µV (0.1~10Hz),温漂为 10 ppm/℃。以 上优点不仅可以提供基准电压,而且还可降低电 路噪声,提升系统性能。表 1 中的第二列为偏置 电压的典型值。它们可以在 ADR441和 ADR435 的输出端利用精密电阻分压获得。焦平面的性 能与偏置电压的大小密切相关。偏置电压的大 小与暗电流成正比,与非均匀性成反比。暗电流 越小,探测器的动态范围越小。非均匀性越差, 成像质量就越差。

2.2 数字脉冲的驱动时序设计

探测器在满足偏置电压条件后,要想正常输 出模拟电压还须满足探测器内部所需的控制信 号。整个系统的核心控制芯片是 Altera Cyclone III FPGA。利用 FPGA 产生 512×8 元双波段 TDI 焦平面所需的驱动信号。该焦平面一共有 10 个 数字驱动信号,即主频时钟信号 MC、控制 TDI 电路的时钟信号 CP2、电路同步信号 ST、短波 控制像元积分时间 RST_S、相关双采样控制脉 冲 1P_CDS1、电荷放大器控制脉冲 1P_S1、电荷 放大器控制脉冲 2P_S2、电荷放大器控制脉冲 3P_S3、盲元提出功能使能信号 S 和扫面方向控 制 DIR。512×8 元双波段 TDI 焦平面的最高读 出频率为 4 MHz。系统设计时,主时钟频率取 1 MHz。这 10 个驱动信号在工作时必须保持同 步。只有这样才能实现有效驱动。图 6 所示为利 用 QuartusII 软件的 SignalTap II 实时在线仿真工 具得到的驱动时序波形。经分析可知,该数据与 512×8 元双波段 TDI 器件使用手册上的参考驱 动时序一致。积分时间可以通过串口发指令来 改变。

2.3 电压跟随电路设计

红外焦平面器件的输出内阻通常都比较 大。要求模拟输出的负载具有大电阻小电容的 特点,一般 R >100 kΩ, C <15 pF。有很多方法 可以满足这样的负载要求,其中最常用的是在 模拟信号输出后增加一个电压跟随电路来实现 阻抗变换^[6]。跟随电路处在整个驱动模块的最 前端,因此用于实现阻抗变换的运算放大器对 电路的噪声性能具有很大影响。为了降低电路 设计中的噪声和温漂,我们选择 ADI 公司生产 的 AD826 器件作为同相放大器使用。其输入噪



图 6 驱动时序的仿真波形



图 7 电压跟随设计的电路图

声的典型值为 150 nV·Hz^{-1/2}, 共模抑制比的典型值为 120 dB, 输入阻抗的典型值为 300 kΩ, 输入电容的典型值为 1.5 pF。由于探测器输出 4 路模拟信号,所以需要 4 路电压跟随电路。图 7 为其中一路电压跟随设计的电路图。通过将 R31 和 C49 构成一阶低通 RC 滤波电路,可以降低电路的高频噪声。探测器的主时钟为 1 MHz,这样在一阶低通 RC 滤波电路的截止频率取 4 MHz 左右时可以起到很好的滤波效果。这里取 R31=1 kΩ, C49=33 pF, 即

$$f_{_{3db}} = \frac{1}{2\pi RC} = 4.8 \text{ MHz}$$
 (1)

2.4 单端转差分电路设计

对于经过电压跟随和低通滤波后的模拟信号,在 A/D 转换前,为了抑制和隔离模拟信号的噪声和漂移,将模拟单端电路转换成差分电路。设计时,采用 ADI 公司生产的 AD8139 运算

放大器来实现单端转差功能。该放大器的电压噪 声和电流噪声都非常低,分别为 2.25 nV·Hz^{1/2} 和 2.1 pA·Hz^{1/2};信号上升很快,达到 800 V/µs。 同样,在电路设计中,单端转差分电路也需要 4 路。图 8 为基于 AD8139 的差分电路的原理图。 其中 2 脚 V_{ocm} 通过 +5 V 基准电压和精密电阻分 压得到。根据式 (2) ~式 (4):

$$V_{{\scriptscriptstyle CH2_OUT_DIFF+}} - V_{{\scriptscriptstyle CH2_OUT_DIFF-}}$$

$$= \frac{R_{_{41}}}{R_{_{48}}} (V_{_{CH2_OUT}} - V_{_{ocm}})$$
(2)

 $V_{\scriptscriptstyle CH2_OUT_DIFF+} = V_{\scriptscriptstyle ocm} + (V_{\scriptscriptstyle CH2_OUT_DIFF+}$

$$-V_{CH2_OUT_DIFF_})/2 \tag{3}$$

$$V_{CH2_OUT_DIFF-} = V_{ocm} - (V_{CH2_OUT_DIFF+} - V_{CH2_OUT_DIFF-})/2$$

$$(4)$$

经过测试,探测器输出的模拟电压为 3.5 V 左 右, *V_{CH2_OUT_DIFF+}* 约为 2.7 V,*V_{CH2_OUT_DIFF-}* 约为 2.7 V,满足系统选用的 AD7903 芯片的 -5 ~ +5 V 的动态范围。

2.5 模数转换电路设计

探测器输出的 4 路模拟信号经过驱动电路 处理后,需要将模拟信号转换成数字信号,这样 才能在上位机上显示出目标的红外辐射信息。 因此,需要在驱动电路的后面加上 4 路 A/D 转 换电路。在设计 A/D 转换电路时, ADC 芯片的





图 9 模数转换电路

选择非常重要。首先,模拟输入电压范围要大于 焦平面探测器输出的模拟信号的动态范围,同 时,根据采样定律,要确保 A/D 转换芯片的最 高转换率大于探测器输出信号的频率。另外, 还要考虑模拟输入信号的噪声大小,即芯片的 LSB 要小于输入的模拟信号的噪声。由于在驱动 电路模块中,4路模拟信号均被转换成了差分信 号, 所以 A/D 转换芯片也必须具有差分模拟输 入功能。这样不仅可以匹配差分的模拟电平, 而 且还可以抑制电路的噪声和共模干扰[7]。经过 综合考虑,系统设计时选择了 ADI 公司生产的 AD7903 双通道差分 16 位模数转换芯片。其分辨 率为 16 位, 并具有功耗低 (7.0 mW)、信噪比高 (94 dB)等优点。系统设计的参考电压为 5 V, 此时1LSB=152.6 μV。图9所示为模数转换电 路。

2.6 FPGA 图像数据处理

以 Altera cyclone III FPGA 为核心控制芯 片,利用 FPGA 实现驱动时序控制和数字信号 处理。4 路模拟信号经过 A/D 转换后被输入到 FPGA 内部。由于探测器具有短波红外和中波红 外两个波段,同时每个波段的奇偶像元是错开 排布的,所以需要在 FPGA 内部对每一路的数 字信号进行重新排列。排好后,再实施加帧头和 帧尾以及帧计数、FIFO 缓存等处理。最后,信 号被三线制 LVDS 传送至地检系统,经其处理后 通过 PCI 接口传送到上位机中进行实时显示。 三线制 LVDS 传输方便,便于处理。

图 10 所示为系统最终的三线制输出码流。 其中,CLK_50M 为三线制时钟,line3_dataout 为 三线制数据线输出码流。经比对可知,该数据与 输入 FIFO 缓存的数据之间能够一一对应起来, 表明输出结果准确。

3 噪声测试

红外成像系统的噪声通常包括探测器的输 出噪声、信号采集电路所产生的噪声以及由光 学镜头引入的噪声等。其中,探测器的输出噪声 是整个成像系统噪声的主要来源,包括读出电 路的噪声和探测器的噪声。以低频率 (1 kHz 以 红 外



图 10 图像采集系统的三线制输出码流

下)为特征的 1/f 噪声以及光电流和暗电流的散 粒噪声是引起探测器噪声的主要因素^[8]。

由于红外成像系统的噪声测量及定义都比较复杂^[9],本文利用 512×8 元双波段 TDI 红外 探测器成像系统采集多帧图像信息,然后通过计 算连续 200 幅图像的均方差 (Root Mean Square, RMS) 和信噪比 (Signal-to-Noise Ratio, SNR) 来衡量采集电路的性能。RMS 和 SNR 的定义如下:

$$RMS_{j} = \sqrt{\frac{\sum_{i}^{N} (S_{ji} - \overline{S}_{j})^{2}}{N}}$$
(5)

$$SNR = \frac{\overline{S}_{j}}{RMS_{j}} = \frac{\overline{S}_{j}}{\sqrt{\left[\sum_{i}^{N} (S_{ji} - \overline{S}_{j})^{2}\right]/N}} \quad (6)$$

式中, S_{ji} 为第 j 个像元的第 i 个输出; N 为总的 图像帧数; j 为帧数序号。

在测试系统噪声前,首先测试了 512×8 元双 波段 TDI 红外焦平面成像系统的采集电路的噪 声。具体的测试方法如下:在系统没有加探测器 的情况下,短接 4 路模拟信号输入端,在 26 ℃ 的室温下,采集一段码流;然后通过用 MATLAB 软件仿真计算连续 200 帧图像得到 RMS 值即为 电路噪声。图 11 所示为电路各个像元的噪声电 压值。从中可以看出,电路的噪声电压在 0.02 ~ 0.18 mV 之间,说明所设计的采集电路具有很好 的噪声性能。

系统噪声测试方法如下:加上探测器后, 在 26 ℃室温和 300 µs 积分时间的条件下,用一 张黑色纸片挡住探测器窗口,同样采集一段码 流。利用 MATLAB 软件仿真计算 200 帧图像数据,得到每个像元的 RMS 值即为系统噪声。图 12 和图 13 所示分别为短波红外和中波红外探测器各个像元系统的噪声电压值。

从图 12 中可以看出, 512×8 元 TDI 短波红 外探测器的像元噪声电压在 2.5~4.5 mV 之间。 从图 13 中可以看出, 512×8 元 TDI 中波红外探 测器的像元噪声电压在 8~10 mV 之间。结果表 明,系统噪声很小,但与电路噪声相比又大了很 多,尤其是中波红外探测器,而且探测器每个像 元的噪声差别也比较大。造成该结果的很重要 的原因是,工艺水平的限制使得焦平面器件具 有很大的固有噪声,而且各个像元会产生非均 匀性。因此,通过提高工艺水平和校正非均匀性 可以进一步降低系统噪声^[10]。在图 12 和图 13 的计算条件下,可以进一步计算出探测器各像 元的信噪比(见图 14 和图 15)。

从图 14 中可以看出, 512×8 元 TDI 短波红外 探测器各个像元的信噪比在 52 ~ 57 dB 之间。 从图 15 中可以看出, 512×8 元 TDI 中波红外探 测器各个像元的信噪比在 43 ~ 48 dB 之间。同 样,中波红外探测器的信噪比要差些,而且不管 是中波红外还是短波红外,每个像元之间存在 一定差异。结果表明, 512×8 元双波段 TDI 红外 探测器的数据采集系统具有良好的噪声特性。 这样的图像采集系统是红外探测器成像系统在 成像试验中获得高分辨率图像的有力保障。

4 结束语

本文以实际工程应用为背景,为 512×8 元



图 11 电路噪声电压



图 12 短波红外探测器系统的噪声电压



图 13 中波红外探测器系统的噪声电压



图 14 短波红外探测器各像元的信噪比



图 15 中波红外探测器各像元的信噪比

双波段 TDI 红外探测器设计了一种低噪声图像 数据采集系统。以实现低噪声采集电路为出发 点,在设计各个模块电路时都充分考虑了如何 降低噪声和干扰的方法。噪声测试结果表明, 不管是电路噪声还是系统噪声都达到了系统要 求。分析了不同波段探测器的像元噪声特性,为 采集系统在工程应用中进一步有效发挥作用打 下了良好的基础。

参考文献

- [1] 周杰. 320×256 中/长波双色红外信号读出电路设 计[D]. 北京:中国科学院大学, 2015.
- [2] 周世椿. 高级红外光电工程导论 [M]. 北京: 科学出版社, 2014.

- [3] 刘云芳,李建伟,李玉敏,等. 640×512 InGaAs 探测器低噪声采集系统设计[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(19): 4790-4795.
- [4] 秦金明,陈宝国,李丽娟,等.4×128 双色线列红外 探测器成像电路设计路的设计研究 [J]. 红外技术, 2013, 35(2): 78-82.
- [5] 安永泉,禹键. 576×6 长波红外探测器成像系统设计
 [J]. 激光与红外,2009,39(2):173-178.
- [6] 陈晓东. 288×4 长波红外探测器数据采集模块设计 [J]. **红外技术**, 2011, **33**(3): 137-140.
- [7] 王华,魏志勇,张文昱,等. 480×6 红外探测器信号 处理电路设计 [J]. **红外技术**, 2009, **31**(9): 504–512.
- [8] 王文智,刘万成,王刚.红外线阵探测器驱动电路的低噪声设计 [J]. 舰船电子工程, 2013, 33(12): 157-159.