

热释电型非制冷焦平面热像仪调制斩波器的分析 ——斩波器与信号读出模式*

何玉青 金伟其 高雅允 刘广荣 王霞

(北京理工大学光电工程系,北京,100081)

摘要 对阿基米德斩波器及其工作状态进行了模拟,分析了探测器像元的曝光时间、曝光顺序、信号读出及其对后续信号均匀性处理的影响.结果表明:探测器曝光的非均匀性与信号读出模式直接影响后续信号的均匀性处理,阿基米德螺旋线的参数、探测器几何尺寸、斩波器与探测器的相对位置等均影响探测器的曝光顺序和电荷均匀性.在热成像系统总体设计以及电子处理系统设计时,必须综合考虑斩波器各参数的影响.

关键词 热释电,非制冷焦平面探测器,调制斩波器,阿基米德螺旋线.

ANALYSIS OF MODULATING CHOPPER USED IN PYROELECTRIC UNCOOLED FPA THERMAL IMAGER ——CHOPPER AND DETECTOR PIXELS' SIGNAL READOUT MODE*

HE Yu-Qing JIN Wei-Qi GAO Ya-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 figure and its working states were simulated. The detector pixels' exposure time, exposal sequence, signal read-out mode and its impact on the following signal uniformity processing were analyzed. Result shows that the detector's exposure non-uniformity and the signal readout mode directly affect the following signal's uniformity processing; the parameter of Archimedes spiral cord, the detector's geometrical dimension, the relative position between the chopper and the detector will affect the detector's exposal sequence and uniformity. We should synthetically consider the effect of the chopper's parameters when designing the whole thermal imaging system and electronic processing system.

Key words pyroelectric, uncooled FPA detector, modulating chopper, archimedes spiral cord.

引言

非制冷型热成像技术取消了光机扫描机构,虽然热灵敏度不及光电探测器,但由于接近场频周期的凝视积分,显著改善系统的信号响应,使其热灵敏度已接近传统制冷型一代热成像系统水平,加之廉价、轻巧、室温使用、可靠性和电视兼容的优点,使其在军用和民用领域均获得了广泛应用^[1].

热释电型焦平面探测器是非制冷热像仪的主要模式之一^[1],由于热释电效应要求变化的入射辐

射,系统通常由光学系统、辐射调制器、热释电焦平面探测器和信号处理电路等组成(如图1所示).辐射调制器有平移调制与斩波调制2种方式^[2],对于凝视型成像一般采用斩波调制方式.

热释电型非制冷焦平面热成像系统采用了新型的阿基米德螺旋线圆盘斩波器^[5],例如美国德州仪器TI公司在红外透明材料上镀阿基米德螺旋线红外增透膜的斩波器(图2)与美国电子物理EP公司采用薄铝片上掏制的阿基米德螺旋线的斩波器(图3).由于斩波器的转动惯量较小,可实现低噪声、低

* 863 计划 308 主题(批准号 863-308-16-2(4))资助项目
稿件收到日期 2002-12-04,修改稿收到日期 2003-06-26

* The project supported by The National High-tech. R&D Program (No. 863-308-16-2(4))
Received 2002-12-04, revised 2003-06-26

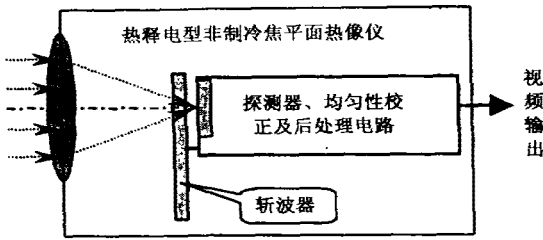


图1 热释电型热成像系统的结构示意图
Fig. 1 Structure of pyroelectric thermal imaging system

功耗的平稳斩波。

由于斩波器直接影响热成像系统的性能,本文将对阿基米德螺旋线斩波器技术的模拟分析,研究斩波器的实现方式和特点,寻找科学合理的设计调制斩波器的方法。

1 阿基米德螺旋线斩波器的模拟分析

1.1 斩波器形状及工作原理

斩波器透光区域由二条参数相关的阿基米德螺旋线与弧线共同围成,其它区域则用不透光的材料制成(如图4所示),红外焦平面探测器放置于斩波器后面,对应斩波器透光区域的部分接受外场辐射,而被斩波器不透光区遮挡部分则不接受外场辐射。

通过理论和模拟分析,可将阿基米德斩波器的内外边分别表示为

$$r_1(t) = \begin{cases} r_0 & 0 < \Delta\theta(t) < \theta_0 \\ r_0 + \frac{(r_m - r_0)}{\theta_m - \theta_0} [\Delta\theta(t) - \theta_0], & \theta_0 < \Delta\theta(t) < \theta_m \end{cases}$$

斩波器内边 (1)

$$r_2(t) = \begin{cases} r_0 + \frac{(r_m - r_0)}{\theta_m - \theta_0} \Delta\theta(t) & 0 < \Delta\theta(t) < \theta_m - \theta_0 \\ r_m, & \theta_m - \theta_0 < \Delta\theta(t) < \theta_m \end{cases}$$

斩波器外边 (2)

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

其中, θ 为极坐标的转角,逆时针为正; ω 为斩波器的转速; θ_a 为斩波器的初始角度,在图4状态, $\theta_a = \pi/2$; θ_0 为斩波器特征角度常数,对50%曝光效率的斩波器 $\theta_0 = \pi$; θ_m 为斩波器的最大角度值; r_0 和 r_m 分别为阿基米德斩波器透光区域的最小和最大半径。这些参数的选择将影响斩波器的曝光效率和曝光均匀性。

斩波器按顺时针匀速旋转,通过分析斩波器工作状态可知任意时刻探测器的曝光状态(图5为斩波器分别旋转 0° 、 90° 、 180° 和 270° 的4个典型工作状态),随着斩波器的旋转,在一个周期内完成对探测

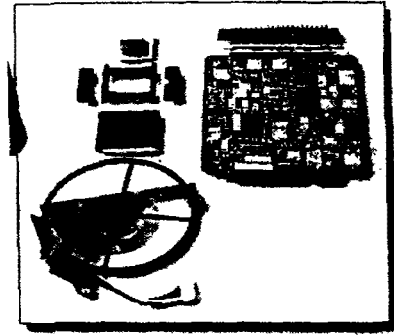


图2 TI公司的阿基米德螺旋线斩波器
Fig. 2 Archimedes spiral cord chopper of TI

器面阵的推扫,使探测器上各像元分时完成连续的均匀曝光^[6]。

1.2 探测器像元曝光顺序

阿基米德螺旋线使斩波器扫过探测器的顺序偏离了以往常用的自左向右、从下至上的扫描顺序。在斩波器转动周期内,斩波器外圈扫过探测器像素并使其开始曝光,若以探测器下端第一个像素开始曝光的时刻为时间起点,则按像素曝光时刻进行自小到大的顺序排列(对于具有相同时刻的不同像素,按自左向右、从下至上的顺序确定),可以得到探测器像元的曝光顺序。

以TI公司 320×240 元BST非制冷焦平面探测器及其50%斩波效率的斩波器为例,像元尺寸 $48.5 \times 48.5 \mu\text{m}^2$ 。从图6模拟计算的探测器像元的曝光顺序图可以看出:斩波器使探测器曝光的顺序并不是按像素行列进行,在同一行像素中,一般是中间位置先曝光,两边位置落后于中间。

1.3 探测器像元的曝光时间

探测器像元开始曝光时刻 t_{sb} 为斩波器外圈转到像元时刻,结束曝光时刻 t_{sf} 为斩波器内圈转到像元时刻(图7)。对于阿基米德螺旋线斩波器,由于斩波

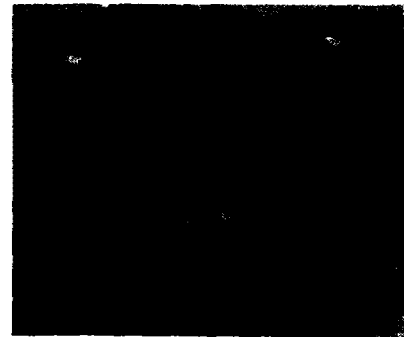


图3 EP公司的阿基米德螺旋线斩波器
Fig. 3 Archimedes spiral cord chopper of EP

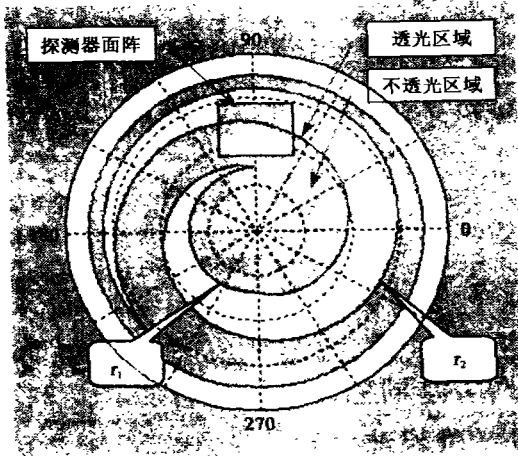


图4 斩波器形状示意图
Fig.4 Simulation figure of chopper

器内外圈阿基米德螺线参数相同,故整个探测器上每个像元的曝光时间 Δt 均相同,且曝光时间 Δt 可表示为

$$\Delta t = t_{ef} - t_{eb} = \frac{\theta_0}{2\pi} \times T = wT. \quad (4)$$

其中, $T = 2\pi/\omega$ 是斩波器旋转的周期(场周期)。 w 为斩波器的曝光效率,即斩波器开启的相位占整个圆周的比例。对于式(1)和式(2)式确定的内外圈具有相同参数的阿基米德螺旋线斩波器,探测器上任一像元均具有相同的曝光时间或曝光效率。

2 探测器像元有效积累电荷的计算

对于斩波器为通/不通 2 种状态的调制,探测器像元在一个周期 T 内 ($0 < u = t/T < 1$) 温升函数 $F(u)$ 表达式为^[3]

$$F(u) = \begin{cases} A\tau \{g_1(e^{pu} - 1) + \frac{1}{e^p - 1} M_1 | e^{-pu}\} & 0 \leq u < w \\ A\tau \{g_1(e^{pw} - 1) + g_2(e^{pu} - e^{pw}) + \frac{1}{e^p - 1} M_1 | e^{-pu}\} & w \leq u < 1 \end{cases} \quad (5)$$

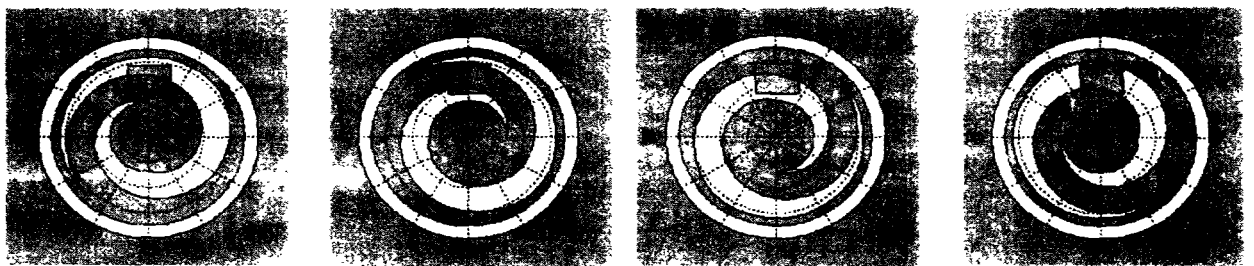


图5 阿基米德螺旋线斩波器及其4个典型工作形态(a)0°(b)90°(c)180°(d)270°
Fig.5 Four working states of Archimedes spiral cord chopper

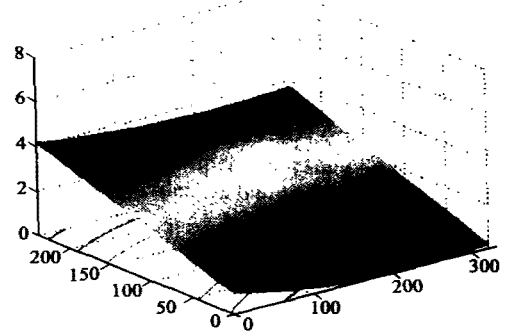


图6 整个探测器像元曝光顺序图
Fig.6 Whole detector's exposure sequence

其中, $M_1 = g_1(e^{pw} - 1) + g_2 e^{pw}(e^{p(1-w)} - 1)$, A 为与探测器有关常数, $p = T/\tau$, τ 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对应的红外辐射, w 为斩波器的曝光效率。本文主要讨论曝光效率 $w = 50\%$ 的情况,模拟计算的像元温升曲线如图8所示。

探测器像元有效积累的信号电荷决定于像元的读出时刻,并与像元温升成正比。对于阿基米德斩波器,虽然探测器上各像元曝光时间相等,但由于读出顺序的非均匀性,将影响实际读出的有效电荷数,因此,需要分析具体的信号读出方式对信号电荷及其后续的影响。

BST 热释电焦平面探测器电路采用 CMOS 读出电路^[7],信号读出有连续式与跳跃式寻址 2 种模式。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。

2.1 连续寻址读出模式

由于斩波器匀速旋转,其旋转时间与转过角度成正比,故下面的模拟分析均以斩波器顶点所转过的角度来描述,此时对应的场周期 $T = 2\pi$ 。

按照式(4), $t_{eb}(i, j)$ 表示 (i, j) 像素开始曝光时刻 ($1 \leq i \leq N, 1 \leq j \leq M$), 则

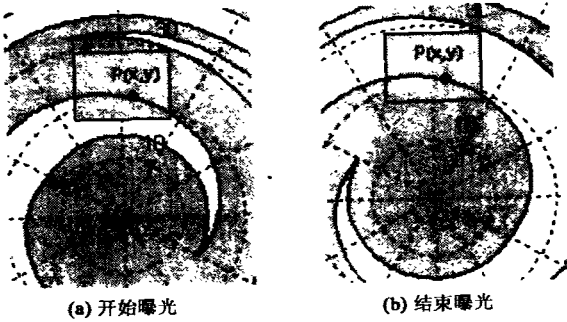


图7 像元开始与结束曝光时刻示意图
Fig. 7 The pixel's exposure begin and finish time

$$t_{eb}(i, j) = \frac{r(i, j) - a}{b} + \text{atg} \frac{n_0 - i}{r_0/dw + j} + \frac{\pi}{2} \quad (6)$$

其中, $r(i, j)$ 为 (i, j) 点像素在以与斩波器中心为原点的极坐标矢径, a, b 为斩波器的阿基米德螺线参数, n_0 为探测器最下行像素中过斩波器中轴的像元编号, dw 为像素宽度和高度。

同理, 我们可以得到 (i, j) 像素电荷读出时刻 $t_{rf}(i, j)$ 为

$$t_{rf}(i, j) = t_{e0} + \frac{i + (j - 1) \times N}{M \times N} \times t_u \quad (7)$$

其中, t_{e0} 为探测器第 $(N, 1)$ 像素的信号读出时刻, t_u 为像素电荷读出延迟时间, 即探测器最后一点(左上角)开始曝光时刻 t_e 与右下角开始曝光时刻 t_b 之差, 对本例情况, t_u 约为 0.6264T。

于是, 可以得到一个周期内 (i, j) 像素的有效电荷积累时间 $u(i, j)$

$$u(i, j) = t_{rf}(i, j) - t_{eb}(i, j) \quad (8)$$

由于扫描的非均匀性, 将造成 $u(i, j)$ 的某种离散分布, 从本例情况的 $u(i, j)$ 分布统计图(图9)可知。

$u(i, j)$ 并非集中在曝光结束时刻 ($u = 0.5$), 且在 0.5 时刻附近的分布不均匀;

探测器有效曝光时间的变化将进一步造成有效

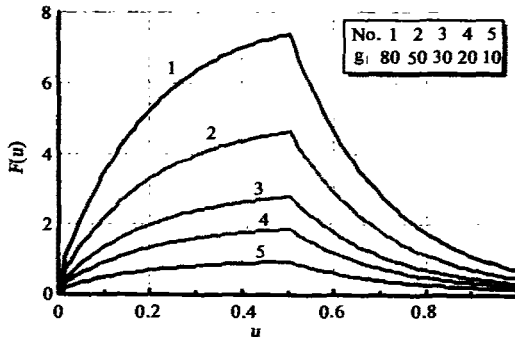


图8 不同入射辐射像元升温曲线 $w = 0.5$
Fig. 8 Pixel's temperature rising under different incident radiation ($w = 0.5$)

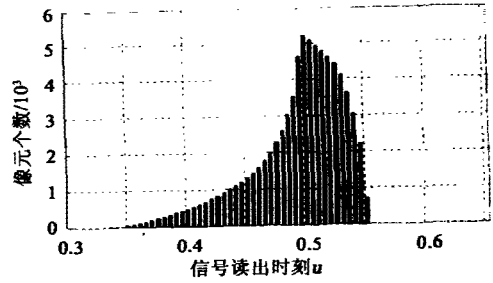


图9 不同信号读出时刻像元个数统计
Fig. 9 Pixel numbers versus signal read-out time

电荷积累量的分散(参照图8), 图10和图11分别给出读出时间适当延时 Δt 后 $F(i, j)$ 的相对 F_{max} 的最小值、平均值以及均方根值曲线, 可以看出: 探测器电荷存在最大值约 12.7 ~ 18.1%, 均方根值约 2.6 ~ 3.2% ($@p = 2.67$) 的波动, 但存在一个最佳延时 Δt_m 使探测器面上信号电荷的波动 ΔF 达到最小。

对于目前 $p = 2.67$ 的技术水平, 图12给出了一种探测器面上有效电荷的分布图。

显然, 在连续寻址读出模式下, 由于信号电荷读出时刻与斩波器的曝光时间的不同步, 使探测器各像元积累的有效电荷量分布不均匀, 并进一步造成各像元输出信号电压的离散, 从而对后续均匀性校正处理形成较大的压力, 由于均匀性实时校正算法及其实施电路的复杂性以及有效性限制, 这种系统原理上的偏差 (~3%) 将大大增加均匀性校正的难度。因此, 连续读出模式对于阿基米德螺旋线斩波器不是最佳选择。

2.2 跳跃寻址读出模式

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, 因此, 探测器像元的有效电荷积分时间相同, 即

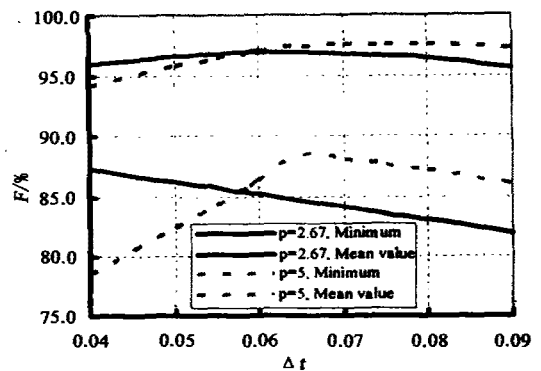


图10 随读出时间延时的信号电荷最小值与平均值
Fig. 10 Minimum and average signal charge versus different readout time delay

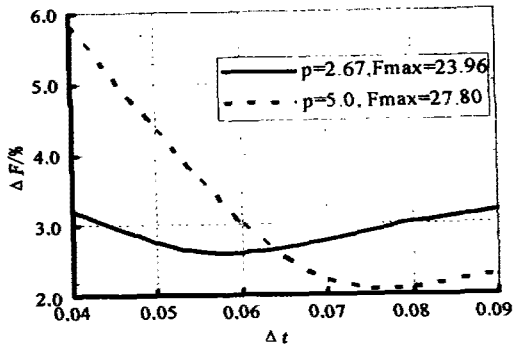


图 11 随读出时间延时的信号电荷均方根波动
Fig. 11 Standard deviation of signal charge versus different readout time delay

理论上整个探测器像元的有效积累电荷量相等. 实际上考虑到部分像素读出时间的并列, 需按排序顺序做适当的延迟, 由此造成信号积累电荷量的影响很小, 对后续均匀性校正处理几乎不增加新的压力.

为了确定跳跃式寻址读出模式的寻址顺序, 需要在斩波器设计时, 根据斩波器和探测器的尺寸, 计算出曝光顺序, 并将曝光顺序写入读出控制器, 以保证系统工作时按照指定的顺序读取像元信号.

2.3 相关参数对信号的影响

当阿基米德螺旋线的参数 (a, b)、探测器的几何尺寸 ($dw \times M, dw \times N$) 以及斩波器螺旋线与探测器的相对位置 (r_0) 发生变化时, 根据式 (6), 探测器各像元开始曝光时刻发生改变, 从而使探测器整个像元曝光顺序也发生相应的变化.

同时, 根据式 (7), 探测器像元电荷读出时刻也随之改变, 从而使探测器有效积累电荷状况发生改变, 这将会对后续信号处理 (如信号读出电路、均匀性校正等) 产生影响. 在设计阿基米德斩波器时, 需考虑其相关参数对后续信号处理系统的影响.

电荷连续读出模式

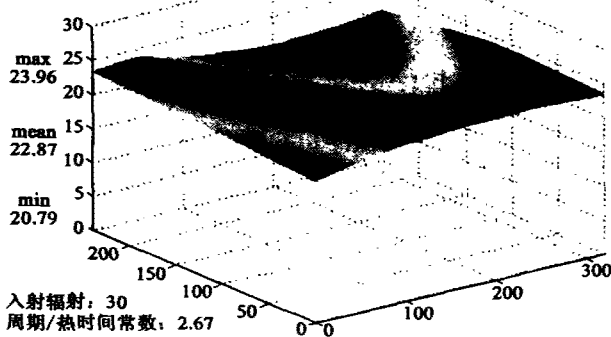


图 12 探测器像元有效积累电荷图
Fig. 12 Effectual accumulated charge of detector

3 结论

通过对阿基米德螺旋线斩波器的形状和工作状态模拟, 分析探测器像元的曝光顺序、有效曝光时间以及对后续读出信号及其均匀性处理的影响. 分析研究表明:

阿基米德螺旋线型斩波器可平稳地完成对探测器面阵的推扫, 使探测器像元均具有相同的曝光时间;

由于斩波器对探测器曝光顺序的非均匀性, 将对探测器读出的有效信号电荷产生明显的影响, 并进一步影响后续的均匀性处理, 对于目前采用连续寻址和跳跃寻址读出模式, 后者更有利于获得均匀的信号, 并减轻后续处理电路的设计压力;

阿基米德螺旋线斩波器的参数、探测器的热时间常数和几何尺寸以及斩波螺旋线与探测器的相对位置等均是系统的重要参量, 将影响探测器的曝光效率和曝光均匀性.

综上所述, 采用阿基米德螺旋线斩波器的热释电型非制冷焦平面热成像系统具有与其它类型的热像仪不同的特点, 在系统总体设计以及电子处理系统设计时, 必须综合考虑斩波器对探测器曝光顺序及积累电荷非均匀性影响, 并采取必要的处理.

REFERENCES

- [1] JIN Wei-Qi, HOU Guang-Ming, LIU Guang-Rong. Uncooled FPA thermal imaging technology and its applications. *Infrared Technology* (金伟其, 侯光明, 刘广荣. 非制冷焦平面热成像技术及其应用. *红外技术*), 1998, 21(6): 6—11
- [2] ZHANG Jing-Xian, LI Yu-Dan, JIN Wei-Qi. *Low Light Level and Infrared Imaging Technology*. 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
- [3] JIN Wei-Qi, LIU Guang-Rong, GAO Zhi-Yun. Theory of dual bands thermal images realized by uncooled pyroelectric focal plane array detector. *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. *SPIE*, 2000, 4077: 203—207
- [5] HE Yu-Qing, JIN Wei-Qi, LIU Guang-Rong, et al. The modulating chopper used in the pyroelectric thermal imaging system. *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
- [6] HE Yu-Qing, JIN Wei-Qi, LIU Guang-Rong, et al. The Modulate chopper technique used in pyroelectric uncooled focal plane array thermal imager. *SPIE*, 2002, 4919: 283—288
- [7] Beratan H, Hanson C, Meissner E G. Low-cost uncooled pyroelectric detectors. *SPIE*, 1994, 2274: 147—156