

文章编号:1001-9014(2004)04-0246-05

热释电型非制冷焦平面热像仪调制斩波器的分析 ——斩波器的曝光效率

何玉青, 金伟其, 高稚允, 刘广荣, 王霞
(北京理工大学光电工程系, 北京 100081)

摘要:对阿基米德螺旋线调制斩波器的曝光效率进行了理论分析和数值模拟,得到斩波器曝光效率对后续信号处理的影响。曝光效率直接影响后续探测器单元的曝光时间及入射辐射信号,与探测器信号读出时刻共同影响探测器有效积累电荷的均匀性;同时应在斩波器中增加调制同步定位点,可使热像仪适宜不同曝光效率的斩波器。在热成像系统设计以及电子处理系统设计时,必须综合考虑斩波器曝光效率的影响。

关键词:非制冷焦平面热像仪;调制斩波器;阿基米德螺旋线;曝光效率
中图分类号:TN216 **文献标识码:**A

ANALYSIS OF MODULATING CHOPPER USED IN PYROELECTRIC UNCOOLED FPA THERMAL IMAGER ——CHOPPER'S EXPOSURE EFFICIENCY

HE Yu-Qing, JIN Wei-Qi, GAO Zhi-Yun, LIU Guang-Rong, WANG Xia
(Department of Optical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract:The archimedes spiral cord modulating chopper's exposure efficiency was theoretically analyzed and numerical simulated, and its impact on the following signal processing was obtained. Results show that chopper's exposure efficiency directly affects detector pixels' exposure time and incident radiation, and affects the detector pixels' effective accumulated charge's uniformity with detector's signal readout time coordinately. Modulating synchronization locating point should be added in the chopper, which can make thermal imager be compatible with different exposure efficiency chopper. The effect of the chopper's exposure efficiency should be synthetically considered when the whole thermal imaging system and its electronic processing system are designed.

Key words:uncooled FPA thermal imager; modulating chopper; Archimedes spiral cord; exposure efficiency

引言

基于热释电型焦平面探测器的非制冷热成像技术采用调制斩波技术,取消了一代热成像系统的复杂光机扫描结构,使得系统结构简单轻便,且由于工作于室温,不需附带特殊的制冷器,在军用和民用领域得到了广泛应用^[1]。

调制斩波器技术是热释电型热成像系统的关键技术之一^[2],完成对入射到探测器上的辐射进行调制。热释电型非制冷焦平面热成像系统采用了新型阿基米德螺旋线调制斩波器,可以实现低噪声、低功

耗的平稳斩波。由于阿基米德螺旋线斩波器周期性地开启/遮挡入射辐射,因此,在一个周期中开启时间占调制周期的比例——曝光效率不仅影响焦平面探测器上所接受的辐射信号,而且对后续信号处理模式也将产生影响。本文通过理论分析和数值模拟,研究设计了符合系统要求的斩波器参数的方法。

1 阿基米德螺旋线斩波器形状及工作原理

阿基米德螺旋线斩波器分为透辐射与不透辐射区域(如图1所示),透辐射区域由两条参数相关的阿基米德螺旋线与弧线共同围成,其它区域则用不

收稿日期:2003-03-24,修回日期:2003-10-08

基金项目:863计划308主题资助项目(863-308-16-2(4))

作者简介:何玉青(1977-),女,河北无极人,博士,主要从事红外成像方面的研究。

Received date: 2003-03-24, revised date: 2003-10-08

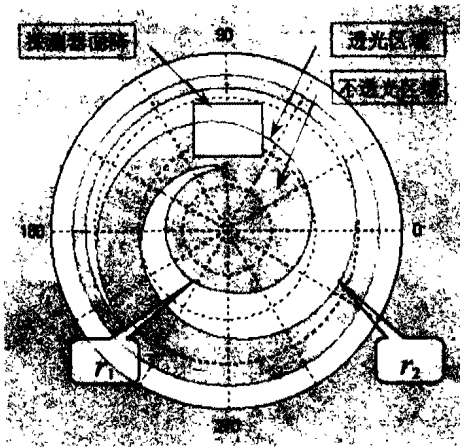


图1 斩波器形状示意图
Fig.1 Simulation figure of chopper

透辐射的材料制成或膜层镀制。焦平面探测器放置于斩波器后面,对应斩波器透辐射区域的探测器接受外场辐射,而被斩波器不透辐射区域部分则遮挡外场辐射。

通过理论和模拟分析,阿基米德斩波器的内外边分别可表示为

$$r_1(t) = \begin{cases} r_0 & 0 < \Delta\theta(t) < \theta_0 \\ r_0 + \frac{(r_m - r_0)}{\theta_m - \theta_0} [\Delta\theta(t) - \theta_0], & \theta_0 < \Delta\theta(t) < \theta_m \end{cases} \quad \text{斩波器内边 (1)}$$

$$r_2(t) = \begin{cases} r_0 + \frac{(r_m - r_0)}{\theta_m - \theta_0} \Delta\theta(t) & 0 < \Delta\theta(t) < \theta_m - \theta_0 \\ r_m & \theta_m - \theta_0 < \Delta\theta(t) < \theta_m \end{cases} \quad \text{斩波器外边 (2)}$$

$$\Delta\theta(t) = \theta - (\omega t - \theta_a). \quad (3)$$

其中, \$\theta\$ 为极坐标转角,逆时针为正; \$\omega\$ 为斩波器的转速; \$\theta_a\$ 为斩波器的初始角度,在图1状态 \$\theta_a = \pi/2\$; \$\theta_0\$ 为斩波器特征角度(常数),对50%曝光效率的斩波器 \$\theta_0 = \pi\$; \$\theta_m\$ 为斩波器的最大角度; \$r_0\$ 和 \$r_m\$ 分别为阿基米德斩波器透辐射区域的最小和最大半径。

斩波器按顺时针方向匀速旋转,在一个周期内完成对探测器面阵的推扫,使探测器上各像元分时完成连续曝光^[5]。通过分析斩波器工作状态,可得到任意时刻探测器的曝光状态,分析斩波器参数对曝光效率和曝光均匀性的影响。关于对曝光均匀性影响可参阅文献[6],本文主要分析对曝光效率的影响。

2 斩波器曝光效率

按照斩波器的曝光效率定义,焦平面上某个探测器单元的曝光效率 \$w\$ 可表示为

$$w = \frac{\Delta t}{T} = \frac{t_{ef} - t_{eb}}{T}. \quad (4)$$

式(4)中,开始曝光时刻 \$t_{eb}\$ 和结束曝光时刻 \$t_{ef}\$ 分别为斩波器外圈和内圈转到探测器的时刻(图2); \$T = 2\pi/\omega\$ 为调制周期。

对于阿基米德螺斩波器,由于斩波器内外圈螺旋线具有相同的特征参数,可以证明:整个焦平面上的每个探测器均具有相同的曝光时间 \$\Delta t\$。由式(1)~式(4),可将曝光效率 \$w\$ 进一步表达为

$$w = \frac{\theta_0}{2\pi}. \quad (5)$$

即曝光效率决定于斩波器内圈圆弧部分的角度。因此,当探测器与斩波器的几何关系以及斩波器的外形尺寸确定后,可以在保持阿基米德螺旋线参数的条件下,通过改变特征角度 \$\theta_0\$ 实现不同曝光效率的斩波器。

图3给出了3种 \$w\$ 下的斩波器模拟图。由于对探测器的曝光顺序是以斩波器外圈扫过探测器的顺序为依据,即由阿基米德螺旋线部分决定,故不同 \$w\$ 的斩波器对探测器曝光顺序^[6]的影响是相同的。

3 斩波器曝光效率对探测单元信号的影响

3.1 曝光效率与探测单元温升函数的关系

对于斩波器为通/不通状态的调制,探测器在一个周期内(\$0 < u < 1\$)温升函数 \$F(u)\$ 可表为^[3]

$$F(u) = \begin{cases} A\tau \left\{ g_1 (e^{pu} - 1) + \frac{1}{e^p - 1} M_1 \right\} e^{-pu} & , 0 \leq u < w \\ A\tau \left\{ g_1 (e^{pw} - 1) + g_2 (e^{pu} - e^{pw}) + \frac{1}{e^p - 1} \right\} e^{-pu} & , w \leq u < 1 \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中 \$M_1 = g_1 (e^{pw} - 1) + g_2 (e^p - e^{pw})\$; \$A\$ 为与探测器性能有关的常数; \$p = T/\tau\$, \$\tau\$ 为探测器的热时间常数, \$g_1\$ 和 \$g_2\$ 分别为斩波器开启和关闭时的红外辐射。

图4给出了不同入射辐射条件下探测器的温升曲线(\$p = 2.67, w = 0.5, g_2 = 1\$)。图5给出不同曝光

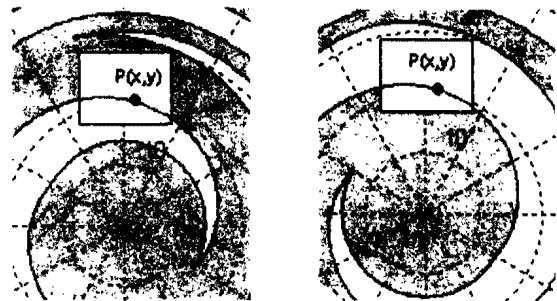


图2 像元开始与结束曝光时刻示意图
Fig.2 Schematic time that pixel's exposure begins and finishes

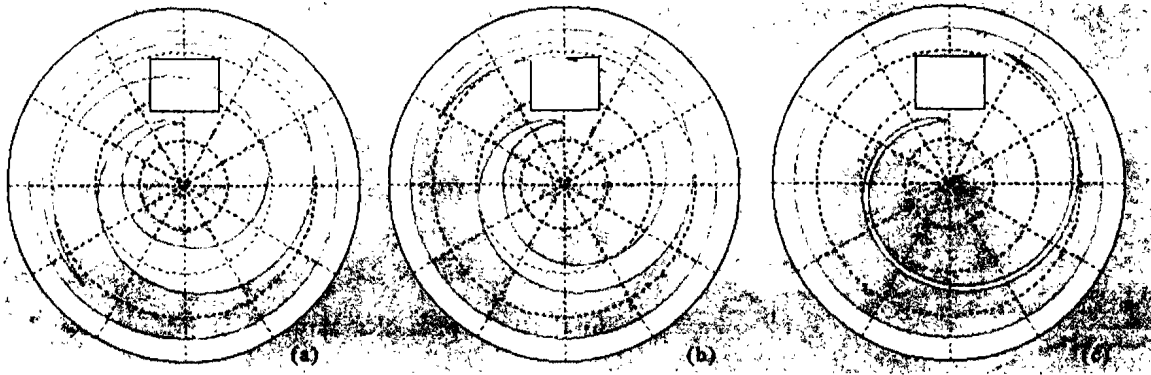


图3 50%、30%和6%曝光效率的斩波器模拟图 (a)50% (b)30% (c)60%
Fig.3 Chopper figures with different exposure efficiency (a)50% (b)30% (c)60%

效率 w 条件下探测器的温升曲线 ($p = 2.67, g_1 = 30, g_2 = 1$). 可以看出: $F(w)$ 时达到峰值, 由于信号电荷与温升函数成正比, 故利用式(6)可进一步分析 w 对信号电荷积累的影响.

3.2 曝光效率对探测单元有效温升的影响

根据式(6), 探测器单元的基底温升 $F(0)$ 或 $F(1)$ 以及峰值温升 $F(w)$ 分别为

$$F(0) = A\tau \frac{M_1}{e^p - 1} = A\tau \left\{ g_1 \frac{e^{pw} - 1}{e^p - 1} + g_2 \frac{e^p - e^{pw}}{e^p - 1} \right\} = F(1), \quad (7)$$

$$F(w) = A\tau \left\{ g_1 (e^{pw} - 1) + \frac{M_1}{e^p - 1} \right\} e^{-pw} \\ = A\tau \left\{ g_1 \frac{e^p - e^{p(1-w)}}{e^p - 1} + g_2 \frac{e^{p(1-w)} - 1}{e^p - 1} \right\}, \quad (8)$$

于是, 有效温升 $\Delta F(w)$ 为

$$\Delta F(w) = F(w) - F(1) = F(w) - F(0) \\ = A\tau (g_1 - g_2) \frac{(e^{pw} - 1)(e^{p(1-w)} - 1)}{e^p - 1}, \quad (9)$$

图6给出有效温升 $\Delta F(w)$ 随 w 的改变曲线. 可以看出: 虽然 $F(w)$ 随 w 而增大, 但由于 $F(0)$ 也同时增大且后期增加更快, 因此, 探测器单元的 $\Delta F(w)$ 信号并不随 w 单调上升, 在 $w = 0.5$ 处 $\Delta F(w)$ 达到最大峰值, 即曝光效率 50% 附近探测器

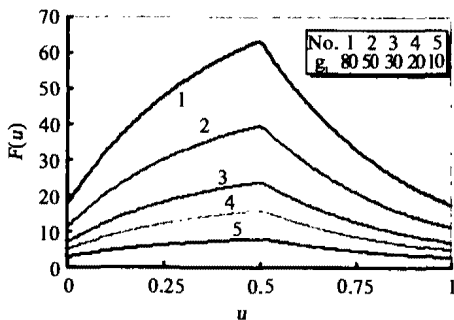


图4 不同入射辐射时探测器温升曲线
Fig.4 Pixel's temperature rising under different incident radiation

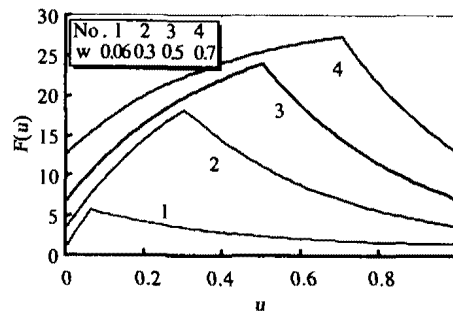


图5 不同曝光效率探测器温升函数
Fig.5 Pixel's temperature rising under different exposure efficiency

的信号电荷达到最大值. 这表明: 对于一般用于微弱热图像信号探测与成像的系统应以此为最佳设计点.

在诸如强激光光束检测等特殊试验中, 由于长时间接受高功率辐射能量或功率, 可能使探测器饱和, 甚至损害探测器像元, 因此, 需要减低入射的辐射能量/功率. 与通常在光路中加入衰减片的方式不同, 由于斩波器的曝光效率直接影响探测器单元接受入射辐射的时间, 因此, 热电型焦平面探测器可通过低曝光效率的斩波器有效地降低探测器等效灵敏度, 使系统能够在高辐射条件下工作, 避免衰减片在高辐射条件下的非线性效应对光束的影响. 表1给出理想条件下, 不同曝光效率斩波器对应探测器单元峰值温升的情况 ($p = 2.67, g_1 = 30, g_2 = 1$).

以美国 EP 公司 PV-320 热像仪为例, 对于 $10.6\mu\text{m}$ 波长的入射辐射, 在采用 50% 斩波器时对应的最大功率密度不超过 $0.25\text{W}/\text{cm}^2$, 而采用 6% 斩波器时不应超过 $5\text{W}/\text{cm}^2$.

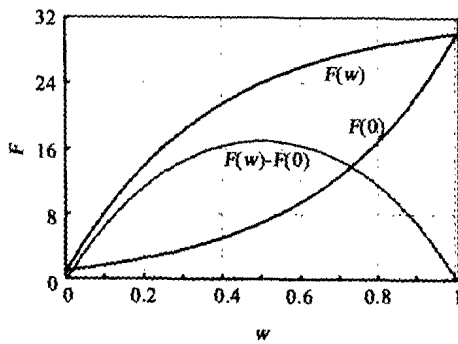


图6 不同w下探测器的温升变化曲线
Fig. 6 Change of relative temperature rising under different w

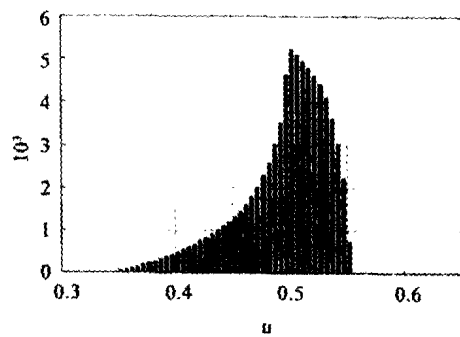


图8 不同信号读出时刻像元个数统计
Fig. 8 Pixel numbers versus signal read-out time

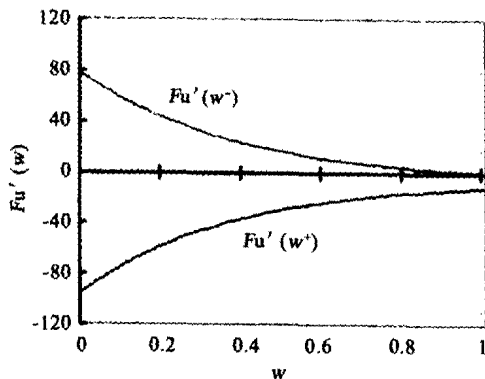


图7 斩波器关闭时刻前后温升函数变化速度
Fig. 7 Temperature changing rate around chopper's close

$$\frac{\partial F(u)}{\partial u} \Big|_{u=w^+} = A\tau \left\{ -pg_1(e^{pw} - 1) + pg_2e^{pw} - \frac{P}{e^p - 1}M_1 \right\} e^{-pu} \quad (9)$$

图7给出温升函数的导数随w的变化曲线,可以看出:对于一定的w,斩波器关闭前温升变化速度总是较关闭后快。

由于热释电焦平面探测器采用CMOS读出电路,信号读出可以采用连续式或跳跃式寻址两种模式^[6].连续寻址读出模式从探测器某一角作为起始点,按照整个阵列顺序逐行扫描读出像元信号;跳跃式寻址读出模式按照指定的顺序读出像元信号。

在连续寻址读出模式下,在整个探测器上各单元的信号读出时刻分布不均匀(如图8),由此将进一步造成探测器各单元有效电荷的分散^[6],在后续非均匀性校正处理电路中,需要有针对性地对这种信号的非均匀性进行校正.对于采用不同曝光效率斩波器的热成像系统,图9给出了这几种模式下探测器面上有效电荷分布不均匀性示意图。

对于跳跃寻址读出模式,可按照探测器的曝光顺序,在每一像元结束曝光时刻进行相应的电荷读取^[6],即可保证在电荷累积的峰值进行读取信号,基本消除连续寻址读出模式固有的信号非均匀性。

3.4 斩波器调制斩波的不同步

不论采用连续寻址或跳跃寻址读出模式,一旦热成像系统产品出厂,则应用中对斩波器的更换已不能影响信号的读出时刻,即应控制信号的读出位置,以获取更好的信号(适当的探测器响应以及信号的均匀性).为此,通常在斩波器上设置同步定位点,由于不同曝光效率的信号读出延时不同(如图10),因此,不同斩波器的同步定位点

表1 不同曝光效率斩波器对应探测器单元峰值温升
Table 1 Detector pixel's temperature peak value under different exposure efficiency

曝光效率 w	50%	30%	6%
电荷 F_{max}	23.9583	18.1716	5.6122
电荷 $F_{50\%}$	100%	75.9%	23.4%

探测器单元电荷读出时间偏差对有效温升函数

6) 对u求导,可得温升函数随时间变化的

$$\frac{P}{e^p - 1} M_1 \Big\} e^{-pu}, \quad 0 \leq u < w \quad (7)$$

$$pg_1(e^{pw} - 1) + pg_2e^{pw} - \frac{P}{e^p - 1} M_1 \Big\} e^{-pu}, \quad w \leq u < 1$$

函数的导数在 $u = w$ 时不连续,下面分别求 w^- 与 w^+ 处时的值

$$= A\tau \left\{ pg_1 + \frac{P}{e^p - 1} M_1 \right\} e^{-pw}, \quad (8)$$

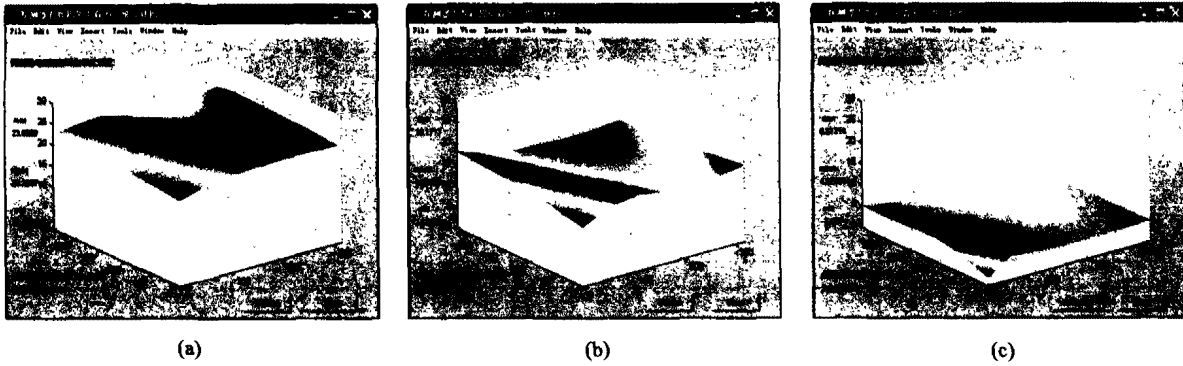


图9 不同曝光效率斩波器的探测器面上有效电荷分布(a)50% (b)30% (c)60%
 Fig.9 Effectual accumulated charge of detectors with choppers under different w (a)50% (b)30% (c)60%

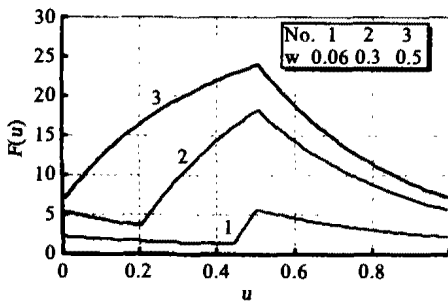


图10 读出时刻相同时的温升曲线
 Fig.10 Pixel's temperature rising with same readout time under different w

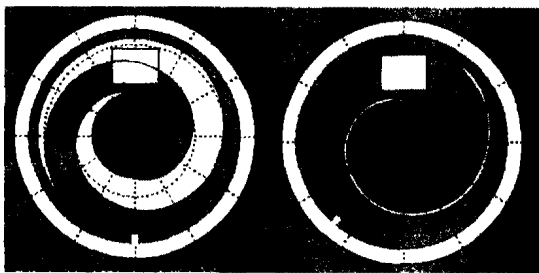


图11 不同曝光效率的斩波器定位点位置(a)50% (b)60%
 Fig.11 Locating point position of choppers with different exposure efficiency (a)50% (b)60%

4 结论

通过对阿基米德螺旋线斩波器的曝光效率及其对系统的影响分析,可得如下结论:

- 1) 斩波器的曝光效率不影响探测器单元的曝光顺序及后续的信号电荷读出顺序;
- 2) 斩波器的曝光效率影响探测器单元的曝光时间,最佳曝光效率为 50%. 在一些大功率的测试实验中,可通过选择低曝光效率斩波器控制入射辐射能量的接收量,起到扩大热像仪动态范围的效果;
- 3) 在连续寻址读出模式下,曝光效率与实际信

号读出时刻共同影响整个探测器有效电荷量分布的均匀性,形成固有非均匀图案,增加非均匀性校正电路的复杂性;

4) 斩波器的曝光效率与调制同步定位点配合,可使热成像系统适宜各种曝光效率的斩波器.

在实际热释电非制冷焦平面热成像系统的设计中,应结合探测器、斩波器的尺寸及其相对几何位置关系、非均匀性处理电路等,对阿基米德螺旋线斩波器的各项参数选择和设计.

REFERENCES

- [1] ZHANG Jing-Xian, LI Yu-Dan, JIN Wei-Qi. *Low Light Level and Infrared Imaging Technology* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press (张敬贤,李玉丹,金伟其. 微光与红外成像技术. 北京:北京理工大学出版社), 1995, 9.
- [2] HE Yu-Qing, JIN Wei-Qi, LIU Guang-Rong, et al. The modulating chopper used in the pyroelectric thermal imaging system[J]. *Infrared Technology* (何玉青,金伟其,刘广荣,等. 热释电型热成像系统的调制斩波器技术. 红外技术), 2002, 24(5): 5—9.
- [3] JIN Wei-Qi, LIU Guang-Rong, GAO Zhi-Yun. Theory of dual bands thermal images realized by uncooled pyroelectric focal plane array detector[J]. *ACTA Electronica Sinica* (金伟其,刘广荣,高雅允. 非制冷焦平面红外探测器的双波段成像理论. 电子学报), 2000, 28(5): 29—32.
- [4] JIN Wei-Qi, LIU Guang-Rong, HE Yu-Qing, et al. Theory of realizing dual band thermal imaging with pyroelectric focal plane array detector[J]. *SPIE*, 2000, 4077: 203—207.
- [5] HE Yu-Qing, JIN Wei-Qi, LIU Guang-Rong, et al. The Modulate chopper technique used in pyroelectric uncooled focal plane array thermal imager [J]. *SPIE*, 2002, 4919: 283—288.
- [6] HE Yu-Qing, JIN Wei-Qi, GAO Zhi-Yun, et al. Analysis of modulating chopper used in pyroelectric uncooled FPA thermal imager—chopper and detector pixels' signal peadout Mode[J]. *Journal of Infrared Millim. Waves* (何玉青,金伟其,高雅允,等. 热释电型非制冷焦平面热像仪调制斩波器分析——斩波器与信号读出模式. 红外与毫米波学报), 2003, 22(6): 423—427.