

快速制冷型红外焦平面成像制导系统设计

牟宏山*, 陈静, 乔育花
(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘要: 红外焦平面成像技术是一种通过摄取景物热辐射分布, 并将其转换为人眼可见图像的技术, 广泛应用于侦察、制导、空间探测等方面. 针对红外制导小体积、快速启动的应用要求, 设计了快速启动红外焦平面成像制导系统. 对应用于系统的折反式红外镜头、快速启动型红外焦平面探测器、低噪声成像电路等进行了设计, 设计结果满足制导条件下的红外成像要求.

关键词: 红外成像制导; 红外焦平面探测器; 快速制冷 J-T 制冷器

中图分类号: TN219 **文献标识码:** A

Design of a fast cool-down IRFPA image guidance system

MU Hong-Shan*, CHEN Jing, QIAO Yu-Hua
(North China Research Institute of Electro-optics, Beijing 100015, China)

Abstract: The imaging technology of Infrared focal plane array(FPA) detector is a method which converts the thermal radiation of the target into the visible image. It is widely used in target seeking, missile guidance and space exploration, etc. For the requirements of small volume and fast cool-down application in missile guidance, an infrared FPA imaging guidance system was designed, including the catadioptric infrared lens, fast cool-down IRFPA detector, and low noise image circuit. The whole system satisfies the imaging requirements of the missile guidance.

Key words: infrared image guidance, infrared focal plane array(FPA) detector, fast cool-down Joule-Thomson cooler

PACS: 42.30.-d

引言

红外探测器组件可以将外界景物发射的红外光能量转化为相应的电信号, 通过接收外界物体自身的红外辐射, 达到对目标的探测、识别、跟踪等目的. 而且红外探测器组件受气候、环境影响较小, 是一种理想的被动探测方式, 广泛应用于红外制导领域.

红外制导导弹具有制导精度高、抗干扰能力强、隐蔽性好、性价比高、结构紧凑、机动灵活等优点, 军事上应用广泛. 随着红外焦平面成像制导应用越来越广泛, 对探测器组件的要求也越来越高. 近程红外制导导弹系统由于从发现目标到实施打击, 导弹仅有很短的反应时间, 这就要求红外探测器具有快速启动的能力, 同时中、近程导弹也要求探测器组件体

积尽量小. 根据制导用高集成度快速启动的要求, 设计了一款快速制冷型红外焦平面成像系统.

1 系统结构及设计指标

快速制冷型红外焦平面成像系统要完成对目标的探测及红外图像输出等功能, 同时要求焦距长、体积小、重量轻、启动快. 快速制冷型红外焦平面成像系统主要分为以下几部分: 整流罩、红外镜头、制冷红外焦平面探测器及视频预处理电路等. 整流罩与红外镜头共同组成红外物镜, 完成景物辐射信号的采集. 探测器芯片、杜瓦和制冷器组成红外探测器, 辐射信号经红外探测器完成光电转换. 驱动电路和处理电路组成成像电路, 对红外探测器的信号进行处理形成电子图像^[1]. 其结构如图 1 所示, 原理框图

收稿日期: 2015-08-08, 修回日期: 2015-09-22

基金项目: 中国电子科技集团创新基金.

Foundation items: China electronics technology group corporation innovation foundation.

作者简介 (Biography): 牟宏山 (1976-), 男, 黑龙江佳木斯人, 硕士, 高级工程师, 主要从事红外焦平面探测器研究.

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: sandyms@163.com

Received date: 2015-08-08, revised date: 2015-09-22

如图 2 所示,设计指标如表 1 所示.

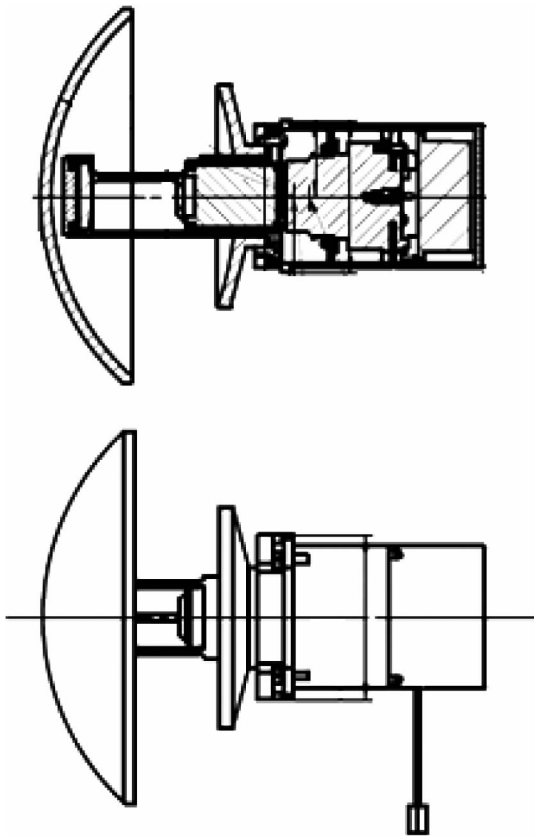


图 1 成像系统结构图
Fig. 1 Image system layout

表 1 成像系统设计参数

Table 1 Design parameters of image system

项 目	达到指标
工作波段	$(3.6 \pm 0.2) \mu\text{m} \sim (4.7 \pm 0.2) \mu\text{m}$
像元数	128 pixel \times 128 pixel
像元尺寸	$30 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$
瞬时视场	0.218 mrad
峰值探测率	$> 2 \times 10^{11} \text{ cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$
探测器噪声等效温差	$\leq 20 \text{ mK}$
帧频	$> 200 \text{ 帧}$
启动时间	$< 10 \text{ s}$
视场	$1.6^\circ \times 1.6^\circ$
探测距离	2 km (目标尺寸: $2.3 \text{ m} \times 2.3 \text{ m}$; 目标与环境温差: 5°C ; 能见度: 7 km; 探测概率: $\geq 95\%$)
最小可分辨温差	$\leq 0.3 \text{ K} @ (1/2\alpha)$
系统总重(稳定部分)	$\leq 200 \text{ g}$

2 成像系统设计

快速制冷型红外焦平面成像系统主要在光学镜头及机械、探测器和处理电路三部分开展设计与制作工作.

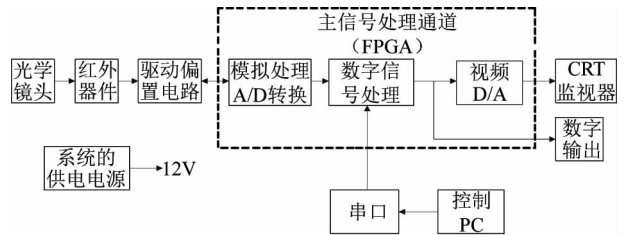


图 2 成像系统原理框图
Fig. 2 Functional block diagram of image system

2.1 光学镜头设计

在探测器尺寸与光学视场一定的情况下,光学系统的焦距是唯一的,垂直方向的视场与探测器长度对应.

探测器在俯仰方向(V 方向即垂直方向)的尺寸:

$$2y_v = nd = 128 \times 30 \mu\text{m} = 3.84 \text{ mm} \quad (1)$$

有效焦距:

$$f = y_v / \text{tg}\omega_N = 3.84 / (2\text{tg}(1.6^\circ/2)) = 137.5 \text{ mm} \quad (2)$$

光学系统 F 数表征系统通光能量的大小,应同时考虑衍射极限的制约及通光能量对灵敏度的影响.综合本系统特点,在保证系统性能的前提下尽可能优化设计,选择 F 数为 2,因此可以确定光学系统的通光孔径:

$$D_w = f/F = 137.5/2 = 68.75 \text{ mm} \quad (3)$$

由于该探测器组件焦距长,而系统要求探测器组件体积小,因此,将该红外镜头设计成折反式光学镜头,同时整流罩也作为红外镜头的一部分进行设计^[2].作为制导用成像系统,还要求探测器组件重量轻,因此将主要使用铝材料来制备反射镜.

该红外光学镜头由整流罩、主反射镜、次反射镜、透镜及支架组成,光学系统的光路如图 3 所示.

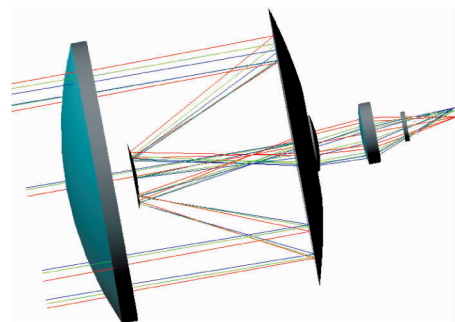


图 3 光学系统光路示意图
Fig. 3 Optical system layout

2.2 探测器设计

根据设计需求成像传感器选择 128×128 中波 InSb 红外凝视焦平面探测器,该探测器组件可以将外界景物发射的 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 波段的红外光能量转化为相应的电信号;同时该探测器由 16 384 个二维分布的光敏单元构成,可以直接将一幅空间分布的景物红外辐射转换为的一组电信号进行处理还原,实现凝视成像.通过接收外界物体自身的红外辐射,将所需要了解的物体与周围环境区分出来,从而达到对目标的探测、识别、跟踪等目的.

该探测器组件主要由探测器芯片、杜瓦和制冷器三部分组成.探测器结构示意图见图 4,探测器芯片结构见图 5.

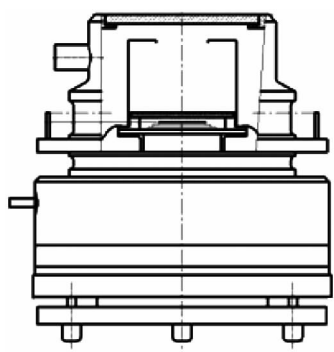


图 4 探测器结构图
Fig. 4 Detector layout

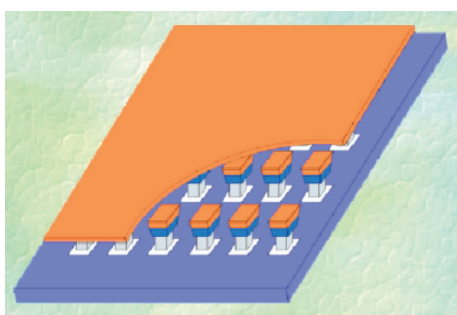


图 5 探测器芯片结构图
Fig. 5 Detector chip layout

2.2.1 探测器芯片

该探测器芯片是由 128×128 硅信号处理电路芯片和 128×128 InSb 光电二极管阵列芯片构成,见图 5.图中上部为 128×128 InSb 光电二极管阵列芯片,由在 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 波段具有良好吸收特性的 InSb 晶体材料制备,利用 PN 结的光生伏特效应,将入射红外光转化为相应的电信号;图中下部为 128×128 硅信号处理电路芯片,是一个具有专用功能的标准

CMOS 工艺制作的模数混合型电路芯片,该芯片将 128×128 InSb 光电二极管阵列芯片产生的对应红外光信号的电信号进行存储、处理、输出等操作,使得由 128×128 InSb 光电二极管阵列芯片所接收的一幅空间分布的红外图象转化为一组以时间分布的电信号.为满足成像传感器对探测器的技术要求,专门设计了一款读出电路,设计中充分考虑了电路噪声、读出速率、帧频等因素,最终噪声水平大幅降低,探测器帧频达到 270 Hz,探测器芯片水平有了很大提升.

2.2.2 微杜瓦设计

由于 InSb 晶体材料是一种窄禁带半导体,价带电子非常容易跃迁到导带,在常温状态下 InSb 晶体材料基本呈现导体特性,只有在低温下,才表现出半导体特性,因此采用 InSb 晶体材料制作的探测器必须在低温 95 K 温度以下才能正常工作.为保护探测器和降低低温能耗,探测器芯片低温区应有隔热措施,方法是采用高性能绝热材料或真空绝热(杜瓦).本探测器组件采用杜瓦作为探测器芯片的安载体,为 128×128 InSb 焦平面探测器芯片提供一个封装形式,保证探测器能够工作在一个低温环境,同时探测器工作区的低温又不至于泄露出来,使得窗口及外壳结霜,影响探测器的正常使用,另外保证了制冷器的利用率.

由于系统要求探测器组件体积小、重量轻、可靠性高,同时还要保证 J-T 制冷器有足够大的换热面积,所以采用全金属锥形杜瓦结构,以达到体积小、重量轻、可靠性高、换热面积大的目的.同时,应用中要求探测器能够快速启动,因此,在杜瓦设计中充分考虑了热容量、热传导因素,对冷屏及冷头的材料、结构进行了设计改进,保证了探测器的快速启动要求^[3].

2.2.3 制冷器设计

J-T 制冷器主要对红外探测器进行制冷,保证探测器能够工作在一个稳定的超低温工作环境. J-T 制冷器利用焦耳-汤姆逊原理即高压气体当其体积突然膨胀时,气体的温度会相应下降,甚至液化来制冷.图 6 给出了 J-T 制冷器示意,产品主要由换热器(制冷效果的热力学增益)、节流装置(低温环境的热力学获取)、蒸发腔(低温冷量的热力释放)和充灌高压气体的贮气瓶组成.

在实际使用中,制冷器要与器件、杜瓦等在形状、尺寸、功率、温度等具有最佳的配合,才能发挥芯片本身的优良性能.因此,制冷器的设计要随着

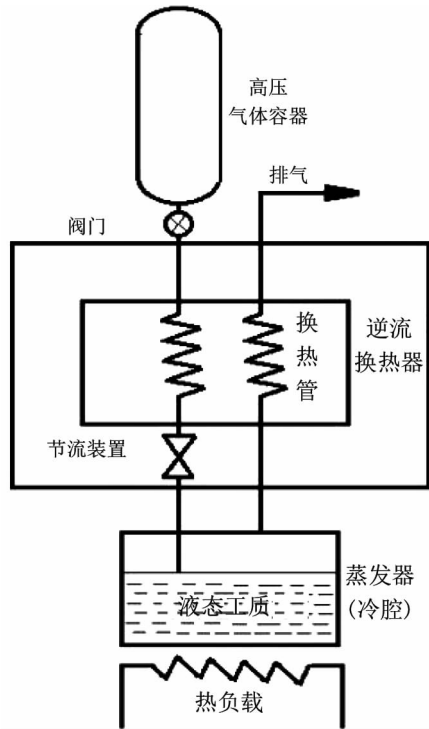


图 6 J-T 制冷器工作模型
Fig.6 J-T cooler working mode

整机系统以及芯片、杜瓦对制冷功率、制冷温度、杜瓦的结构及尺寸等的不同需求而采取相应的措施。

128 × 128 红外探测器组件属于凝视型焦平面探测器,芯片本身具有将近 50 毫瓦热容量,同时杜瓦结构的热容量将近 500 毫瓦,为了在组件长度减少的同时不影响制冷器的制冷功率,保证足够的换热面积,制冷器采用了锥形结构,这与常规制冷器结构形式有很大不同.在对制冷器热力学参数的设计中,结合已有设计,对制冷器的各参数进行修正,以达到设计指标^[4].

1) 制冷工质选择

从微型节流制冷的的主要应用场合考虑,制冷温度由被冷却元器件的工作条件所确定,InSb 探测器工作温度需要控制在 95 K 以下.弹载 J-T 制冷器的背压一般在 0.1 M Pa 或者略高一些的数量级.所以,工质的正常沸点是一个重要的热力学性质.在本项目红外焦平面制导组件用 J-T 制冷器设计中,工作点温度要求 ≤ 95 K,同时,由于有快速启动的要求,因此选用氦气作为制冷工质.

2) J-T 制冷器热交换器设计

J-T 制冷器热交换器的结构非常精密且复杂紧凑,并且各组件的空间特征尺度存在近千倍的差异,

低温工质(高纯氦气、氮气)在整个换热过程中跨越多个复杂相态(超临界、跨临界和亚临界、两相),其流动状态及物理特性变化剧烈,属于典型的非定常流动传热过程,较常规的稳态传热过程存在较多的非线性问题,更加剧了 J-T 制冷器传热结构优化难度.

J-T 制冷器换热器的结构都类似,都是双螺旋肋片式结构.图 7 是换热器的结构简图.

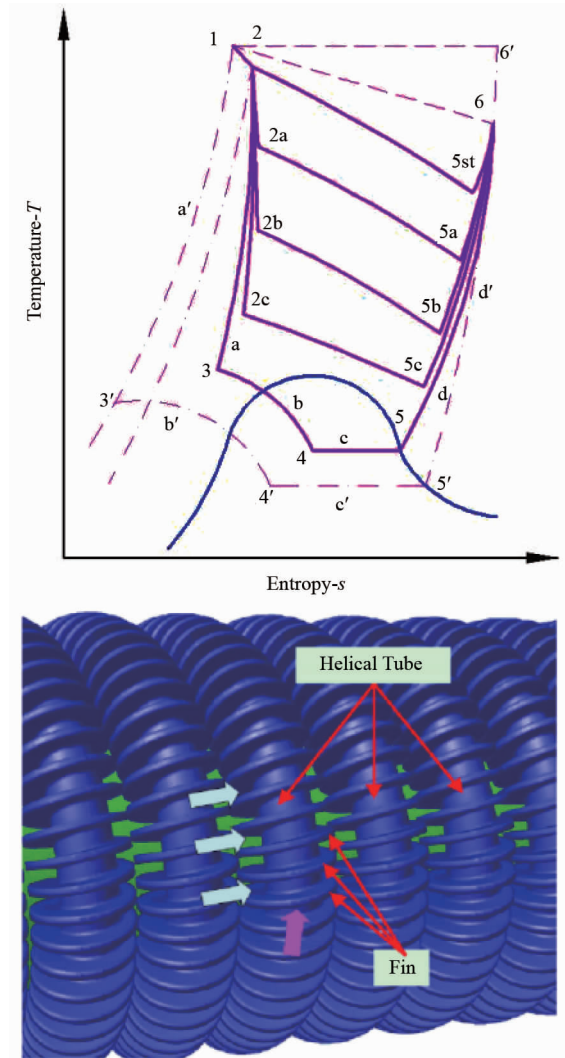


图 7 换热器结构图
Fig.7 Heat exchanger layout

J-T 制冷器气体降温换热的过程中,工质气体的降温发生在节流阀处,工质气体的换热则发生在换热器处.换热器性能的好坏,直接决定了气体节流前的温度,节流前的温度越低,制冷器的降温速度越快.

J-T 制冷器的启动时间是很难计算出来,但是根据经典传热学理论,有如下关系:

$$\tau \propto \frac{T - T_{CD}}{\left[\left(\frac{\rho\alpha}{\mu} \right)^{0.8} K(\Delta T)_h \right]_{t=0}} = f(\rho, T, \text{coolant}) \quad (4)$$

式中, ρ 为介质在节流孔部位时的密度; α 为声速; K 为传热系数; μ 为动力粘度系数; T 为制冷工质温度; $(\Delta T)_h$ 为等焓节流效应。

因此, 在外界环境恒定条件下, 影响启动时间最大的就是 ρ 和 K 。

ρ 值与制冷流量和压力相关, 如果增大制冷流量, 虽然会提高启动时间, 但是产生最终温度点偏高的问题, 因此具体多大的流量, 需要进行试验来界定。

K 值是传热系数, 影响其大小的是换热器结构参数. 包括换热器的层数、肋片的螺距、肋片的长度、毛细管的规格和材料、肋片的规格和材料、电镀方式等. 表 2 给出了换热器常用的材料及规格, 但在设计中并不局限于常用材料规格的选择。

表 2 换热器结构参数

Table 2 Heat exchanger structure parameter

指标参数	设计值
材质	不锈钢
毛细管尺寸	$\phi 0.5 \times 0.05$
长度(mm)	1 000
散热片	0.2×0.3
螺距(mm)	0.3

在 J-T 制冷器换热器结构设计中, 主要在毛细管材料的选择、翅片管制作方式、换热器结构等方面开展设计, 另外在材料的选用上还考虑耐压、耐腐蚀、换热性能及抗磁性等因素。

3) 气体压力、流量与制冷量设计

因为气体消耗量与节流工质制冷能力大小直接有关, 如图 6 所示, 当换热为理想气体换热时, $T_5 = T_1$, 循环的最大制冷量等于入口高压气体的等温节流效应. 以摩尔为单位, 则有

$$\Delta h_T = H(T_1, \rho_5) - h(T_1, \rho_1) = Q_{\max} \quad (5)$$

$$Q_{\max} = \dot{n}(\Delta h_T) \quad (6)$$

式中: h 为每摩尔工质的质量焓; n 为单位时间的摩尔质量。

上式表明, 制冷工质的等温节流效应越大, 节流循环的制冷量也越大. 也就是说, 制冷工质流量越大、节流效果越好, 制冷量也就越大。

一般来说, 压力越大, 流量越大, J-T 制冷器的降温速度随着压力的升高而加快. 但是压力越高, 最后节流后的温度点就越高. 在整个降温过程中, 前期

降温速度最快, 随后出现一个“拐点”, 然后缓慢下降, 根据降温工质流速的不同, “拐点”的位置也不同, 降温工质流速越快, 出现“拐点”的温度越高. 这是由于流量越大, 在有限的节流膨胀腔室内的压力就越高, 节流后的液化点温度就越高. 因此, 工质压力的选择也是非常重要的一个方面. 图 8 为恒定高压气源下, J-T 制冷器的动态降温曲线。

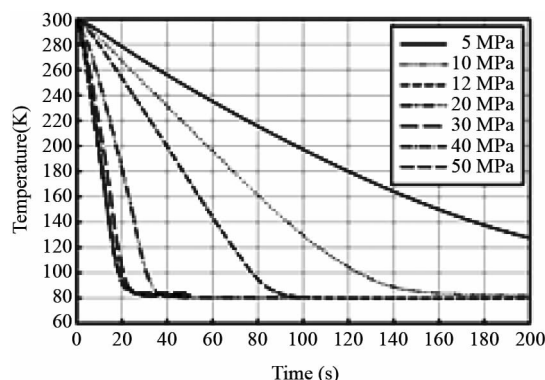


图 8 J-T 制冷器降温曲线

Fig. 8 J-T cooler cooling curve

通过对制冷工质、热交换器结构及工质流量等方面的设计, 确定了制冷工质、工作压力、热交换器结构等. 在制冷器加工工艺中, 一方面通过合理工质流量的选择, 改善制冷器的制冷功率, 另一方面对换热器的翅片管翅片高度、厚度、间隙、材料、加工工艺, 毛细管的壁厚、材料、热处理工艺, 毛细管与翅片的电镀工艺等进行设计改进, 提高制冷器的制冷效能, 保证了组件的启动时间要求^[5]。

根据设计, 对锥形制冷器进行了工程化开发, 实现了在 50 MPa 氩气条件下, 启动时间 8 s, 稳定流量 5.0 l/min 的锥形制冷器. 锥形制冷器如图 9 所示。



图 9 锥形节流制冷器

Fig. 9 Tapered J-T cooler

2.3 视频预处理电路设计

成像处理电路按信号处理流程分为探测器驱动、接口、成像等几个主要部分. 主要功能包括:

- a. 对探测器输出的信号进行采样;
- b. 对采样后的数字信号进行制式变换;
- c. 对热图像数据进行信号处理,完成盲元修正和均匀性校正;
- d. 根据使用要求对图像进行必要的图像处理,如边缘增强、动态范围自适应等;
- e. 产生组件工作的所有控制时序信号,对外接口,组件控制工作。

在工作时由制冷器及上电时序电路给红外探测器提供必要的工作环境,探测器低噪声偏置电路、脉冲驱动电路给探测器的读出电路提供必要的偏置电压、脉冲驱动波形,红外探测器的读出电路将光电转换信号读出,该信号经模拟通道信号处理电路处理后驱动模数转换电路,数字信号经数字预处理电路处理形成电子图像。

根据总体设计思路,设计要尽量使电路小型化、低功耗、高可靠性,同时电路模块的分割要便于装调。

2.3.1 探测器驱动与偏置电路

探测器的驱动与偏置电路的主要功能是给红外探测器组件提供其正常工作所必须的偏置电压和驱动时序,从而使探测器敏感元输出高信噪比的模拟电信号。驱动电路作为热成像系统电路部分的最前级,直接与红外探测器组件接口,其性能的优劣直接影响并决定了系统的整体性能指标。

红外信号本身为弱信号,使得其对驱动电路的噪声非常敏感,为了保证探测器拥有较高的性能,必须为探测器提供高性能的电源、偏置信号及时序控制信号。在考虑红外探测器的可靠性与安全性的前提下,进行了有效的电源滤波,同时加入了超低噪声 LDO 或基准电压源来保证探测器驱动的稳定,体现了驱动电路的小型化和高可靠性。探测器驱动是模拟、数字混合电路,设计中重点考虑了模数混合设计中地线分割、共地等问题。同时,采用了高速、低噪声的数字驱动芯片,并对数字驱动信号进行滤波,降低其 EMI 干扰;对探测器输出的模拟信号进行阻抗匹配、单端转差分等预处理,采用抗干扰性强的差分方式完成模拟信号向后级的传输,从而最终满足探测器驱动与偏置电路低噪声、高精度和高可靠性的性能要求。

2.3.2 成像处理电路

成像系统中首先将驱动与偏置电路后输出的模拟信号进行减直流、差分放大等预处理,然后进行 AD 采样转换成高精度的数字红外图像信号,

再对红外图像数字信号进行一系列数字图像处理,包括完成非均匀性修正、盲元填充、制式变换、图像极性变换、对比度调节和亮度调节等图像处理过程,再经过数字式的字符叠加后输出到视频 D/A 产生标准视频信号,处理流程如图 10 所示。

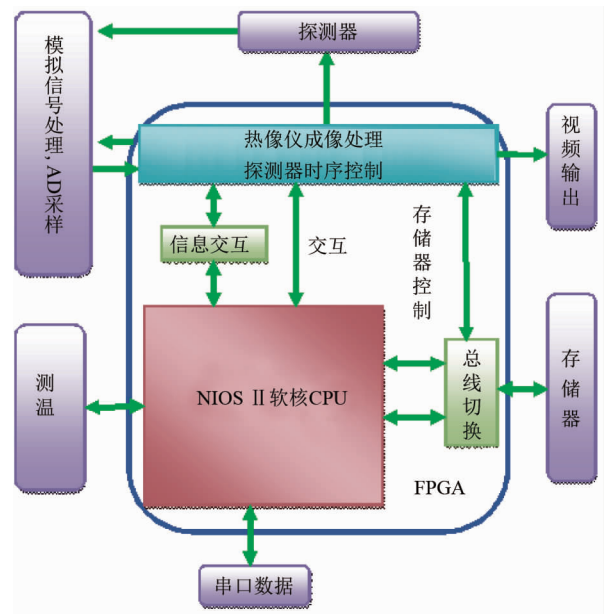


图 10 系统数字信号处理原理框图

Fig. 10 Digital signal processing functional block diagram of system

针对制导红外成像的技术指标要求以及使用特点,必须使成像信号处理主通道电路具有高速度、处理大数据量、复杂算法的能力,从而保证制导红外成像的功能性和实时性,兼顾考虑小体积、低功耗、高稳定性和可靠性设计要求,因此主处理器方面选用高性能、低成本、低功耗和小体积的 Altera Cyclone III 系列器件。

对于远距离的探测与识别,目标较弱的情况(目标温度与背景温度接近),它影响图像的视觉效果及观察、识别能力的进一步提高。因此有必要开展工作,抑制这种噪声,更好地提高热像仪的信噪比。根据固定背景噪声产生的机理和具体特征,进行了大量的算法仿真、评估与优化工作,并对模拟电路降低噪声提高信噪比的方案进行了多种测试与比较,在此基础上总结出一种新型处理算法和电路方案,可以较有效地滤除噪声、改善视觉效果,达到提高系统探测能力的要求。

2.4 探测距离分析

系统对目标的探测距离是目标尺寸、系统瞬时视场、目标与背景的温差、大气透过率、系统的噪声

等效温差和系统的最小可分辨温差的函数^[6].

本系统的设计环境参数为:

能见度:7 Km,

目标与背景温差: $\Delta T = 5$ K

目标最小尺寸: $H \times W = 2.3 \times 2.3$ m²

1) 如果目标的几何尺寸为 $H \times W$, 而它在图像平面上的投影(目标图像)像素为 $n_H \times n_W$, 则成像距离 R 的计算公式为:

$$R = \frac{1}{\delta} \sqrt{\frac{H \times W}{n_H \times n_W}}, \quad (7)$$

其中, δ 为需要的空间分辨率(瞬时视场)(mrad); R 为距离(km); H 、 W 为目标尺寸(m); n_H 、 n_W 为在一定识别概率下完成探测所需的像素.

成像系统的瞬时视场为 $\theta = 0.03/137.5 = 0.218$ mrad.

按约翰逊准则, 探测概率为 95% 时, 探测需要 $n_H \times n_W = 4 \times 4$ 像素, 代入式(7)则可解得相应的成像距离 $R_{I\text{探测}}$ 为:

$$\begin{aligned} R_{I\text{探测}} &= \frac{1}{\delta} \sqrt{\frac{H \times W}{n_H \times n_W}} \\ &= \frac{1}{2.14 \times 10^{-4}} \sqrt{\frac{2.3 \times 2.3}{4 \times 4}} \approx 2.686 \text{ km} \end{aligned}$$

2) 从温度灵敏度的角度分析, 红外探测器以温度定义的信噪比(SNR)为:

$$\text{SNR} = \frac{\Delta T_R}{\text{NETD}}, \quad (8)$$

其中, NETD 是所选择的红外探测器组件的等效噪声温差, 而 ΔT_R 是目标与背景温差 ΔT 经过距离 R 之后到达探测器的温差, 其值为:

$$\Delta T_R = \Delta T \times \tau_a. \quad (9)$$

SNR 是从图像中探测出目标所要求的信噪比, 其值与图像预处理有很大关系. 一般来说, 选择 $\text{SNR} = 2.25$ 就可以保证探测目标. 此处, $\Delta T = 5$ K, $\text{NETD} = 50$ mK, 在此大气条件下, $\alpha = 0.49 \sim 0.44$, 进行探测 $\text{SNR} = 2.25$, 则得出:

$$\begin{aligned} e^{aRd} &= \frac{\Delta T}{\text{NETD} \times \text{SNR}} \\ R_{d\text{探测}} &\approx \frac{\ln 37}{0.49} \approx 7.3 \text{ km} \end{aligned} \quad (10)$$

探测距离 $R_{\text{探测}}$ 应该选取 $R_{I\text{探测}}$ 和 $R_{d\text{探测}}$ 中较小的那个, 即 2.686 km, 可以满足探测距离大于 2 km 的设计要求^[7,8].

3 结论

设计了一种快速制冷型红外焦平面成像系统,

并对其工作机理进行了研究和分析, 通过设计分析, 确定了系统结构和参数. 主要成果在于:

(1) 完成了低功耗、高帧频、快速启动的 InSb 焦平面探测器组件设计及验证;

(2) 完成了小型化、低功耗、高可靠性的制导用驱动及成像电路设计及验证.

设计验证结果表明, 技术指标达到了制导用快速制冷型红外焦平面成像传感器的需求. 系统达到的技术情况见表 3.

表 3 成像系统达到的性能

Table 3 Achieved performance of image system

项目	达到指标
峰值探测率	3×10^{11} cmHz ^{1/2} W ⁻¹
探测器噪声等效温差	12 mK
帧频	270 帧
启动时间	8 s
视场	$1.6^\circ \times 1.6^\circ$
探测距离	2.4 km
最小可分辨温差	≤ 0.18 K@ (1/2 α)
系统总重(稳定部分)	170 g

References

- [1] SUN Weigou, HUANG Yong an, *et al.* Air to air missiles photodetector design[M]. Beijing: National Defence Press, (孙维国, 黄永安, 等. 空空导弹光电探测器设计. 北京: 国防工业出版社), 2006.
- [2] CHANG Jun, LIU Li ping, CHENG De wen, *et al.* Design of infrared optical system with special dome[J]. *J. infrared Millim. Waves.* (常军, 刘丽萍, 程德文, 等. 含特殊整流罩的红外光学系统设计. 红外与毫米波学报), 2009, **28**(3): 204-206.
- [3] LIU Ze-wei, ZHANG Gang, ZHAO Jian-zhong. Analysis of influence factors on IRFPAs fast start-up [J]. *Laser & Infrared*, (刘泽巍, 张钢, 赵建忠. 红外焦平面探测器快速启动影响因素分析. 激光与红外), 2013, **49**(9): 1036-1039.
- [4] Uwe G. Hingst. Fast-cool-down dual gas spray-cooler for pivoted IR detectors[C]. *SPIE*, 2003, **5074**: 620-628.
- [5] YAO Qing-hua. Application research of tapered self-regulated J-T cryocoolers[J]. *Laser & Infrared*, (姚清华. 锥形自调式节流制冷器的应用研究. 激光与红外), 2012, **42**(9): 1004-1006.
- [6] LU Yan, LING Yong-shun, WU Han-ping, *et al.* Study on passive measurement of ground objects by infrared radiation [J]. *J. infrared Millim. Waves.* (卢远, 凌永顺, 吴汉平, 李晓霞. 地面目标的红外被动测距研究. 红外与毫米波学报), 2004, **23**(1): 77-80.
- [7] WANG Yi-feng, SHI Yan-li, MA Yu. On the operating rang of infrared detection systems (I) [J]. *INFRARED*, 2012, **33**(11): 8-13 (王忆锋, 史衍丽, 马钰. 论红外探测系统的作用距离(上). 红外), 2013, **33**(11): 8-13.
- [8] WANG Yi-feng, SHI Yan-li, MA Yu. On the operating rang of infrared detection systems (II) [J]. *INFRARED*, 2012, **33**(12): 8-12 (王忆锋, 史衍丽, 马钰. 论红外探测系统的作用距离(下). 红外), 2013, **33**(12): 8-12.