光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022040303

星用短波红外成像仪的设计与实现

张维刚*，车　驰，付政权，张建华，吴海游，左弟俊
（重庆光电技术研究所，重庆 400060）

摘　要： 针对低轨卫星激光通信和大气层短波红外光谱分析的应用需求，设计并研制了一种星用短波红外成像仪。由于低轨卫星系统的抗总剂量辐射能力要求为 20 kRad(Si)以上，因此，该成像仪选用抗总剂量辐射能力达到 20 kRad(Si)的 InGaAs 焦平面探测器；采用宇航级元器件设计相应的时序驱动、温度控制、模数转换、图像传输、遥控遥测等硬件电路模块，组成成像仪硬件部分；应用 PID 温控算法实现成像仪精准控温，采用非均匀性校正算法和图像增强算法提升成像仪图像质量。经试验验证，研制的短波红外成像仪抗总剂量辐射能力达到 25 kRad(Si)，动态范围大于等于 61 dB，非均匀性小于等于 1.9%，满足低轨卫星短波红外光谱探测的要求。

关键词： 短波红外；InGaAs 焦平面；星载；光谱探测

中图分类号： TN215　**文章编号：** 1001－5868(2022)06－1162－06

Design and Implementation of Short-wave Infrared Imager for Satellite

ZHANG Weigang, CHE Chi, FU Zhengquan, ZHANG Jianhua, WU Haiyou, ZUO Dijun
(Chongqing Optoelectronics Research Institute, Chongqing 400060, CHN)

Abstract: Aiming at the application requirements of laser communication and atmospheric short-wave infrared (SWIR) spectroscopy of low-orbit satellites, a design method for star short-wave infrared imagers is proposed. Since the anti-total dose radiation capacity of the low-orbit satellite system is required to be more than 20 kRad (Si), the method first screened the InGaAs focal plane detector with a total dose radiation resistance of more than 20 kRad (Si). Then the aerospace-level components were used to design the corresponding timing drive, temperature control, analog-to-digital conversion, image transmission, remote control telemetry and other hardware circuit modules to form the hardware part of the imager. Finally, the PID temperature control algorithm was applied to achieve accurate temperature control of the imager, and the non-uniformity correction algorithm and image enhancement algorithm were used to improve the image quality of the imager. After test verification, the short-wave infrared imager has a total dose radiation resistance capacity of 25 kRad(Si), a dynamic range greater than or equal to 61 dB, and a non-uniformity less than or equal to 1.9%, which meets the requirements of short-wave infrared spectroscopy detection of low-orbit satellites.

Key words: SWIR; InGaAs focal plane; star use; spectral probing

0　引言

可见光探测器(如 TDI CCD，TDI CMOS)在星用遥感成像及大气光谱探测方面的应用已成熟，短波红外探测器作为近红外谱段的光谱探测器有着强烈的应用需求。近年来，随着民营卫星公司的快速发展，大气近红外谱段的光谱探测分析以及卫星间通信对位的应用，对短波红外焦平面探测器提出新的需求。用于制造短波红外焦平面探测器的材料主

收稿日期：2022－04－03.

*通信作者：张维刚　E-mail：zwgei@163.net

要包括碲镉汞(HgCdTe)、铟镓砷(InGaAs)、砷化铟/锑化镓(InAs/GaSb)、铂硅(PtSi)等，经过大量的研究和长时间的应用，基本上形成了 HgCdTe 和 InGaAs 主导的局面。随着材料工艺和集成电路研究的不断深入，采用 HgCdTe 和 InGaAs 等材料制造的短波红外焦平面探测器已广泛应用于各个领域。相对于 HgCdTe，InGaAs 更容易生长质量控制和工艺处理，并有对应的大直径和高质量Ⅲ-Ⅴ族衬底。同时，在材料体系晶格匹配的条件下，采用衬底剥离工艺[1]，InGaAs 短波红外探测器的响应光谱可覆盖 0.4～1.7 μm 的可见短波红外范围，这使其兼备可见光与短波红外光谱探测优势，因此 InGaAs 短波红外焦平面探测器具有更广阔的应用前景。

基于上述优势，InGaAs 短波红外焦平面探测器技术已受到各国的高度重视，美国、法国、比利时等国家投入了大量的人财物力进行该领域的研究工作[2]，短波红外探测器成像已大量应用于工业检测、边防、机载、舰载、单兵装配等重点领域，上述应用为短波红外焦平面探测器的星载应用奠定了基础。近年来，国产 InGaAs 短波红外探测器技术发展迅速，在读出噪声、动态范围、非均匀性、制冷方面都有很大进步，已能完全替代国外主流产品。为此，本文设计并研制一种星用短波红外成像仪，该成像仪基于国产 InGaAs 短波红外焦平面探测器。开展了相应功能模块电路设计，并通过非均匀性校正算法和图像增强算法提升成像仪图像质量。

1　系统构成及工作原理

星用短波红外成像仪基于短波红外焦平面探测器进行设计，主要功能是将环境中 900～1 700 nm 的短波红外谱段能量转换为对应的电信号，然后经过量化、数据处理后输出表征能量强度的图像信息。

成像仪主要由 InGaAs 焦平面探测器、焦平面驱动模块、运放及模数转换(ADC)模块、温度控制模块、可编程逻辑器件(FPGA)模块、闪存存储器(Flash Memory，FLASH)模块、数传模块和遥控遥测模块组成，如图 1 所示。FPGA 模块产生短波红外探测器的转移时序，探测器驱动模块将驱动电平叠加到转移时序，产生满足探测器要求的时序驱动信号；探测器依据时序驱动信号输出原始的模拟图像信号，原始的模拟图像信号经过模数转换器转换后输出数字图像信号到可编程逻辑器件；FPGA 对数字图像信号进行采集、非均匀性校正、图像增强以及编码后通过数传模块输出到后端光谱获取系统。FPGA 还通过温度控制模块监测探测器的温度，从而对探测器进行制冷控制。遥控遥测模块实现对短波红外成像仪的控制和监测；FLASH 存储 FPGA 的配置数据，在 FPGA 上电时对其进行配置。

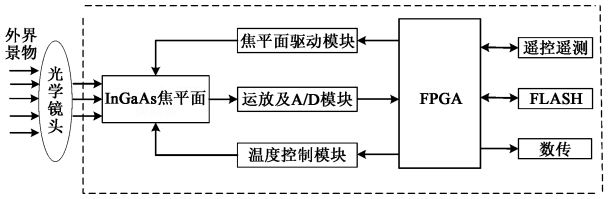


图 1　星用短波红外成像仪构成框图

2　方案设计

2.1　InGaAs 探测器

分别对重庆光电技术研究所研制的 GD6883-64015A-MD 型 InGaAs 短波红外阵列成像探测器和 XENICS 公司的 XFPA-1.7-320_4-TE0 型探测器进行抗辐射能力测试，其抗总剂量辐射能力分别为 25 kRad(Si)和 5 kRad(Si)。鉴于 GD6883-64015A-MD 型 InGaAs 短波红外阵列成像探测器满足低轨卫星的抗辐射要求，并且为国产化元器件，本设计采用 GD6883-64015A-MD 型 InGaAs 短波红外阵列成像探测器作为光电转换器件。

该探测器结构由 CMOS 读出电路芯片(ROIC)与 InGaAs 光电二极管探测器阵列(PDA)倒焊互连而成。探测器背面入光，光敏元将收集到的光信号在积分时间内转换为电信号，注入到对应的读出电路单元，并由读出电路按规定的时序和模式完成信号的读出。器件的光谱响应波段范围为 0.9～1.7 μm，分辨率为 640(H)×512(V)，芯片内置半导体制冷器(Thermo Electric Cooler，TEC)及测温电路，支持多种积分/读出模式，多种功能可选，输出通道为 1、2、4、8 路可选，同时支持开窗选区域输出模式，全分辨率输出时最高帧率可达 300 f/s，满足星用短波红外成像仪的设计要求。

2.2　模数转换模块设计

由于 InGaAs 探测器输出图像为模拟信号，设计方案中需要通过 ADC 模块把模拟图像信号转换成数字图像信号，然后输入到 FPGA 中进行处理。

本设计选用中国电子科技集团公司第二十四研究所研制的宇航级产品 SAD2208 型 ADC 器件进行设计。该器件采样频率高达 100 MS/s，模拟输入模式为差分信号，数字输出模式为差分或者单端方

式可选，差分模拟输入峰峰值可达 1.5～2.25 V，模拟共模输入电压(V_{ICM})范围为 1.15～1.35 V，抗辐射总剂量达到 100 kRad (Si)，且具有抗单粒子锁定和抗单粒子翻转功能。

基于星用成像仪可靠性设计要求，设计中将 SAD2208 的 MODE 引脚拉低，采用单端输出模式，SAD2208 原理图如图 2 所示。

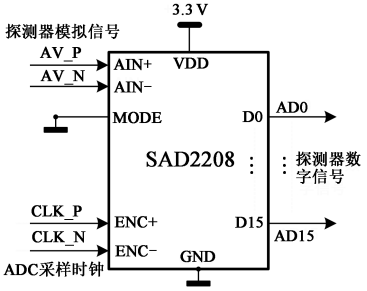


图 2 模数转换电路设计

2.3 温度控制模块设计

成像仪在工作过程中，InGaAs 探测器的暗电流会随着温度的升高而增大，依据经验，温度每升高 7 ℃，暗电流就会增大一倍，导致图像的噪声变大，影响成像仪系统性能。因此，需要对 InGaAs 探测器进行制冷温控以达到降低探测器暗电流的目的。

本方案利用 TEC 制冷及测温模块实现对探测器进行制冷和温控。探测器的温度控制原理框图如图 3 所示。

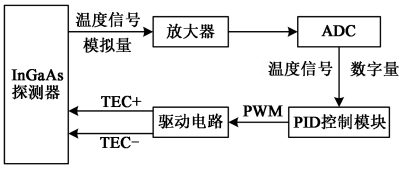


图 3 温度控制原理框图

InGaAs 探测器内置温度传感器，输出表征温度的电压信号，通过运算放大器对温度电压的偏置进行减法运算后放大，将温度电压信号放大到 ADC 合适的量程范围，然后输出到 ADC 模块中进行模数转换，最后将转换后的温度信息进行 PID 算法运算，得出相应的脉冲宽度调制(PWM)信号，该 PWM 信号经过 MOS 驱动电路后整形为驱动 TEC 的直流电平信号，实现 TEC 制冷。

TEC 制冷电路选用型号为 RCS7382U3 的 MOS 管进行设计，如图 4 所示。器件抗总剂量辐射能力为 100 kRad(Si)，通过该电路，InGaAs 探测器温控精度可达 0.1 ℃，满足星用成像仪设计要求。

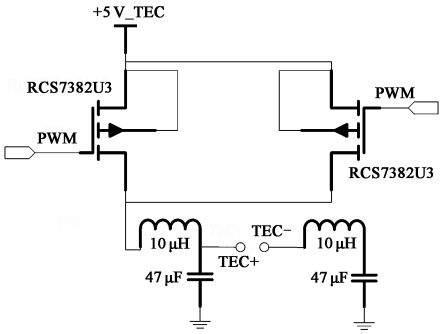


图 4 TEC 制冷电路

2.4 可编程逻辑器件模块

InGaAs 探测器除需要提供驱动偏置电压外，还需提供读出及控制时序，才能输出正常的图像数据。FPGA 电路主要负责产生 InGaAs 探测器各种模式的读出时序以及配置控制时序，同时还负责温控 PID 算法、测温 ADC 控制、图像 ADC 控制、图像增强及编码、遥控遥测信号反馈等功能。

设计中，选用 Xilinx 公司生产的 XQR2V3000-4CG717V 型 FPGA，该 FPGA 包括 300 万系统门单元和 1 728 kbit 内部随机存储器(RAM)，12 个数字时钟管理器(Digital Clock Manager，DCM)，抗总剂量辐射能力 200 kRad(Si)，线性能量传递(Linear Energy Transfer，LET)大于 160 MeV^{-}/mg，单粒子翻转事件(Single Event Upset，SEU)小于 1.5×10^{-6} Device per Day；FPGA 的 I/O 工作电压为 3.3 V，核电压为 1.5 V，内核最高工作频率可达 300 MHz，工作温度范围为－55～125 ℃，满足设计要求。

2.5 接口模块设计

接口模块设计主要包括遥控遥测接口和图像数据传输接口。成像仪通过异步 RS422 串口接口实现与载荷管理器进行通信。载荷管理器将内部遥控指令发送给成像仪，成像仪通过异步 RS422 串口将表征成像仪工作状态的遥测信息反馈给载荷管理器，异步 RS422 通信串口示意图如图 5 所示。

RS422 异步接口电路分为主份信号和备份信号，若主份信号失效，则备份信号启用；采用北京微电子技术研究所型号为 B26CLV31TERH 和 B26CLV32TERH 的接口芯片进行设计，该器件抗辐总剂量为 100 kRad(Si)，满足设计要求。

图像数据传输单元由 4 对低电压差分信号(Low-Voltage Differential Signaling，LVDS)线组成，分别对应奇元数据、偶元数据、时钟信号、门控信号，数据格式如图 6 所示。

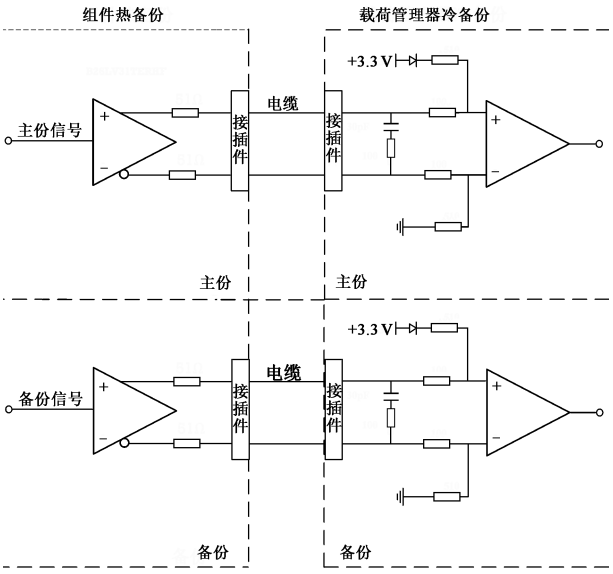


图 5　异步 RS422 通信串口示意图

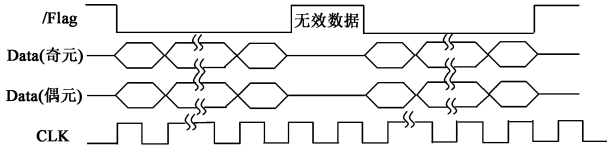


图 6　图像数据传输接口时序图

奇偶两路数据(Data)的码速率设置 32 Mb/s；数据时钟(CLK)信号的频率为 32 MHz，占空比为 45%～55%；门控(Flag)信号作为数据有效标志位，低电平有效。图像数据传输接口电路采用 B54CLV031TERH 和 B54CLV032TERH 进行设计，该器件抗辐总剂量为 100 kRad(Si)，最高可实现 200 Mb/s 数据的传输，满足设计要求。

3　软件实现

3.1　探测器工作时序

GD6883-64015A-MD 型探测器支持先积分后读出(ITR)、边积分边读出(IWR)、连续积分多次读出等多种时序模式。而在 ITR 模式下，探测器输出的固定图形背景噪声最小，本设计采用 ITR 时序模式，如图 7 所示。图中 DATAVALID 为每行读出有效标记信号，上升沿表示信号开始读出，下降沿表示读出结束；LINE1 为第一行读出有效标记信号；INT 为帧积分控制信号；MC 为主时钟信号；OUT 1～8 为图像数据输出信号。

每个信号读出所用的时间为一个主时钟周期 t_{mc}，总读出时间 t_{read} 计算公式为

$$t_{read}=t_{mc}\times H\times V/N+t_{rd}\times(V-1) \quad (1)$$

式中，t_{rd} 为行输出周期间隔，N 为输出通道数，H 为列数，V 为行数。由此，系统的工作帧周期 t_{frame} 计算公式为

$$t_{frame}>t_{read}+t_{int}+t_{hold} \quad (2)$$

式中，t_{read} 为总读出时间，t_{int} 为积分时间，t_{hold} 为保持时间。

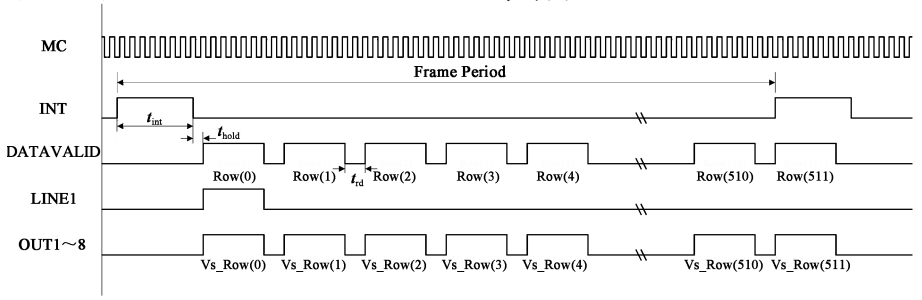


图 7　ITR 时序模式

InGaAs 探测器 ITR 时序工作模式为：信号读出在当前帧积分信号之后，在下一帧积分之前进行，逐行读出当前帧像素积分信号，每行积分信号读出完毕后经过行输出周期间隔 t_{rd}，再开始下一行信号读出，直到读完当前帧全部像素积分信号。像素单元信号从积分信号 INT 下降沿经过一个 t_{hold} 时间后开始读出，DATAVALID 信号在 INT 信号下降沿后经过 t_{hold}(时间长度为 $83t_{mc}$)变高，开始读出第一行第一列像元的信号数据，输出第一行最后一列信号后 DATAVALID 信号变低；整帧信号输出过程中相邻的行输出周期间隔 t_{rd}(时间长度为 $23t_{mc}$)，DATAVALID 的每个高电平持续时间周期长度等于 H/N，重复上述输出的动作，直至整帧像元信号全部输出。

探测器驱动时序以及同步的产生均由 FPGA 实现，FPGA 先生成探测器所需的主时钟和帧积分控制信号驱动探测器，探测器输出第一行标志信号、数据有效信号以及模拟图像数据，模拟图像数据经过 ADC 后数字化，为后续图像处理作准备；FPGA 根据第一行标志信号和数据有效信号产生图像数据

的帧行同步信号，随数字化后的图像数据一起输出给后续图像处理模块。

3.2 PID 温控算法

PID 算法是一种经典的控制算法[3]，该算法不要求求解被控对象数学模型，而参数可进行灵活的调节，使用的控制对象较为宽泛，简单高效。本设计中采用位增式 PID 算法，其表达式为

$$u(n)=K_{\mathrm{p}}e(n)+K_{\mathrm{i}}\sum_{k=0}^{n}e(k)+K_{\mathrm{d}}(e(n)-e(n-1)) \tag{3}$$

式中，$u(n)$为输出控制量，K_{p} 为比例放大系数，K_{i} 为积分放大系数，K_{d} 为微分放大系数，$e(n)$与 $e(n-1)$分别为前后时刻的差值信号。经过 PID 温控算法的实时温度数据如图 8 所示，纵轴为制冷温度，横轴为实时采集的温度数据量，制冷的目标温度为 −10 ℃，从图 8 中可以看出，温控精度为±0.2 ℃。

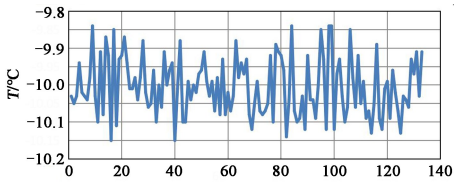


图 8 PID 温控实时温度数据

3.3 动态图像增强算法

3.3.1 非均匀性校正

探测器阵列是由许多微型探测器单元组成的，这些探测器单元由于制造过程的不一致性，使得探测器阵列的各单元的暗电流和响应率各不相同，它导致成像系统总是带有固定图形噪声，使得系统的灵敏度降低，这直接影响到探测器阵列的成像质量，因此需对最终图像进行非均匀性校正[4]。

若探测器单元的响应与光强呈线性关系，可以通过两点或多点定标线性校正算法来进行非均匀性校正，由于校正函数是线性关系，对每个探测器单元只存储两个校正参数；若探测器单元的响应与光强呈非线性关系，此时若仍采用线性校正算法必然会引起较大的误差。理想的措施是采用分段线性校正算法，依据探测器阵列的响应分成若干区间，在每个区间内应用线性校正算法，所划分的区间越多，校正的效果越好。

线性校正算法有一点定标算法、二点定标算法和多点定标算法。本设计采用二点定标算法，它的基本原理是在一点校正的基础上，选用两个定标点 P_1 和 P_2 计算输出信号平均值[5]，计算公式为

$$\bar{V}_{ij}(P_1)=\frac{1}{N}\sum V_{ij}(P_1) \tag{4}$$

$$\bar{V}_{ij}(P_2)=\frac{1}{N}\sum V_{ij}(P_2) \tag{5}$$

式中，P_1 和 P_2 为两个不同光照强度，$\bar{V}_{ij}(P_1)$和 $\bar{V}_{ij}(P_2)$分别为输出信号平均值，N 为探测器像元总数，$V_{ij}(P_1)$为 P_1 光照下第(i,j)个探测器单元的输出信号。

依据 $y=ax+b$，可推导出两点定标校正后的信号输出值为

$$\bar{V}_{ij}(P)=[V_{ij}(P)-V_{ij}(P_1)]\cdot\frac{\bar{V}_{ij}(P_2)-\bar{V}_{ij}(P_1)}{V_{ij}(P_2)-V_{ij}(P_1)}+\bar{V}_{ij}(P_1) \tag{6}$$

式中，$\bar{V}_{ij}(P)$为校正后输出信号，$V_{ij}(P)$为原始信号。

3.3.2 Retinex 图像增强

经过非均匀性校正的图像对比度较低，需对图像进行增强处理。本文采用 Retinex 算法[6]来改进图像质量，Retinex 理论认为一副图像 G 可以表示成反射属性 R 和照度属性 I 的乘积[7]表达式为

$$G(i,j)=R(i,j)\times I(i,j) \tag{7}$$

式中，(i,j)为像素点的空间二维坐标，$G(i,j)$为原始图像，$R(i,j)$为反射属性，为物体本身的颜色特性，与图像中的高频部分对应，$I(i,j)$为照度属性，与图像中的低频部分对应。

Retinex 的核心思想为从原始图像中减去环境亮度的影响，还原出物体本身的颜色特性，从而达到图像增强的目的。人眼的视觉特性更符合数域下的运算特点[8]，因此可将式(7)转换到对数域下求解，即单尺度 Retinex 图像增强(SSR)算法，表达式为

$$\lg R(i,j)=\lg G(i,j)-\lg I(i,j) \tag{8}$$

利用上式，照度 $I(i,j)$则可采用高斯中心环绕函数进行求解，可表示为

$$I(i,j)=G(i,j)\otimes F(i,j) \tag{9}$$

式中，$\otimes$表示卷积运算，$F(i,j)$为高斯滤波函数。高斯滤波函数具有平滑的特性，能够保留增强后图像的边缘细节信息。高斯滤波函数的定义如下：

$$F(i,j)=Ke^{-\frac{r^2}{c^2}} \tag{10}$$

式中，K 为归一化因子，r 为距中心像素点的距离，c 为尺度因子。但 SSR 算法不能同时具有较高的动态范围压缩和色彩还原，研究人员在其基础上又提出了多尺度 Retinex 图像增强(MSR)算法[9]，其表

达式为

$$\lg R(i,j)=\sum_{k=1}^{K}W_k\{\lg G(i,j)-\lg I(i,j)\} \quad (11)$$

式中，W 为权重系数，K 为尺度个数。

4　成像效果图

系统参数设置如下：镜头选用 F1.4，室内成像，积分时间 8 ms，制冷到－10 ℃，选择 ITR 模式，对同一目标进行成像，经过温度控制、非均匀性校正、图像增强后的图像如图 9 所示。图 9(a)为室外正常光照下原始图像，均匀性较差；图 9(b)为两点校正后图像，均匀性达到了理想效果，但对比度较低；图 9(c)为 MSR 算法增强后的图像，对比度明显提高，达到了图像增强的效果。



(a)　原始图像　　(b)　校正后图像　　(c)　MSR 处理后图像

图 9　数字图像处理对比

5　结论

本文采用国产 InGaAs 探测器，运用航天级元器件设计了具有温度控制、非均匀性校正、图像增强等功能的 InGaAs 短波红外成像仪。经实测，该成像仪抗总剂量辐射能力达到 25 kRad(Si)，动态范围为 61 dB，图像非均匀性为 1.9%，具有灵敏度高、成像对比度高、均匀性好等特点。

参考文献：

[1] 张卫锋，张若岚，赵鲁生，等. InGaAs 短波红外探测器研究进展[J]. 红外技术，2012，34(6)：361-365.
Zhang Weifeng，Zhang Ruolan，Zhao Lusheng，et al. Development progress of InGaAs short-wave infrared focal plane arrays[J]. Infrared Technology，2012，34(6)：361-365.

[2] 龚海梅，张可锋，唐恒敬，等. InGaAs 近红外线列焦面阵的研制进展[J]. 激光与红外，2009，38(1)：14-18.
Gong Haimei，Zhang Kefeng，Tang Hengjing，et al. Developments of near IR linear InGaAs FPAs in China[J]. Infrared and Laser Engineering，2009，38(1)：14-18.

[3] Ang K H，Chong G，Member S，et al. PID control system analysis，design，and technology [J]. Control Systems Technol.，IEEE Transactions on，2005，13(4)：559-576.

[4] 常本康，蔡　毅. 红外成像阵列与系统[M]. 北京：科学出版社，2006.

[5] 卢　杰，张维刚，吴海游，等. InGaAs 焦平面探测器成像组件的设计与实现[J]. 半导体光电，2015，36(3)：509-512.
Lu Jie，Zhang Weigang，Wu Haiyou，et al. Design and realization of InGaAs FPA imaging module[J]. Semiconductor Optoelectronics，2015，36(3)：509-512.

[6] Land E H，Mclann J J. Lightness and the retinex theory[J]. J. Opt. Soc. Am，1971，61(1)：1-11.

[7] Brainard D H. Analysis of the retinex theory of color vision [J]. J. of the Optical Society of America A-Optics Image Science & Vision，1986，3(10)：1651-1661.

[8] Almuntashri A，Agaian S. Human visual system-based edge detection using image contrast enhancement and logarithmic ratio [J]. Proc. of SPIE-The Inter. Society for Optical Engineering，2010，7708(1)：247-247.

[9] Jobson D J，Rahman Z，Woodell G A. A multiscale retinex for bridging the gap between color images and the human observation of scenes[J]. IEEE Trans. on Image Processing，2002，6(7)：965-976.

作者简介：

张维刚(1981－)，男，毕业于吉林大学，获学士学位，主要从事 DSP、FPGA 应用技术、军用摄像机、星用摄像机的研究。