

4×128 双色线列红外探测器成像电路设计

秦金明¹, 陈宝国^{1,2}, 李丽娟^{1,2}, 赵亮¹

(1.中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471009; 2.航空制导武器航空科技重点实验室, 河南 洛阳 471009)

摘要: 介绍了针对4×128 双色线列探测器而设计的成像电路系统, 其硬件电路主要包括探测器适配电路、视频模拟信号调理电路、模数转换电路、图像预处理电路、数字图像输出接口电路等。探测器驱动时序、一维扫描成像时序、AD 采样时序和接口时序由 FPGA 来实现, 采用 VHDL 语言完成时序设计。

关键词: 双色红外线列探测器; 一维扫描成像; FPGA; 非均匀校正; 电路设计

中图分类号: TN216 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8891(2013)02-0078-05

Imaging Circuit Design of 4×128 Two-color Linear Array Infrared Detector

QIN Jin-ming¹, CHEN Bao-guo^{1,2}, LI Li-juan^{1,2}, ZHAO Liang¹

(1. China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China

2. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Airborne Guided Weapons, Luoyang 471009, China)

Abstract: This article describes the imaging system designed for the 4×128 two-color linear array detector. The hardware circuit includes the detector adapter circuit, video analog signal conditioning circuit, analog-to-digital conversion circuit, image pre-processing circuit, digital image output interface circuit, etc. The detector drive sequence, one dimensional scanning imaging sequence, AD sampling sequence and interface timing are realized by FPGA.

Key words: two-color line array infrared detector, one dimensional scanning imaging, field programmable gate array, non-uniformity correction, circuit design

0 引言

红外多波段探测器能够探测在时间与/或空间上相干的两种不同波长的热辐射, 在军事上, 主要应用在导引系统中的目标识别、背景干扰等方面, 实现在两个或两个以上波段中获取目标信息, 从而进一步对复杂的背景进行抑制, 利用目标和干扰源的光谱特性差异来识别真假目标, 提高红外抗人工及复杂背景干扰能力。在民事上, 主要应用在地球观察、气象学等领域^[1]。

本文阐述的红外双波段成像系统采用双波段并列式 4×128 元探测器 (以下简称 2-4×128 探测器), 该探测器能够实现在进行一维扫描成像时, 对同一场景可在两个不同的波段上获取红外图像信息^[2], 提高对各种温度场景的探测及分辨效果, 以满足红外抗干扰、气象监测等方面的应用需求。

1 探测器介绍

该线列探测器由双波段并列式 4×128 元组成, 制冷方式为 J-T 自调式液氮制冷。探测器的读出电路采用延迟积分 (TDI) 模式, 主要包括模拟电路和数字电路两部分, 模拟电路主要实现焦平面探测器信号的读入、延迟积分叠加、放大及输出; 数字电路主要实现光电流积分和信号的传输, 增益控制及双向 TDI 扫描的控制^[3]。

1.1 接口及偏压要求

2-4×128 探测器接口框图见图 1, 模拟电路接口包括模拟电源 VCC、波段 1 读出注入控制偏压 R0_W1、波段 2 读出注入控制偏压 R0_W2、抗光晕控制偏压 VA、外接偏置电压 VR、探测器公共偏压 VCOM、波段 1 像素输出信号 W1_OUT 和波段 2 像素输出信号 W2_OUT。

收稿日期: 2012-11-8; 修订日期: 2013-01-15.

作者简介: 秦金明 (1979-), 男, 河南信阳人, 工程师, 从事信息处理技术研究。

数字电路接口包括数字电源 VDD、像素时钟信号 CLK、积分信号 INT、复位信号 RST、TDI 扫描方向控制信号 DIR 和行读出结束信号 EOS。像素最大输出频率为 5 MHz。

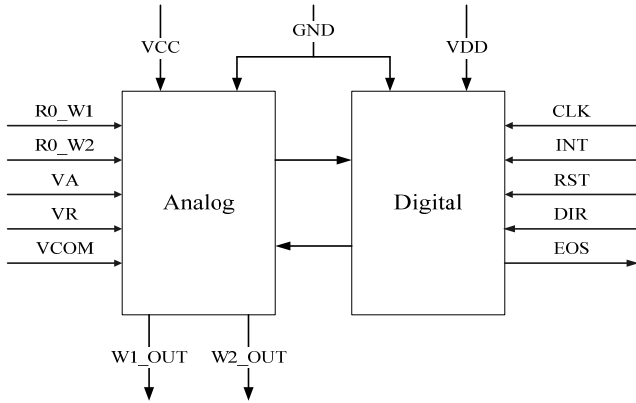


图 1 探测器接口框图

Fig.1 Block diagram of the detector interface

为保证探测器最佳性能，探测器的模拟电源、数字电源及偏置电压都有相应的要求，具体要求见表 1。

1.2 读出时序

探测器读出方式为 TDI 读出模式，扫描方向控制信号 DIR 根据正扫帧或逆扫帧来确定，在一帧中

DIR 保持固定电平。RST 为读出芯片的复位信号，在读出时序开始之前处于低电平，大于 5 个 CLK 时钟周期之后，一直处于高电平。探测器线列 128 个像元的读出时序由 CLK、INT、EOS 来控制，积分信号 INT 高电平时为积分时间，低电平时为复位时间。探测器的线列读出时序见图 2。探测器在线列像元读出的同时可进行下一行的积分，积分时间在满足系统时序的要求下可任意设定。

2 硬件设计

2.1 探测器适配电路

探测器适配电路^[4-6]主要功能包括：①为探测器供电及提供相应的偏置电压，使探测器工作在最佳工作点；②为探测器提供上电保护，以避免探测器未完全制冷上电导致探测器损坏；③为探测器驱动脉冲信号及其他脉冲信号进行数字隔离，以减少外部噪声干扰；④对探测器输出的视频信号进行放大调理，以保证大的信噪比传输给 A/D 进行图像采集。探测器的模拟、数字电源以及相应的偏置电压选用高精度低噪声电源 LT1763 实现，探测器的驱动脉冲信号进行数字了隔离，通过信号隔离来抑制后端采样系统带来的噪声。

2.2 A/D 采样电路

A/D 转换器的关键指标有两个：采样率和分辨

表 1 探测器的偏压要求 Table 1 The bias requirements of detector

标号	功能名称	类型	范围/V	典型值/V	精度/V	峰值电流/mA
VCC	模拟电源	固定	—	5	±0.005	30
VDD	数字电源	固定	—	5	±0.05	5
R0_MW	波段 1 读出注入控制偏压	可调	3.5~4	4	±0.005	1
R0_SW	波段 2 读出注入控制偏压	可调	3.5~4	4	±0.005	1
VA	抗光晕控制偏压	可调	3.5~4	3.8	±0.05	1
VR	外接偏置电压	可调	1.5~2	1.6	±0.05	1
VCOM	探测器公共偏压	固定	—	2.5	±0.05	1

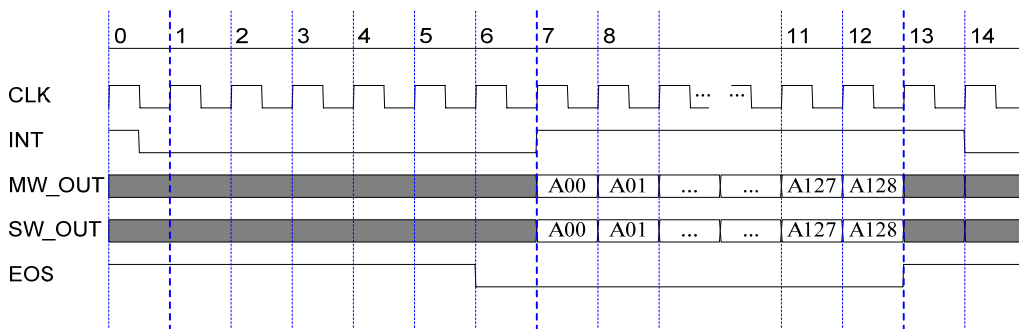


图 2 线列像元读出时序

Fig.2 Pixel readout timing of linear arrays

力。采样率应大于探测器线列输出的像元速率；分辨力则是与探测器输出信号的动态范围相联系。在设计时要求将探测器输出信号调理到A/D转换器所允许的输入范围内，使信号的噪声与A/D转换器的最小分辨能力相匹配。所用探测器的输出信号动态范围为70dB，采用12bit的A/D转换器就足够了。模数转换芯片选用AD公司的AD9248芯片，为14bit，最高采样频率可达40MSPS，采用并行数字输出，传输速率最高可达780Mbps^[7]。

A/D转换电路是典型的数模混合电路，最突出的干扰就是数字电路对模拟电路的干扰，其中包括A/D变换的量化噪声，数字电路脉冲信号前后沿通过地线和电源等形成的尖峰干扰。原理图设计中把数字地平面和模拟地平面分开，并通过磁珠连接起来。

2.3 图像主控电路

图像主控电路的功能包括：根据扫描摆镜的扫描时序生成探测器驱动时序和A/D采样时序，完成图像采集，同时对原始图像进行非均匀性校正，将校正后的图像数据传输到外部记录设备进行记录。图像主控电路结构框图见图3。

图像主控电路^[8]采用DSP+FPGA结构，电路的主要功能模块包括：①探测器驱动脉冲时序模块，实现像素有效输出；②A/D采样时序模块，实现图像采集；③非均匀性校正模块，完成原始图像的非均匀校正；④图像输出接口模块，完成图像输出、记录。DSP芯片选用TI公司的TMS32C6414EGLZA6E3^[9]。FPGA电路主要扩展高速DSP与外围器件之间的接口，同时还起到数据缓冲作用，FPGA芯片选用Xilinx公司的XC6SLX45T^[10]。

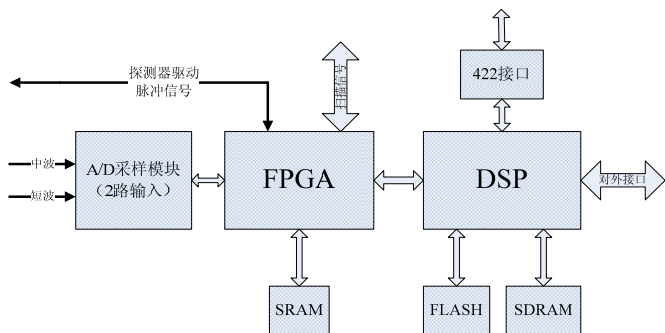


图3 图像主控电路框图

Fig.3 Block diagram of the image main control circuit

2.4 系统电源设计

成像系统的模拟电源输入为+6V，为模拟电路中的低压差线性电源芯片及低噪声参考源供电。成

像系统的数字电源输入为+5V，为图像主控电路的DC-DC和LDO电源芯片供电，其中DSP需要的电压：3.3-V I/Os、1.4-V Internal；FPGA需要的电压：VCCO (3.3V)、VCCINT (1.2V)、VCCAUX (2.5V)；AD9248需要的电压：AVDD (3.0V)、DRVDD (3.3V)。3.3V、1.4V和1.2V需要的电流较大，因此使用Linear公司的LTM4614芯片^[11]；2.5V使用Linear公司的LT1963芯片。在A/D数模混合电路中，电源是设计中的一个关键的因素，模拟电源(AVDD)和数字电源(DRVDD)采用两个独立的LT1963芯片提供，以减少模拟电源和数字电源间的相互影响，降低电路间的相互干扰。

3 系统实现

3.1 时序设计

对于线列探测器系统，需要光机扫描机构在垂直于线列方向进行一维扫描，从而获得阵列图像。本系统的扫描摆镜的时序设计见图4，扫描频率为50Hz，线性段时间利用率为80%。图像帧频为100Hz，所以在正扫描和逆扫描的线性区(8ms)内均需要成像。

在系统电路中，FPGA实现所有的时序控制功能，包括探测器工作时序、A/D转换器的控制时序以及图像数据传送时序等^[12]。根据扫描摆镜的扫描同步信号(SSY)、扫描方向信号(SDIR)和探测器的读出时序给出一帧128×128图像的时序设计^[13-14]，见图5所示。探测器的TDI扫描方向需要根据扫描摆镜的扫描方向来确定。该系统中，SDIR为高电平时，为正扫描，SDIR为低电平时，为逆扫描。A/D采样时序根据探测器线列像元的读出时序确定，采样时钟为5MHz。

3.2 图像非均匀校正

红外图像的非均匀性校正采用了两点校正来实现，应用两点校正需有两个前提条件：一是探测器的响应是线性的。尽管探测器实际的响应是非线性的，但在大部分区域误差不大，只有在输入极小和接近饱和时才有比较大的非线性，在忽略两端误差的情况下可以认为探测器的响应是线性的。二是探测器的响应必须具有时间稳定性。本系统采用线列红外探测器，扫描系统的非均匀性是一维的，也就是说只有在行的方向上存在非均匀性。采用两点法实现双色线列红外焦平面阵列图像的非均匀校正公式为：

$$y_i = G_i x_i(\varphi) + O_i \quad (i=0 \sim 127, i \text{ 表示列号}) \quad (1)$$

系数标定算法根据面阵两点校正算法进行修

正, 分别在高温 T_H 和低温 T_L 下采集一帧 128×128 图像, 将阵列元在高温 T_H 和低温 T_L 下响应归一化为^[15]:

$$\bar{Y}_H = G_i \bar{X}_i(\phi_H) + O_i \quad (i=0 \sim 127, i \text{ 表示列号}) \quad (2)$$

$$\bar{Y}_L = G_i \bar{X}_i(\phi_L) + O_i \quad (i=0 \sim 127, i \text{ 表示列号}) \quad (3)$$

式中: \bar{Y}_H 为高温下一帧 128×128 图像的均值; \bar{Y}_L 为低温下一帧 128×128 图像的均值; $\bar{X}_i(\phi_H)$ 为高温下第 i 列中 128 个像素的均值; $\bar{X}_i(\phi_L)$ 为低温下第 i 列中 128 个像素的均值。按照(2)和(3)式可计算出增益 G_i 和偏移量 O_i , 波段 1 和波段 2 的校正系数分别为 128 组。

该成像系统由 DSP 完成图像的非均匀校正, 算法采用 C 语言实现^[16], 调用标定好的系数按照公式

(1)进行每行原始图像的校正。波段 1 和波段 2 校正后图像见图 6 所示。

4 结论

本文通过对 2-4×128 线列探测器的成像电路设计, 为该型探测器提供了实用的图像预处理电路平台, 从成像质量而言取得了良好的效果。在成像电路设计中, 保证了低噪声的探测器驱动电路设计, 充分发挥了探测器的性能。所采用 2-4×128 线列探测器为国产探测器, 其峰值探测率、响应非均匀性、稳定性等方面还达不到工程化使用要求, 在进一步提高该型探测器的性能和可靠性后, 结合本文的成像电路系统可应用于航空制导、气象监测等领域。

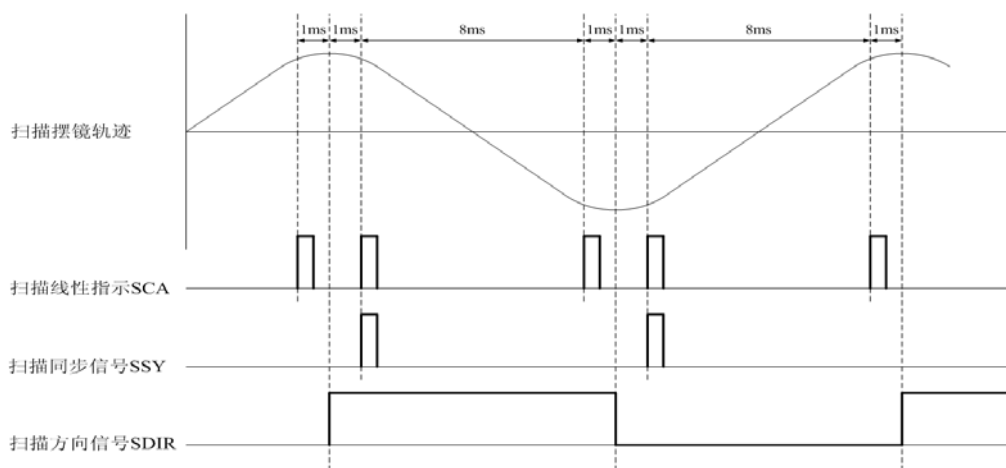


图 4 扫描摆镜时序

Fig.4 Scan sequence of the scanning mirror

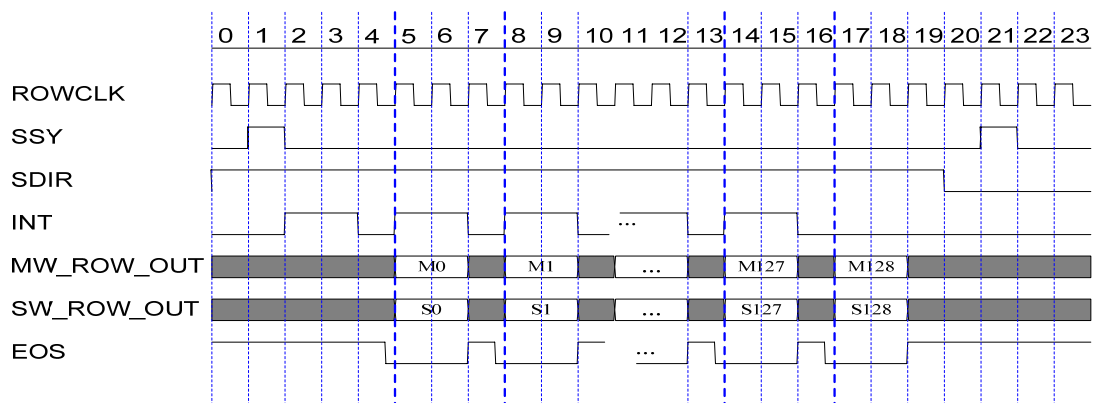


图 5 一帧 (128×128) 图像行时序

Fig.5 Row timing of one frame (128×128) image

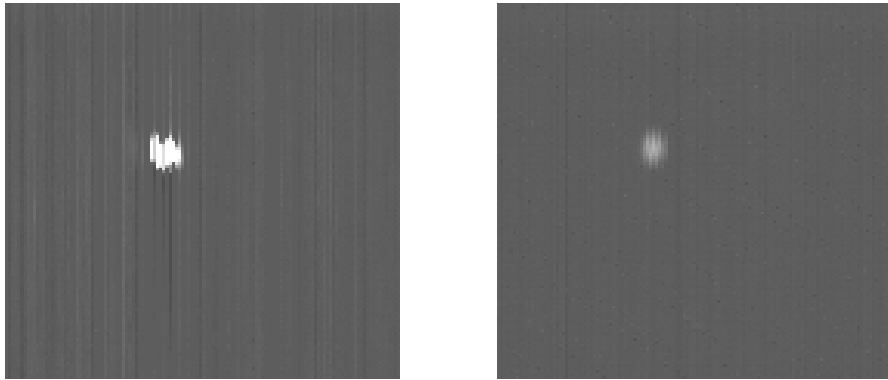


图6 双色图像(左为波段1, 右为波段2)

Fig.6 Two-color images (Left for the first band, Right for the second band)

参考文献:

- [1] 张兴德, 李荣刚, 刘琳, 等. 红外双波段成像系统的研究与发展[J]. 激光与红外, 2010, 40(8): 801-804.
- [2] 窦建云, 蒲恩昌. 一维扫描型热成像系统扫描器的结构设计[J]. 红外技术, 2006, 28(11): 625-628.
- [3] 孙维国, 黄水安, 李勇平, 等. 空空导弹光电探测器设计[M]. 国防工业出版社, 2006.
- [4] 陈晓东, 何锡君. 288×4 长波红外探测器关键驱动电路的设计[J]. 激光与红外, 2011, 41(5): 561-564.
- [5] 葛炜, 王君, 梁列国. 576×6 红外焦平面阵列驱动电路的设计与实现[J]. 激光与红外, 2007, 37(6): 530-533.
- [6] 吴和然, 周云, 张宁, 等. 非制冷红外探测器低噪声驱动和处理电路的设计研究[J]. 红外技术, 2011, 33(9): 505-508.
- [7] AD9248-14 Bit, 20MSPS/ 40MSPS/ 60MSPS Dual A / D Converter Data Sheet[EB/OL]. 2010[2011-03-15]. <http://www.analog.com/en/analog-to-digital-converters/ad-converters/ad9248/products/product.html>.
- [8] 李镛, 郭继昌, 关欣, 等. 基于通用 DSP 的红外焦平面视频图像数字预处理系统[J]. 天津大学学报, 2005, 38(10): 904-908.
- [9] TMS320C6414, TMS320C6415, TMS320C6416 FIXED-POINT DIGITAL SIGNAL PROCESSORS[EB /OL]. 2005[2011-03-15]. http://www.ti.com/lscds/ti/dsp/c6000_dsp/c64x/products.page.
- [10] Spartan-6 Family Overview [EB/OL]. 2010 [2011-03-15]. <http://www.xilinx.com/products/silicon-devices/fpga/spartan-6/index.htm>.
- [11] LTM4614- Dual per Channel Low VIN DC/ DC μModule Regulator [EB/OL].2009[2011-03-15]. <http://www.linear.com/product/LTM4614>.
- [12] Perer J Ashenden. VHDL 设计指南[M]. 2版. 葛红, 黄河, 吴继明, 译. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [13] 简献忠, 裴云天, 孙胜利, 等. MCT1024 红外线列扫描成像系统[J]. 红外技术, 2001, 23(5): 17-19.
- [14] 范宏波, 唐麟, 潘顺臣, 等. 288×4 热像仪扫描速度与系统积分时间的匹配研究[J]. 红外技术, 2007, 29(1): 4-7.
- [15] 徐丹旻, 梁雪驰, 陈宝国, 等. 双色线列红外探测器非均匀性校正的数字化设计[J]. 火箭与制导学报, 2004, 25(2): 339-342 .
- [16] Rulph Chassaing. DSP 原理及其 C 编程开发技术[M]. 王华, 张健, 韩月秋, 等, 译. 北京: 电子工业出版社, 2005.