

开窗高帧频下红外面阵数字 TDI 实现方式研究

张博铭, 苏晓峰, 崔 坤, 姜 婷
(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘 要: 开窗功能是当前面阵红外探测器的一个重要功能, 该功能的一个重要特点就是可以大幅度提高探测帧频。本文从理论上论述了高帧频对面阵数字 TDI 探测系统的影响, 研究了高帧频数字 TDI 实现方式: (1) 高帧频可以增加探测器系统扫描速度的上限; (2) 在高帧频 TDI 的工作状态下更容易实现速度的匹配; (3) 在扫描列数设定较高的情况下, 高帧频数字 TDI 可以根据所开窗口像元的实际响应情况来选择 TDI 的起始列和级数, 以选择质量较高的 TDI 图像。用国产中波红外探测器搭建了红外成像平台, 进行了高帧频数字 TDI 成像实验, 验证了高帧频数字 TDI 实现方式的可行性。

关键词: 面阵; 开窗; 高帧频; 时间延迟积分

中图分类号: TN215 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2016.10.016

Research on digital TDI implementation way based on windowing and high frame rate infrared FPA

ZHANG Bo-ming, SU Xiao-feng, CUI Kun, JIANG Ting
(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: Windowing is an important function of infrared focal plane array, and it can greatly improve the frame frequency of the detection system. The influence of high frame rate on the digital TDI detection system was theoretically analyzed, then the implementation way of high frame rate digital TDI was studied. The infrared imaging system based on domestic mid-wave infrared detector was established, and the imaging experiments of high frame rate digital TDI were carried out, which verifies the feasibility of high frame rate digital TDI implementation way.

Key words: array - detector; windowing; high frame frequency; time delay integration

1 引 言

时间延迟积分 (Time Delay Integration) 技术是在空间探测中广泛应用的一项技术, 通过多列像元的并扫可以实现对同一目标的多次曝光, 等效延长对目标的积分时间, 从而提高探测系统的信噪比和灵敏度, 特别适合在入射辐射强度较低的环境和对运动目标的探测^[1-2]。基于电荷耦合 (CCD) 线列探测器的模拟 TDI 和基于焦平面阵列的片外数字 TDI 是在红外扫描成像中两种较为成熟的 TDI 实现方

式。新一代的红外焦平面探测器多具有开窗 (windowing) 功能^[3-4], 探测器开窗是指探测器读出的过程中有选择的读出探测器中部分区域的数据。美国 DRS Infrared Technologies、法国 Sofradir 等公司生产的多种型号的红外焦平面探测器都可以实现开窗功能, 并以此对输出帧频进行控制, 具体参数见表 1。

表中红外焦平面探测器开窗最小为 1 列, 最高帧频在百赫兹量级。探测器的开窗功能使面阵探测器可以实现高帧频的数字 TDI 扫描功能。

作者简介: 张博铭 (1991 -), 男, 硕士研究生, 主要从事红外面阵探测系统信息获取技术方面的研究。E-mail: zbmhit@163.com

收稿日期: 2016-02-01; **修订日期:** 2016-03-06

表 1 典型可开窗红外面阵探测器参数
Tab. 1 Parameters of typical windowing infrared detector

公司名称	DRS	DRS	Sofradir	Sofradir	Sofradir	Sofradir
波长/ μm	3.7~5.1	3.7~5.1	3.4~4.9	3.4~4.9	3.7~4.8	0.8~2.5
像元规模	640×480	1280×720	1280×720	1024×768	1280×1024	500×256
最小窗口规模	128×1	128×1	*	*	260×1	256×1
最高读出帧频/Hz	120	60	100	100	120	250

注: * 为文献中未查到该项参数值。

2 红外面阵探测系统的帧频

探测器的帧频是探测器输出帧周期的倒数,而探测器的帧周期由积分时间和读出时间决定。焦平面探测器有两种不同的读出模式,分别是边积分边读出(IWR)模式和积分后读出(ITR)模式,这两种不同读出模式的帧周期计算方法也是有区别的:

IWR 读出模式:

$$T_{frame} = \max(T_{int}, T_{read}) \quad (1)$$

ITR 读出模式:

$$T_{frame} = T_{int} + T_{read} \quad (2)$$

式中, T_{frame} 、 T_{int} 和 T_{read} 分别代表帧周期、积分时间和读出时间。

设探测器的窗口规模为 $M \times N$, 探测器读出电路的驱动脉冲频率为 f , 读出路数为 p , 则一帧图像数据的读出时间为:

$$T_{read} = \frac{M \times N}{f \times p} \quad (3)$$

由公式可知, 探测器窗口规模越小, 读出驱动脉冲频率越高, 读出路数越多, 读出时间越短。

对于单通道、面阵规模为 320×256 、探测器读出频率为 1.5 MHz 的焦平面探测器, 其读出时间为 54.61 ms, 而红外焦平面探测器的积分时间一般都为毫秒或微秒量级, 所以无论哪种读出方式, 该探测器的帧周期主要由读出时间决定, 帧频约为 18 Hz。

若窗口规模变为 32×32 , 则在相同读出频率和读出路数情况下, 读出时间仅需 0.683 ms。设定 1 ms 的积分时间, 则 IWR 模式下的帧频为 1000 Hz, ITR 模式下的帧频为 594 Hz, 都大大超过了上述数十赫兹的帧频。

3 高帧频探测对 TDI 探测系统的影响

3.1 开窗高帧频对扫描速度的影响

扫描速度是 TDI 探测系统的重要参数, 在探测区域固定时, 提高系统的扫描速度可以缩短对同一目标的重访时间, 也就是时间分辨率^[5-6]。

在红外面阵 TDI 扫描系统中, 设 w 为转台转动

的角速度; f 为光学系统的焦距, 则目标经过光学系统成的像在焦平面上移动的速度 v 为:

$$v = w \times f \quad (4)$$

要得到较高的成像质量, 系统要求目标的像在焦平面上移动一个像元中心距的时间内完成一帧图像信号的积分和读出, 设 d 代表探测器沿扫描方向的像元中心距, T_{frame} 代表帧周期, 则有:

$$\frac{d}{v} \geq T_{frame} \quad (5)$$

将帧频和像移速度的关系代入上式可得:

$$\frac{d}{w \times f} \geq \frac{1}{F_{frame}} \quad (6)$$

式中, F_{frame} 代表探测器读出帧频。

得到扫描速度和探测器读出帧频的关系如下:

$$w \leq \frac{F_{frame} \times d}{f} \quad (7)$$

可知, 当探测器沿扫描方向的像元中心距 d 和光学系统焦距 f 确定时, 探测系统的最大扫描速度和探测器读出帧频成正比, 帧频越高, 系统能够匹配的扫描速度越快, 时间分辨率越高。

3.2 开窗高帧频对 TDI 速度匹配的影响

速度失配是导致 TDI 探测系统成像质量下降的主要原因之一。模拟 TDI 系统速度失配指相邻列像元间的电荷转移速度和目标像移速度不匹配^[7], 导致不同目标的能量累加使图像被压缩或拉伸, 影响成像质量。

设 d 为探测系统沿扫描方向的光敏元中心距, 则系统的奈奎斯特频率为 $1/2d$, 设 M 为 TDI 级数, $\Delta V/V$ 为速度失配比, f 为目标的空间频率, 则系统沿扫描方向由速度失配引起的调制传递函数 (MTF) 退化可表示为^[8]:

$$\text{MTF}_{vel} = \frac{\sin(\pi dfM \frac{\Delta V}{V})}{\pi dfM \frac{\Delta V}{V}} \quad (8)$$

通常将 $M(\Delta V/V) = 2$ 定义为速度失配容

限^[9-10],当 $M(\Delta V/V) \geq 2$ 时,对于奈奎斯特频率处的目标,MTF下降至零。当失配量超过失配容限时,MTF退化会降低系统的空间分辨率。

对于数字TDI探测系统,速度匹配指探测器的帧周期与扫描速度匹配,即在像面扫过一个像元中心距的过程中,探测器完成对一帧图像信号的积分和读出。用公式表示为:

$$w = \frac{F_{frame} \times d}{f} \quad (9)$$

此时像面每扫过一个像元中心距,探测器完成一个帧周期,可以保证相邻列像元对相同目标积分。而对于级数较高的TDI系统很容易达到失配容限,64级TDI的速度失配比要控制在3.125%以内。一旦失配比稍高于容限,图像质量就会明显下降。

在开窗高帧频探测条件下,可以在像面移动一个像元中心距的过程中实现多帧读出。若帧频提高为速度匹配时的 k 倍,在一个行扫描时间内探测器可以读出 k 帧图像数据。上位机处理时,每 k 帧取一帧进行TDI可以获得与低帧频时相同的TDI图像。此时读出图像和像元的位置关系如图1所示。每 $(k-x)$ 帧取一帧数据进行TDI,速度失配比增大 x/k 。在依次读出这 k 帧数据的过程中,失配比以 $1/k$ 为单位递减,这样即使读出的 k 帧中没有与扫描速度完全匹配的图像,图像中最优失配比也不会超过 $1/2k$ 。

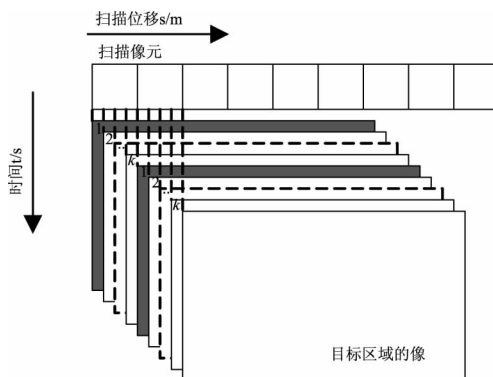


图1 读出图像和像元的位置关系

Fig. 1 Position relationship of images and pixel

由以上分析知高帧频扫描可以使数字TDI探测系统接近速度完全匹配。

3.3 高帧频扫描图像数据实现数字TDI

通常面阵扫描一次得到的图像数据只能得到一幅TDI图像。而用高帧频扫描的图像数据可以灵活选择TDI级数和TDI的起始列数。

设探测器开窗大小为 $M \times N$,沿行方向扫描目标区域,像面移动一个像元中心距的过程中探测器读出 k 帧图像数据。由于窗口的每列像元都扫遍了

目标区域,每列像元成像 k 幅,所以这 N 列像元能得到 $k \times N$ 幅目标区域的图像,其中相邻图像在空间上相差 $1/k$ 个像元中心距。从第一列像元的像开始抽取,每 k 幅抽取一幅,共抽取 N 幅,将相邻的图像错列相加可以得到一幅 N 级数字TDI图像。若抽取 i 幅进行错列相加,可以得到一幅 i 级数字TDI图像。若改从第 a 列像元的像开始抽取,抽取 i 幅错列相加,则可得到以第 a 列为起始列的 i 级数字TDI图像。对于级数为 i 的数字TDI图像,由于起始列不同,共可以得到 $(N-i+1)$ 幅,实际成像中可以根据像元的盲元率、响应率等品质情况选择任意连续 i 列像元做数字TDI。

以上分析表明,可以用高帧频扫描的图像数据灵活选择TDI起始列和TDI级数,以选择质量较高的图像。

4 实验验证

TDI扫描成像系统如图2所示,包括中科院上海技术物理研究所研制的 320×256 碲镉汞中波红外面阵探测器、中波红外镜头、信息获取板、连接电缆、转动平台和计算机。



图2 红外面阵TDI扫描成像系统

Fig. 2 Infrared FPA TDI imaging system

该探测器在1 ms积分时间下最高读出帧频可达1000 Hz,镜头焦距为90 mm,由公式(7)算得该TDI探测系统最高扫描速度随帧频的变化如表2所示。

表2 系统最大扫描速度与帧频的关系

Tab. 2 Relationship between the highest system scan speed and frame rate

帧频 /Hz	系统可达到的最大扫描速度/(rad · s ⁻¹)	探测区域 /rad	重访周期 /s
10	0.00278	0.35	125.9
20	0.00556	0.35	62.95
100	0.02778	0.35	12.60
200	0.05556	0.35	6.299
1000	0.27778	0.35	1.260

由表中数据可以看出随着扫描帧频的提高,系统能够达到的最大扫描速度线性增大,对于相同探测区域的重访周期线性减小,这也就说明了高帧频条件下探测系统能够匹配的扫描速度得到了提高,达到了更高的时间分辨率。

设定成像窗口规模为 320×64 , 此时探测器读出帧频是 243 f/s ; 随机设定像面每移动一个像元中心距读出 19 帧图像数据。探测器像元中心距为 $25 \mu\text{m}$, 镜头焦距为 90 mm , 由前述公式可以计算出转动平台的转速 w 为 0.00355 rad/s , 设定积分时间 0.5 ms , 沿行方向扫描, 扫描结束后共采集 12633 帧 320×64 的图像。



(a) 每 23 帧取一帧 TDI 结果



(b) 每 22 帧取一帧 TDI 结果



(c) 每 21 帧取一帧 TDI 结果



(d) 每 20 帧取一帧 TDI 结果



(e) 每 19 帧取一帧 TDI 结果



(f) 每 18 帧取一帧 TDI 结果



(g) 每 17 帧取一帧 TDI 结果



(h) 每 16 帧取一帧 TDI 结果

图 3 64 级 TDI 的图像效果

Fig. 3 Stage 64 TDI images

图 3 是以第一列为 TDI 起始列, 间隔不同帧数抽取一帧图像做 64 级数字 TDI 得到的图像, 抽取间隔从 23 减小到 16。

图 3(a) ~ (h) 的速度失配比随抽取间隔的改变而变化。由于每扫过一个像元探测器读出 19 帧数据, 故图 3 中图像的速度失配比以 5.26% 为单位递增。图 3(a) ~ 图 3(d) 的速度失配比分别是: -21.05% 、 -15.79% 、 -10.53% 、 -5.263% , 图 3(e) 是速度匹配时的 TDI 图像, 图 3(f) ~ 图 3(h) 的速度失配比分别是: 5.263% 、 10.53% 、 15.79% 。“-”代表读出速度过快, “+”代表读出速度过慢。

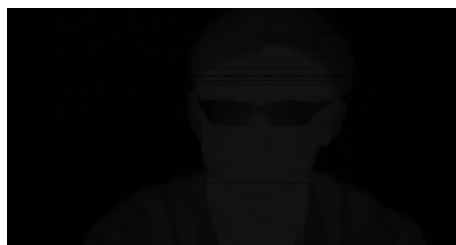
前4幅图由于读出速度过快而被压缩,后3幅图由于读出速度过慢而被拉伸。可以看出,在抽取图像间隔的帧数从小到大的过程中,速度失配比先是由大变小,直到按某一个间隔帧数抽取的图像最接近完全匹配,失配比再由小变大,反映在图像上如图3(a)~(h),图像先由被压缩逐渐变到最接近实物,再逐渐被拉伸。所以只要抽取间隔数连续变化,总会有图像的速度失配比达到 $1/38$,即 2.63% 以内。这也就说明了高帧频探测不需要使扫描速度和帧周期精确匹配,只要帧频足够高,总会得到速度失配比接近零的图像,也就使扫描成像系统更容易实现速度匹配。

再考察速度失配容限内图像的个数,对于64级TDI,图3(e)在失配容限内;若做32级TDI,图3(d)~(f)在失配容限内;若做16级TDI,图3(c)~(g)在失配容限内。可知在帧频达到速度匹配时的19倍时,对于64、32、16级的TDI,在失配容限内的图像分别有1、3、5幅。可知在高帧频探测条件下,可以获得多幅失配比在容限内的TDI图像。

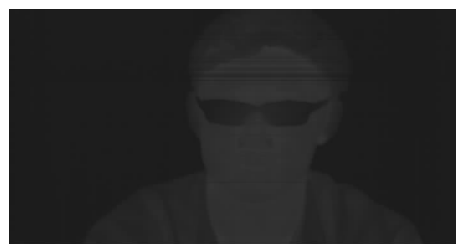
图4是速度匹配时第1列作为TDI起始列,进行4级、8级、16级、32级数字TDI得到的图像。

图5是改变TDI起始列得到的16级数字TDI图像,共有49幅。取其中4幅,TDI起始列分别是:第1、17、33、49列。

由图像可以看出,同为16级数字TDI,由于TDI起始列不同,使所得图像质量也不同。这是因为做TDI的16列像元的盲元个数、分布不同,像元的响应率非均匀性也有差别。图5(b)相比于其他三幅图像质量较高,由盲元引起的深色横条纹较少。



(a)4级数字TDI



(b)8级数字TDI



(c)16级数字TDI



(d)32级数字TDI

图4 不同级数的TDI图像

Fig. 4 TDI images of different stages



(a)第1列作为TDI起始列



(b)第17列作为TDI起始列



(c)第33列作为TDI起始列



(d)第49列作为TDI起始列

图5 起始列不同的64级TDI图像

Fig. 5 Stage 64 TDI images of different start columns

图4、图5验证了在高帧频探测条件下,用一次扫描的数据能够做出不同级数、不同起始列的数字 TDI 图像,可以根据实际级数需要和探测器若干连续列像元的质量灵活选择。

5 结 论

开窗功能使探测器帧频大幅度提高。通过理论分析,论证了在高帧频探测的条件下(1)可以增加探测器系统扫描速度的上限;(2)扫描成像系统更容易实现速度匹配;(3)可以根据所开窗口像元的实际响应情况选择进行 TDI 的起始列和级数。用上海技术物理研究所研制的中波红外探测器搭建了 TDI 扫描成像平台,对图像数据进行处理分析,验证了前述高帧频对 TDI 探测系统的影响。实验说明高帧频扫描可以提高数字 TDI 探测系统的性能,为更加灵活的实现数字 TDI 提供了可能性。

参考文献:

- [1] Kaiming Nie, Suying Yao. A 128-Stage Analog Accumulator for CMOS TDI Image Sensor. [J]. IEEE Trans. CIRCUIT - TS and Systems, 2014, 61(7): 1952 - 1961.
- [2] G Lepage, Jan Bogaerts, Guy Meynants. Time-Delay-Integration Architectures in CMOS Image Sensors. [J]. IEEE Trans. Electron Device-S, 2009, 56(11): 2524 - 2533.
- [3] PENG Huanliang. The development of the IRFPA thermal imaging technology [J]. Laser & Infrared, 2006, 36(S1): 776 - 780. (in Chinese)
彭焕良. 红外焦平面热成像技术的发展[J]. 激光与红外, 2006, 36(S1): 776 - 780.
- [4] DONG Hai, LUO Guantai, YU Mingquan. Double frame rate and double picture implementation in IRFPA with region-of-interest capability imaging system [J]. Laser & Infrared, 2011, 41(3): 278 - 283. (in Chinese)
董海, 罗冠泰, 余明权, 等. 利用 IRFPA 的开窗功能实现成像系统的双帧频双画幅输出 [J]. 激光与红外, 2011, 41(3): 278 - 283.
- [5] QU Hongsong, ZHANG Ye, JIN Guang. Improvement of performance for CMOS area imagesensors by TDI algorithm in digital domain [J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(8): 1896 - 1903. (in Chinese)
曲宏松, 张叶, 金光. 基于数字域 TDI 算法改进面阵 CMOS 图像传感器功能 [J]. 光学 精密工程, 2010, 18(8): 1896 - 1903.
- [6] YANG Yuzhou, ZHANG Shuanglei, GONG Xueyi, et al. Research of scanning imaging method with focal plane array [J]. Infrared Technology, 2014, 36(6): 479 - 484. (in Chinese)
杨育周, 张双磊, 龚学义, 等. 基于面阵探测系统的扫描成像信息获取方式研究 [J]. 红外技术, 2014, 36(6): 479 - 484.
- [7] JIANG Guangwei. The spacial resolution characteristic of TDI-CCD [J]. Infrared, 2001, 9: 17 - 21. (in Chinese)
蒋光伟. TDI-CCD 的空间分辨率特性 [J]. 红外, 2001, 9: 17 - 21.
- [8] Andreas Eckardt, Ralf Teulke, Melanie Jung. CMOS-TDI detector technology for reconnaissance application [C]. Proc. of SPIE, 2014, 9249: 1 - 9.
- [9] YUAN Gaobin, LI Binqiao, XU Jiangtao, et al. Research of MTF velocity mismatch model for time delay integration CMOS area image sensors [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(1): 0104001. (in Chinese)
袁高斌, 李斌桥, 徐江涛, 等. 时间延迟积分型面阵 CMOS 图像传感器 MTF 速度失配模型研究 [J]. 光学学报, 2013, 33(1): 0104001.
- [10] LI Lin, YAO Suying, XU Jiangtao, et al. Research on modulation transfer function model of TDI-CMOS image sensor with oversample-superposition [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(2): 0228002. (in Chinese)
李林, 姚素英, 徐江涛, 等. TDI-CMOS 图像传感器多次采样叠加调制传递函数模型研究 [J]. 光学学报, 2014, 34(2): 0228002.