

# 像素级数字积分红外成像技术研究

张丽莎 刘兆军 马文坡 龙亮 吴立民

中国空间技术研究院北京空间机电研究所, 北京 100076

**摘要** 为实现更高灵敏度红外探测能力,分析了电荷处理能力与探测灵敏度之间的关系,提出了像素级数字积分探测技术。通过对红外成像链路中各噪声源的分析,建立了基于像素级数字积分探测技术的红外系统信噪比模型,并结合应用实例完成了系统关键指标参数的设计和噪声等效温差模型的仿真。仿真结果表明,像素级数字积分探测技术能够突破传统探测技术电荷处理量只有几十或几百兆电子的约束,实现千兆电子量级电荷处理能力和毫开级高灵敏度的红外系统性能。

**关键词** 成像系统; 红外成像; 探测灵敏度; 像素级数字积分; 电荷处理量; 噪声等效温差

**中图分类号** TP732.2      **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP53.091102

## Infrared Imaging Technology Based on Pixel-Level Digital Integration

Zhang Lisha Liu Zhaojun Ma Wenpo Long Liang Wu Limin

China Academy of Space Technology, Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100076, China

**Abstract** In order to achieve high sensitivity infrared detection ability, the relationship between the charge handling capacity and the detection sensitivity is analyzed, and the pixel-level digital integration technique is introduced. By analyzing noise sources of the whole infrared imaging chains, the signal-to-noise-ratio model based on the pixel-level digital integration technique is established. The design of key parameters and the simulation of noise equivalent temperature difference model are accomplished combining with the application examples. The simulation results demonstrate that the pixel-level digital integration detection technique can break through the constraint that the traditional detection technology only has tens or hundreds of megabytes electron charge capacity, and it can realize the charge handling capability up to kilomega electronic magnitude and high sensitivity up to milli kelvin.

**Key words** imaging systems; infrared imaging; detective sensitivity; pixel-level digital integration; charge capacity; noise equivalent temperature difference

**OCIS codes** 110.3080; 130.3060; 120.0280; 280.4991

## 1 引言

随着红外探测技术的发展,红外成像系统无论在民用领域还是在军用领域均取得了广泛应用。在一些特殊的探测场景中目标和背景的温差极小,对红外系统的探测灵敏度要求越来越高。同时在高分辨率、大动态范围、低功耗等各类需求的牵引下,红外探测技术需要实现更高的探测性能,一方面应加大阵列规模并缩小像素尺寸,提高几何分辨率;另一方面需要实现较高的电荷处理能力,提高探测灵敏度<sup>[1]</sup>。

传统的红外探测技术,随着几何分辨率要求越来越高,像素尺寸显著减小,限制了积分电容的大小。积分电容越小,满阱电荷量也越小,相应地,较短的积分时间就已达到满阱;同时长波波段背景辐射较强,探测器暗电流较大,这些因素都会影响探测器的动态范围,使得有效积分时间非常短;系统完成一次积分、读出所需要的时间很可能要小于卫星或机载平台所提供的像素驻留时间<sup>[2-5]</sup>。

为解决上述问题,需充分利用像素驻留时间,提高电荷处理能力,因此,项目组基于国内外研究现状,提

**收稿日期:** 2016-05-11; **收到修改稿日期:** 2016-05-24; **网络出版日期:** 2016-08-18

**作者简介:** 张丽莎(1983—),女,博士研究生,主要从事空间红外遥感器总体设计方面的研究。E-mail: zls508@126.com

**导师简介:** 刘兆军(1969—),男,研究员,博士生导师,主要从事空间红外光学遥感、遥感器系统总体技术方面的研究。

E-mail: bisme@china.com

出基于像素级数字积分的空间红外探测技术,通过建立成像全链路信噪比模型,完成系统的关键参数设计和性能仿真。

## 2 像素级数字积分探测技术原理

### 2.1 电荷处理能力与探测灵敏度关系研究

噪声等效温差(NETD)是表征探测灵敏度的重要参数,用于描述红外成像系统受客观信噪比  $R_{SN}$  限制的温度分辨率,是基于红外系统的信噪比推导而来<sup>[6-8]</sup>。

根据定义,信噪比  $R_{SN}=1$  时的温差  $\Delta T$  即为 NETD,表达式为

$$T_{NETD} = \frac{\Delta T}{v_s/v_n} = \left( \frac{v_s}{\Delta T} \right)^{-1} v_n, \quad (1)$$

式中  $v_s$  和  $v_n$  分别为探测器输出的信号电压和噪声电压。如果红外系统的电子学带宽为  $\Delta f$ ,探测器的光敏面积为  $A_d$ ,目标与背景的辐射通量差为  $\Delta\Phi_d$ ,则探测率即为  $D^* = \frac{\sqrt{A_d\Delta f}}{\Delta\Phi_d} R_{SN}$ ,探测器的电压响应率为  $R_v = \frac{v_n D^*}{\sqrt{A_d\Delta f}}$ 。

探测器输出信号电压可表示为

$$v_s = \frac{\pi A_d}{4(F/\#)^2} \times \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_v(\lambda) \times L(\lambda, T_T) d\lambda, \quad (2)$$

式中  $F/\#$  为光学系统  $F$  数,  $T_T$  为目标辐射源温度。将(2)式代入(1)式推导出

$$T_{NETD} = \frac{4(F/\#)^2 \sqrt{\Delta f_n}}{\sqrt{A_d} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} D^* \frac{\partial M(\lambda, T)}{\partial T} \Big|_{T=T_B} d\lambda}, \quad (3)$$

因此,得出  $T_{NETD}$  与  $R_{SN}$  的关系为

$$T_{NETD} = \frac{\pi \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\lambda, T_T) d\lambda}{R_{SN} \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial M(\lambda, T)}{\partial T} \Big|_{T=T_B} d\lambda}, \quad (4)$$

式中  $\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\lambda, T_T) d\lambda$  为探测目标在  $\lambda_1 \sim \lambda_2$  谱段内的辐亮度,  $\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial M(\lambda, T)}{\partial T} \Big|_{T=T_B} d\lambda$  为背景温度  $T_B$  时,单位温度变化引起的辐射出射度的变化。

信噪比为信号电子数和噪声电子数之比,表示为

$$R_{SN} = \frac{Q_{Signal}}{Q_{Noise}} = \frac{Q_{Signal}}{\sqrt{N_{shot}^2 + N_{dark}^2 + N_{circuit}^2 + \dots}}, \quad (5)$$

式中  $N_{shot}^2$  为散粒噪声电子数,包括信号、大气辐射、光机辐射、探测器组件等引起的光子噪声,分别表示为  $N_{signal}^2$ 、 $N_{atmos}^2$ 、 $N_{optics}^2$ 、 $N_{detector}^2$ ,  $N_{shot}^2$  是各分量的均方根和,即

$$N_{shot}^2 = N_{signal}^2 + N_{atmos}^2 + N_{optics}^2 + N_{detector}^2 + \dots \quad (6)$$

当信号电荷量  $Q_{Signal}$  很大时,信号电荷量是决定信噪比的主要因素,当信号电荷量远远大于其他噪声时(如暗电流引入的噪声  $N_{dark}$ 、处理电路噪声  $N_{circuit}$ ),信噪比同信号电子数呈正相关关系,信号电子数越多,电荷处理能力越强,则信噪比越高。

对于光子噪声限探测系统(探测性能受限于光子噪声),NETD与电荷处理量的关系如图1所示。可见,要实现NETD达到毫开量级的探测灵敏度,需要近千兆量级的电荷处理量,这远远超出传统探测体制的满阱电荷量,因此有必要研究新的探测技术——像素级数字积分技术,以提高系统的电荷处理能力和探测灵敏度。

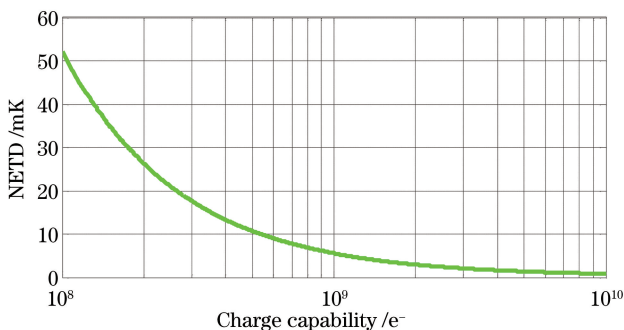


图1 NETD与电荷处理能力关系

Fig. 1 Relationship between NETD and charge capability

## 2.2 像素级数字积分探测技术原理

像素级数字积分探测技术原理及时序图如图2所示<sup>[9-13]</sup>。其探测流程为目标红外信号产生的光电流给探测器的积分电容 $C_{\text{int}}$ 放电,导致 $V_{\text{int}}$ 电位下降, $V_{\text{int}}$ 和 $V_{\text{ref}}$ 通过比较器进行比较,stop是全局控制信号,用来设定积分时间。在积分周期内,当 $V_{\text{int}}$ 电位低于 $V_{\text{ref}}$ 时,比较器输出翻转,同时经反馈电路使 $V_{\text{int}}$ 的电位复位到 $V_{\text{reset}}$ ,探测器重新开始新一轮积分。在很长的积分时间内一直重复上述过程,在若干次积分、翻转计数、反馈复位,这样的重复处理过程中,无需存储每次的信号电荷,仅需记录积分总次数。

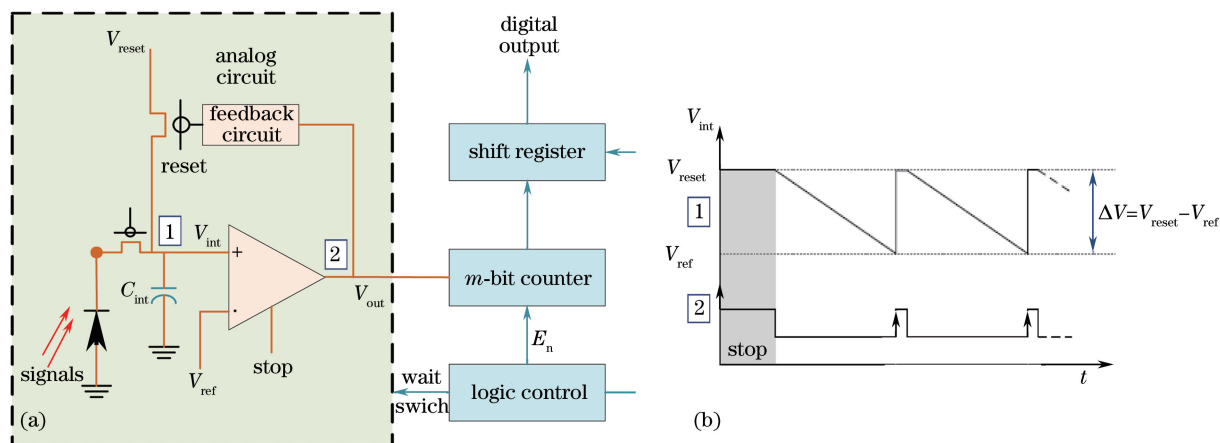


图2 像素级数字积分探测。(a)原理框图;(b)工作时序图

Fig. 2 Pixel-level digital integral detecting. (a) Principle diagram; (b) working sequential chart

目标信号的数字积分是通过电压复位计数型模拟数字转换器(ADC)实现的。只要计数器的位数(转换精度)足够高,就可以在很长的积分时间内一直接收探测器电流,从而大大提高读出电路的电荷处理能力,实现千兆量级电荷处理,满足大动态范围和高灵敏度探测需求。

## 2.3 积分电容及差分电荷包设计

电容 $C_{\text{int}}$ 值、最大电荷处理量 $Q_{\text{max}}$ 、AD转换的位数 $m$ 、复位电压 $V_{\text{reset}}$ 以及比较器翻转阈值电压 $V_{\text{ref}}$ 需满足如下关系式<sup>[10]</sup>:

$$C_{\text{int}} = \frac{q \times Q_{\text{max}}}{(V_{\text{reset}} - V_{\text{ref}}) \times 2^m}, \quad (7)$$

式中 $q$ 是单位电荷电量。

像素级ADC采用了电压差分复位方式实现电荷包计数,其最低有效位(LSB)由差分电荷包决定,即

$$Q_e = C_{\text{int}} \times (V_{\text{reset}} - V_{\text{ref}}). \quad (8)$$

像素级数字积分读出电路每个探测单元中的积分电容 $C_{\text{int}}$ 只起到电压-频率转换的作用;实现千兆量级电荷处理量,只需 $C_{\text{int}}$ 的值达到fF量级即可,工艺上非常容易实现。

由以上分析可知,为实现千兆量级电荷处理能力,有效位数的设计需平衡积分电容、动态范围以及NETD,

总电荷数确定后,在一定的 AD 转换位数下,由(7)和(8)式可进一步确定积分电容和差分电荷包大小。

为验证理论分析和仿真结果,项目组联合器件研制单位,目前已完成像素级数字积分探测器样片研制,并进行实验室测试,相关参数为谱段 7~10  $\mu\text{m}$ ,测试积分时间为 20 ms, $F$  数为 2,光敏面为 14  $\mu\text{m} \times 14 \mu\text{m}$ ,量子效率为 0.7,单包电子数为 90000 个。NETD 直方图分布如图 3 所示。可见,像素级数字积分技术能够实现电荷处理能力至千兆量级,提高探测灵敏度至毫开量级。

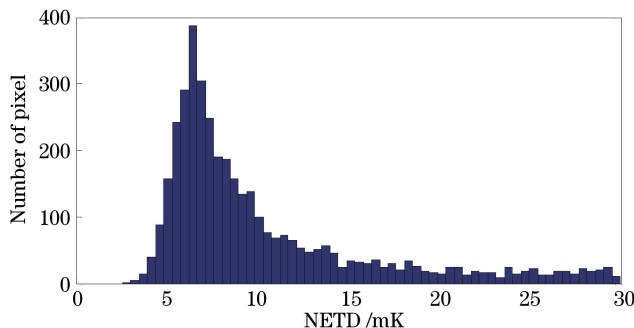


图 3 NETD 直方图

Fig. 3 NETD histogram

## 2.4 全链路噪声模型

为了对系统的信噪比进行预估和评价,需要对成像链路中不同的噪声来源进行研究,其噪声来源及分类如图 4 所示。由于像素级数字积分探测技术将更多的信号处理功能集成在像素级(如积分电荷的差分比较、复位、量化等),其噪声模型也不同;除了量化噪声和光子噪声外,必须考虑数字积分体制引入的其他噪声,如比较器噪声、开关复位噪声等。

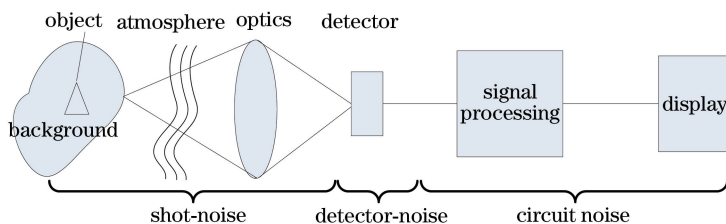


图 4 红外成像链路噪声来源及分类

Fig. 4 Noise sources and classification of infrared imaging chain

对于高灵敏度探测,各种噪声因素都必须充分考虑。散粒噪声需考虑信号的光子噪声、背景的光子噪声、大气辐射以及探测器暗电流的散粒噪声。这里假设计数循环过程中,每次积分-计数-复位所引入的噪声是不相关的。因此,经过  $M$  次累加计数后的总噪声  $\sigma_{\text{total}}$  可表示为单次计数噪声  $\sigma_{\text{one}}$  的  $\sqrt{M}$  倍,即

$$\sigma_{\text{total}}^2 = M \times \sigma_{\text{one}}^2. \quad (9)$$

累积后总噪声主要包括散粒噪声、量化噪声、复位噪声和比较器噪声,表示为

$$\sigma_{\text{total}}^2 = \sigma_{\text{shot}}^2 + \sigma_{\text{quan}}^2 + \sigma_{\text{reset}}^2 + \sigma_{\text{comp}}^2, \quad (10)$$

式中  $\sigma_{\text{total}}^2$  为总噪声电子数,  $\sigma_{\text{shot}}^2$  为成像链路散粒噪声电子数,  $\sigma_{\text{quan}}^2$  为量化噪声电子数,  $\sigma_{\text{quan}}^2 = \left( M \frac{C_{\text{int}} \Delta V}{2^m q \sqrt{12}} \right)^2$ ,

$\sigma_{\text{reset}}^2$  为复位噪声电子数,  $\sigma_{\text{reset}}^2 = M \frac{kTC_{\text{int}}}{q^2}$ ,  $\sigma_{\text{comp}}^2$  为比较器噪声电子数,  $\sigma_{\text{comp}}^2 = M \frac{C_{\text{int}}^2 e_{\text{comp}}^2}{q^2}$ ,  $m$  为最大量化位

数,  $C_{\text{int}}$  为积分电容,  $\Delta V$  为参考电压,  $q$  为单个电子电荷量,  $k$  为玻尔兹曼常数,  $T$  为探测器工作温度,  $e_{\text{comp}}$  为比较器输入噪声电压。其他噪声相比散粒噪声和量化噪声等非常小,这里忽略不计。

对于像素级数字积分探测系统,复位噪声和比较器噪声在噪声总量中占比较小,而量化噪声及散粒噪声占比较大。累加次数  $M$  较小时,收集的信号光子数少,量化噪声占据较大比例;累加次数  $M$  越大,量化噪声比例越低,散粒噪声将占据主导地位。当累加次数增加到一定程度时,探测器的噪声仅取决于散粒噪声。

从量化噪声的定义来看,  $n_{e-Q} = \frac{Q_e}{\sqrt{12}}$ ,  $Q_e$  为量化步长。为降低量化噪声, 最为直接的办法就是减小量化

步长。从其定义可知, 为进一步降低量化噪声, 需进一步减小量化电荷包。通过改变积分电容和阈值电压的大小可控制量化步长  $Q_e$ 。  $Q_e = C_{int} \times \Delta V / q$ ,  $\Delta V = V_{th} - V_{reset}$ 。但是受工艺限制, 积分电容不能太小, 而且  $Q_e$  越小, 对积分电容的偏差  $\Delta C_{int}$  和阈值电压  $\Delta V_{reset}$  的稳定性就越敏感。

## 2.5 像素级数字积分与传统多帧叠加的对比研究

在速高比匹配、传统探测技术满阱电荷无法满足电荷处理能力要求的情况下, 为充分利用平台提供的像素驻留时间, 主要有两种方式: 1) 常规采样, 多帧叠加; 2) 像素级数字积分探测技术。

多帧叠加, 即在常规的一帧时间内完成多次积分、多次转移输出, 并进行模数转换累加的数字方法。根据叠加原理可知, 在数字积分处理器中需要帧存储器作为数据缓冲。随着大幅宽探测以及图像空间分辨率的提高, 必然要求更大的存储器容量。从噪声分析, 电荷处理能力达百兆或千兆量级时, 光子噪声和量化噪声是主要噪声分量, 其他噪声占比较小, 理论上, 多帧叠加后, 量化噪声增加为单帧的  $\sqrt{N}$  倍 ( $N$  为叠加帧数)。为降低量化噪声, 需减小量化电荷包, 相应地, 量化电荷包的减小, 需要更多的量化位数以及更大的存储器容量。采用多帧叠加, 可延长等效的积分时间, 降低等效帧频, 但对单帧图像, 仍需要设计较高帧频进行输出<sup>[2]</sup>。

所采用的像素级数字积分技术, 像素级输出即为数字信号, 抗干扰能力强; 从信号数字积分原理看, 在信号收集过程中即可实现累积、量化, 并不需要大规模的存储器进行缓冲运算; 从噪声分析, 在一帧积分时间内, 量化噪声为  $\frac{\Delta Q}{\sqrt{12}}$ ,  $\Delta Q$  为量化电荷包, 比多帧叠加引入的量化噪声小, 更接近与光子噪声极限探测水平; 同时由于在像素级实现了数字化, 可以集成更多功能(如像素级增益补偿等)<sup>[13]</sup>。

## 3 实例仿真与结果分析

### 3.1 任务需求及输入条件

假定探测任务所处场景温度为 300 K(发射率设为 1), 目标/背景温差较小, 为有效探测目标, 要求红外成像仪具备毫开量级的探测灵敏度(用 NETD 表征); 卫星轨道或机载平台提供的积分时间为 20 ms; 暂定像素大小为  $40 \mu\text{m} \times 40 \mu\text{m}$ , 光学系统工作温度为 293 K,  $F$  数为 2。

根据大气窗口以及目标/背景辐射特性, 如图 5 所示, 目标辐射峰值在  $9.6 \mu\text{m}$  左右, 因此探测谱段初步选取为  $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 。

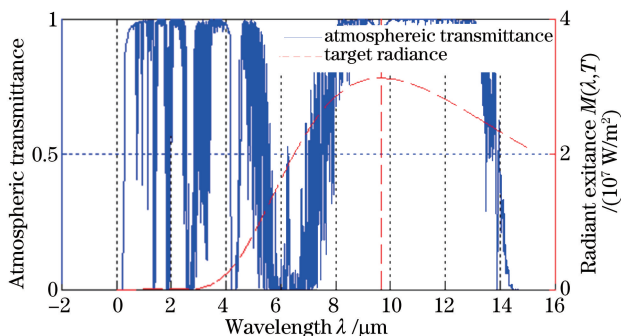


图 5 大气透射率及 300 K 目标辐射光谱曲线

Fig. 5 Atmospheric transmittance and target radiation spectrum curve at 300 K

### 3.2 全链路信噪比模型

#### 1) 大气辐射

假设大气状态相对稳定, 利用 MODTRAN 软件进行模拟计算入瞳处辐亮度, 如图 6 所示。可见, 在长波谱段, 大气散射影响很小(短划线), 而大气程辐射(点划线)在总辐射中占比较大, 不能忽略<sup>[14]</sup>。

#### 2) 光机杂散辐射

针对典型的透射式系统建立背景辐射计算模型, 假设光学系统由  $n$  个透镜组成按照光路先后到达探测



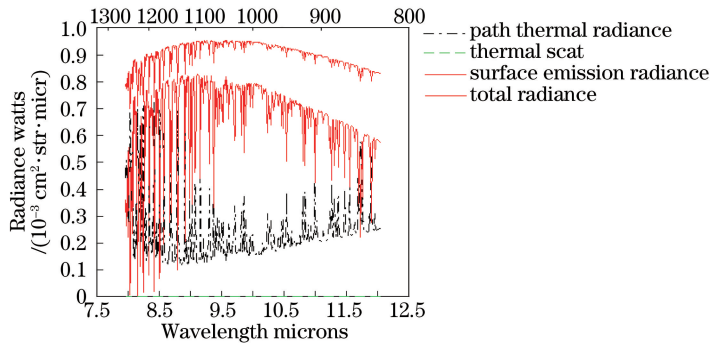


图 6 入瞳处辐亮度各分量 MODTRAN 仿真结果

Fig. 6 Simulation results of radiance components at entrance pupil by MODTRAN

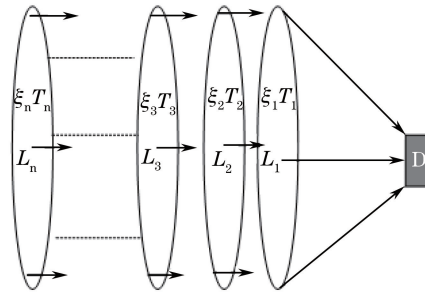


图 7 光学系统模型

Fig. 7 Model of optical system

器的顺序依次为  $L_1, L_2, L_3, \dots, L_n$ 。

设透镜  $L_1$  的发射率为  $\xi_1$ , 透射率为  $\tau_1$ , 温度  $T_1$ , 根据面辐射在微面元上辐照度基本理论, 可得  $L_1$  在探测器上的红外辐射辐照度为<sup>[15-16]</sup>:

$$E = \xi_1 \frac{M(T_1)}{4F^2} \quad (11)$$

其他透镜依次类推, 透镜  $L_i$ , 温度  $T_i$ , 发射率  $\xi_i$ , 透射率  $\tau_i, i=1, 2, \dots, n$ 。  $L_2$  产生的杂散辐射经过  $L_1$  吸收后到达像面, 所以其红外辐射将有一部分损失, 到达探测器的红外总辐射变为  $\tau_1 \xi_2 M(T_2)/4F^2$ 。同理  $L_3, L_4, \dots, L_n$  到达探测器的红外总辐射分别为  $\tau_2 \tau_1 \xi_3 M(T_3)/4F^2, \tau_3 \tau_2 \tau_1 \xi_4 M(T_4)/4F^2, \tau_{n-1} \dots \tau_3 \tau_2 \tau_1 \xi_n M(T_n)/4F^2$ 。

因此, 可以计算出所有透镜到达像面的总的红外辐射为

$$E_0 = \xi_1 M(T_1)/4F^2 + \tau_1 \xi_2 M(T_2)/4F^2 + \tau_2 \tau_1 \xi_3 M(T_3)/4F^2 + \tau_3 \tau_2 \tau_1 \xi_4 M(T_4)/4F^2 + \dots + \tau_{n-1} \dots \tau_3 \tau_2 \tau_1 \xi_n M(T_n)/4F^2 \quad (12)$$

假定所有透镜的透射率、发射率、温度等参数均相同, 则光谱辐照度分布及探测谱段内总辐照度分别为

$$E_0(\lambda) = \xi(1 + \tau + \tau^2 + \dots + \tau^{n-1}) \cdot M(\lambda) \cdot \frac{1}{4F^2} = \xi(1 + \tau + \tau^2 + \dots + \tau^{n-1}) \cdot \frac{c_1 \lambda^5}{\exp[c_2/(\lambda T)] - 1} \cdot \frac{1}{4F^2} \quad (13)$$

$$E_0 = \xi(1 + \tau + \tau^2 + \dots + \tau^{n-1}) \cdot M(T) \cdot \frac{1}{4F^2} = \xi(1 + \tau + \tau^2 + \dots + \tau^{n-1}) \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{c_1 \lambda^5}{\exp[c_2/(\lambda T)] - 1} d\lambda \cdot \frac{1}{4F^2} \quad (14)$$

当  $F=2$ , 单片透射率为 0.9 时, 5 片透射式系统, 不同探测光谱下光学系统背景辐射光谱辐照度与工作温度关系曲线如图 8(a) 所示, 由于大多数探测器都是在一个或多个谱段内工作, 因此计算某一波段内的总辐照度具有实际意义, 如图 8(b) 所示。可见光学系统工作温度升高时, 波长越长产生的背景辐射越大, 上升

速度也越快。采用低温光学技术可以有效地降低光学系统产生的背景杂散辐射,而且波长越长降低幅度越大,提升灵敏度效果越好<sup>[17]</sup>。

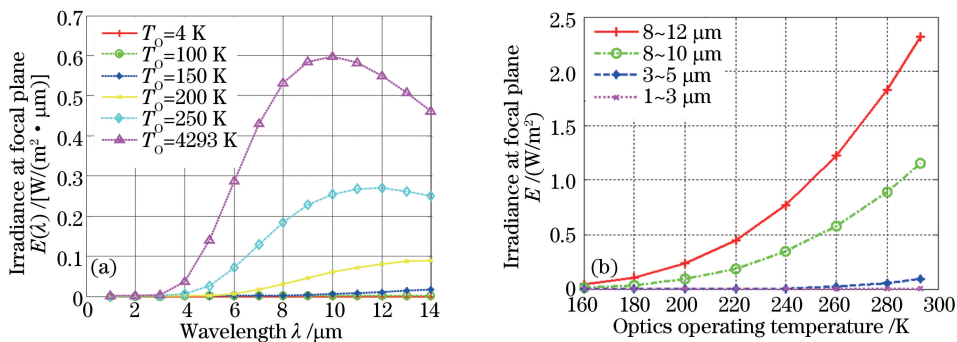


图 8 不同谱段下光学系统工作温度与焦面辐照度关系。(a)焦面光谱辐照度;(b)探测谱段内焦面辐照度

Fig. 8 Relationship between optical operating temperature and irradiance at focal plane. (a) Spectral irradiance at focal plane; (b) irradiance within detecting wavelength range

### 3) 暗电流

假定积分时间  $t_{\text{int}}$  内暗电流  $I_{\text{dark}}$  保持稳定,则利用公式可求得暗电流引入的噪声分量为

$$N_{\text{dark}}^2 = \frac{I_{\text{dark}} \times t_{\text{int}}}{q}, \quad (15)$$

式中电子电荷量  $q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ 。

### 4) 其他噪声

根据 NETD 与电荷处理量之间的关系,为满足设计需求,假定电荷处理量为  $1 \text{ Ge}^-$ ,选取计数器有效位数为 18 bits,则由(6)式得  $C_{\text{int}}$  的值近似为  $10 \text{ fF}$ ,  $Q_c$  为  $62500 \text{ e}^-$ 。将参数代入(9)式进行量化噪声、比较器噪声等分量计算。

### 3.3 仿真结果分析

各噪声分量计算结果如表 1 所示,其中,信号产生的光子散粒噪声为  $51039 \text{ e}^-$ ,大气程辐射铲射的散粒噪声为  $35313 \text{ e}^-$ ,光机辐射产生的散粒噪声为  $41806 \text{ e}^-$ ,由探测器暗电流产生的噪声为  $13693 \text{ e}^-$ ,信号 A/D 量化产生的量化噪声为  $18042 \text{ e}^-$ ,读出电路比较器噪声为  $4047 \text{ e}^-$ ,复位噪声为  $9210 \text{ e}^-$ ,可得成像全链路总噪声电子数为  $\sigma_{\text{total}} = 77631 \text{ e}^-$ ,散粒噪声和量化噪声在各噪声分量中占比较大。信噪比  $R_{\text{SN}} = 90.5 \text{ dB}$ ;NETD 优于  $5 \text{ mK}$ ,满足设计指标要求。为进一步提高探测灵敏度,可从散粒噪声各分量的抑制、量化噪声的降低等方面开展后续研究。

表 1 各噪声分量等效电子数

Table 1 Numbers of equivalent electron of each noise component

Components of noise	Signal-shot noise	Atmosphere-shot noise	Optics-shot noise	Dark current	Quantizing noise	Comparator noise	Reset noise	Total noise
Number of electrons / $\text{e}^-$	51039	35313	41806	13693	18042	4047	9210	77631

## 4 结 论

仿真分析结果表明,像素级数字积分红外成像技术能够实现长积分时间、大动态范围和高灵敏度探测,突破了传统技术电荷处理能力的限制,使长波红外系统实现千兆量级电荷处理能力和毫开量级的探测灵敏度。基于像素级数字积分探测体制红外系统的设计实例,进行了关键参数的设计、噪声模型的建立以及探测灵敏度的分析仿真,验证了该体制是提高系统探测灵敏度的有效途径。对于高灵敏度红外成像系统,在实际工程应用中,还需综合考虑光机热稳定性、非均匀性<sup>[18]</sup>等对探测灵敏度的衰减影响,项目组后续将对此进一步展开研究。

## 参 考 文 献

- 1 Chen Zhongjian, Li Xiaoyong, Ji Lijiu, *et al.* A novel low power  $64 \times 64$  CMOS snapshot readout structure for focal plane array[J]. Chinese Journal of Semiconductors, 2001, 22(11): 1450-1457.  
陈中建, 李晓勇, 吉利久, 等. 低功耗  $64 \times 64$  CMOS 快照模式焦平面读出电路新结构[J]. 半导体学报, 2001, 22(11): 1450-1457.
- 2 Li Piding, Li Yumin, Fu Yutian, *et al.* Effect of oversample-superpositon on MTF for long wave infrared camera[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2006, 25(1): 13-16.  
李丕丁, 李玉敏, 傅雨田, 等. 长波红外相机多次采样叠加对 MTF 的影响分析[J]. 红外与毫米波学报, 2006, 25(1): 13-16.
- 3 Li Yu, Bai Piji, Wang Bo, *et al.*  $384 \times 288$  focal plane ROIC with pixel accumulation[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(11): 2110-2113.  
李煜, 白丕绩, 王博, 等. 具有像素累积功能的  $384 \times 288$  焦平面读出电路[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(11): 2110-2113.
- 4 Chen Boliang. Development state of IRFPA imaging device[J]. Infrared and Laser Engineering, 2005, 34(1): 1-7.  
陈伯良. 红外焦平面成像器件发展现状[J]. 红外与激光工程, 2005, 34(1): 1-7.
- 5 Zeng Gehong. Principles of infrared systems' NEDT and theoretical calculations[J]. Infrared Technology, 2012, 34(2): 63-67.  
曾戈虹. 红外系统噪声等效温差机理分析与实例计算[J]. 红外技术, 2012, 34(2): 63-67.
- 6 Wang Yifeng, Tan Ji. On the noise equivalent temperature difference of infrared detection system[J]. Infrared, 2014, 35(6): 1-9.  
王忆锋, 谈骥. 论红外探测系统的噪声等效温差[J]. 红外, 2014, 35(6): 1-9.
- 7 Bai Tingzhu, Jin Weiqi. Principle and technology of photoelectric imaging[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2006: 54-64.  
白廷柱, 金伟其. 光电成像原理与技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2006: 54-64.
- 8 Tan Heping, Xia Xinlin, Liu Linhua, *et al.* Numerical calculation of infrared radiation and transmission-calculation of thermal radiation[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2006: 11-12.  
谈和平, 夏新林, 刘林华, 等. 红外辐射特性与传输的数值计算: 计算热辐射学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2006: 11-12.
- 9 Guellec F, Peizerat A, Tchagaspanian M, *et al.* A  $25 \mu\text{m}$  pitch LWIR focal plane array with pixel-level 15 bit ADC providing high well capacity and targeting 2mK NETD[J]. SPIE, 2010, 7660: 76603T.
- 10 Bisotto S, Borniol E, Mollard L, *et al.* A  $25 \mu\text{m}$  pitch staring LWIR focal plane array with pixel-level 15 bit ADC ROIC achieving 2 mK NETD[J]. SPIE, 2010, 7834: 78340J.
- 11 Tyrrell B, Berger R, Colonero C, *et al.* Design approaches for digitally dominated active pixel sensors: Leveraging Moore's Law scaling in focal plane readout design[J]. SPIE, 2008, 6900: 6900W.
- 12 Kelly M, Berger R, Colonero C, *et al.* Design and testing of an all-digital readout integrated circuit for infrared focal plane arrays[J]. SPIE, 2005, 5902: 105-115.
- 13 Kayahan H, Yazici M, Ceylan Ö, *et al.* A new digital readout integrated circuit (DROIC) with pixel parallel AD conversion and reduced quantization noise[J]. Infrared Physics & Technology, 2013, 63: 125-132.
- 14 Shi Bo, Li Rui, Liu Chunsheng, *et al.* Research on earth's atmosphere limb background infrared radiation characteristic [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(12): 120101.  
史波, 李瑞, 刘纯胜, 等. 地球大气临边背景红外辐射特性研究[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(12): 120101.
- 15 Li Chunlai, Wu Gang, Liu Yinnian, *et al.* Study of cryogenic optics system's radiation characteristic [J]. Laser & Infrared, 2006, 36(12): 1146-1148.  
李春来, 吴刚, 刘银年, 等. 低温光学系统辐射特性研究[J]. 激光与红外, 2006, 36(12): 1146-1148.
- 16 Wu Limin, Zhou Feng, Wang Huaiyi. Study on the relationship between the infrared detectors background limit detectivity and the optical systems work temperature[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2010, 31(1): 36-41.  
吴立民, 周峰, 王怀义. 红外探测器比探测率与光学系统工作温度关系研究[J]. 航天返回与遥感, 2010, 31(1): 36-41.
- 17 Lu Haiping, Yuan Xiangyan, Zhang Kaiyuan. Infrared background radiation removing design and simulation of antarctic survey telescope[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(11): 1122002.  
卢海平, 袁祥岩, 张凯元. 南极红外巡天望远镜红外背景辐射抑制方法[J]. 光学学报, 2014, 34(11): 1122002.
- 18 Wang Yingrui. Influence of non-uniformity of IRFPA responsibility on system sensitivity [J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(3): 258-261.  
王英瑞. 红外探测器响应非均匀性对系统灵敏度的影响[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(3): 258-261.