

文章编号 1004-924X(2010)08-1896-08

基于数字域 TDI 算法改进面阵 CMOS 图像传感器功能

曲宏松, 张 叶, 金 光

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要:为使面阵 CMOS 图像传感器具有 TDI 成像功能,研究了 TDICCD 的工作原理,提出了一种基于数字域的 TDI 算法,并讨论了如何利用 FPGA 实现该算法。该算法可在不改变 CMOS 器件构造的前提下,使其具有时间延迟积分功能。通过举例法推导出面阵 CMOS 图像传感器数字域 TDI 计算公式,并在此基础上优化了算法结构,优化后可以节省 $(m-1)(m-2)/2$ 行内存空间。最后以航天相机为背景,讨论了地面像元分辨率、行转移时间与 CMOS 帧频的关系,通过一个算例计算出不同分辨率和积分级数条件下对 CMOS 帧频的要求。计算结果表明,帧频大于 648 frame/s 的 $1\ 280 \times 1\ 024$ CMOS,可以满足 600 km 轨道高度下地面像元分辨率为 1 m 的 96 级积分成像要求。

关键词:时间延迟积分; CMOS 图像传感器; 数字域; 帧频

中图分类号: TN386.5 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20101808.1896

Improvement of performance for CMOS area image sensors by TDI algorithm in digital domain

QU Hong-song, ZHANG Ye, JIN Guang

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: In order to provide a TDI function for CMOS area image sensors, the working principles of TDICCDs are researched and a TDI algorithm based on the digital domain is proposed, then, how to realize the algorithm by a FPGA is discussed. The algorithm can realize time delay integration on CMOS sensors without changing its device structure. The TDI algorithm for CMOS area image sensors in a digital domain is deduced through an example method. After optimization, the algorithm with optimized structure can save $(m-1)(m-2)/2$ memory space of image lines. Finally, on the basis of a remote sensing camera, the dependence of pixel resolution and row transfer time on frame rate is discussed and the frame rate requirements under the Ground Sample Distances (GSDs) and TDI stages are calculated by the numerical example method. Experiment results show that the $1\ 280 \times 1\ 024$ CMOS sensor with a frame rate more than 648 frame/s can meet the requirements of integration imaging for 1 m GSD of 96 TDI stages in an orbital altitude of 600 km.

Key words: time delay and integration; CMOS image sensor; digital domain; frame frequency

收稿日期: 2010-03-23; 修订日期: 2010-04-15.

基金项目: 中国科学院三期创新工程基金资助项目 (No. O93J32F090); 国家自然科学基金青年基金资助项目 (No. 60902067)

1 引言

如果把镜头比喻成相机的眼睛,图像传感器就是相机的视神经,它可将镜头获得的光信号转换成易于存储和传输的电信号。图像传感器分为 CCD 和 CMOS 两类。

目前,传输型高分辨力航天光学遥感相机中普遍应用 TDI CCD(时间延迟积分电荷耦合器件)作为图像的光电转换器件。航天遥感相机多为推扫拍照模式,而 TDI CCD 是一种面阵结构、线阵输出的 CCD^[1-3]。TDI CCD 通过延迟积分将多次对同一目标曝光的结果进行累加,从而在不影响像素输出和地面分辨力的条件下提高相机系统的探测灵敏度,所以在高分辨力成像应用中 TDI CCD 是首选探测器。目前,美国的 Iknose, QuickBird, WorldView, GEOEYE 等商业卫星均使用 TDI CCD^[4]。

然而 TDI CCD 在实际应用中有很多不足之处,比如:TDI CCD 需要的电源种类众多,而且功耗很大;TDI CCD 需要外围电路支持,如驱动单元、量化单元等;另外,TDI CCD 一般只有固定几个级数可供选择,级数不能进行连续调整。

CMOS 是与 CCD 同时期发明的一种图像传感器。CMOS 属于有源像素传感器(Active Pixel Sensor),其光子转电子、电子转电压及缓冲放大等过程都在器件内部完成。CMOS 可以在行和列两个维度上同时并行输出像元信号,而且具有窗口输出功能,这使其在工作速度和输出区域灵活选择方面优于 CCD 探测器。此外,与 CCD 探测器不同的是 CMOS 探测器的外围电路均可以集成到芯片内部,信号放大、相关双采样、A/D 转换、图像处理甚至压缩编码、I/O 接口等电路都和所有光敏单元一起集成于同一芯片中,这使得 CMOS 相机的可靠性和集成性得到了提高,而体积、重量、功耗和成本等都得到了降低。

CMOS 较 CCD 有很多优势,但 CMOS 的普遍应用却远晚于 CCD。因为受工艺水平的限制,早期的 CMOS 器件在噪声抑制、非均匀性和暗信号水平上都存在缺陷,使得 CMOS 器件的应用与普及晚于 CCD 器件。但随着 CMOS 制造工艺水平的不断成熟和性能的提高,其成像质量已经和 CCD 基本相当,并且逐渐广泛应用于高端数字单

反相机、工业视觉、高速摄像、医疗、消费品等民用领域中。并且,CMOS 以其抗辐照能力强的特点逐渐被应用于航天领域,目前 CMOS 已应用于星敏感器、空间可视监控系统、可视遥感星跟踪器系统、飞船监视器、火星探测器和天体跟踪器中。

虽然 CMOS 已得到了广泛应用与研究,但在高分辨力对地遥感相机方面的研究还很少。由于缺少 TDI CMOS 器件,目前 TDI CCD 仍为航天高分辨力相机的主流探测器^[5]。为使 CMOS 能够更适合高分辨力成像,本文着重研究一种在不改变 CMOS 器件构造的前提下,使其具有时间延迟积分功能的方法。

2 TDI 原理

时间延迟积分(Time Delay and Integration, TDI)技术是航天遥感应领域的关键技术之一,该技术已广泛应用于 CCD 探测器中。

TDI CCD 的结构像一个长方形的面阵器件,从功能上说,它是一个线阵器件。对于普通线阵 CCD 来说,器件的灵敏度 S 和光敏元的面积 A 是确定的值,在输入光照 E 恒定的情况下,欲提高 CCD 灵敏度,唯一的办法就是增加积分时间 T ,而增加积分时间将带来空间分辨力的降低,这在实际应用中将无法满足不同分辨力需求。所以,普通线阵 CCD 不适用于高速、微光应用。而 TDI CCD 的工作过程是对同一目标进行多次曝光,通过延时积分的方法,增强光能的收集,很好地解决了灵敏度与速度、分辨力之间的矛盾。

TDI CCD 的行数为延迟积分的级数(M),列数为 CCD 器件一行的像元数。TDI CCD 采用了特殊的扫描方式,它的工作原理如图 1 所示。在沿 CCD 列方向的推扫成像过程中,在第一个积分周期内,目标在某列的第一个像元进行曝光积分,得到的光生电荷并不像普通 CCD 一样进行读出,而是下移一个像元。在第二个积分周期,目标恰好移动到该列的第二个像元进行曝光,得到的光生电荷与上一个像元移来的电荷相加再移到下个像元。依此类推,直到第 m 个积分周期时,目标已移到该列的第 m 个像元进行曝光积分,第 m 个积分周期结束时,第 m 个像元的光生电荷与前($m-1$)个像元的电荷相加后移入读出寄存器,并像普通线阵 CCD 器件一样进行读出。可见读出的

电荷是单个像元的 m 倍,而噪声只增加了 \sqrt{m} 倍,因此,在积分周期相同时,TDI CCD 的灵敏度比普通线阵 CCD 高很多^[6-7]。

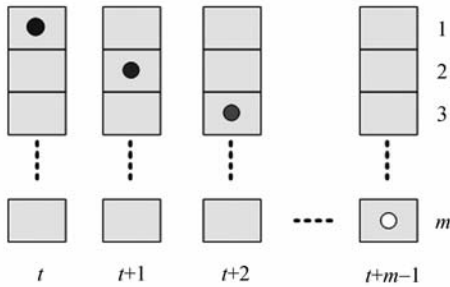


图 1 TDI CCD 工作原理

Fig. 1 Working principle of TDI CCD

由此可见,TDI CCD 可以在不影响相机的像素输出频率和地面分辨力的条件下,提高相机的探测灵敏度,所以很适合应用于高分辨力航天相机中。而且,利用 TDI CCD 可以使相机的相对孔径减小,从而大大减小高分辨力相机系统的体积和重量,降低成本,所以 TDI CCD 已成为目前航天高分辨力相机的主流探测器^[8]。

3 CMOS 数字域 TDI 算法

目前,CMOS 图像传感器大多为线阵或面阵的形式,没有类似 TDI CCD 的 TDI CMOS 器件。这是因为 TDI CCD 的时间延迟积分过程是在电荷域完成的^[9],而在 CMOS 内部难以实现类似 TDI CCD 的电荷转移积分过程。由于没有 TDI CMOS 器件,使得 CMOS 在高分辨力航天遥感成像领域的应用遇到了瓶颈。如果能在 CMOS 器件上实现 TDI 功能,那么 CMOS 图像传感器的功能和优势可以得到最大化地发挥。

为使面阵 CMOS 图像传感器也具有 TDI 功能,本文研究一种在数字域实现 CMOS 图像传感器 TDI 的方法。对于光学成像系统,一幅景物图像经过镜头、图像传感器和一系列处理电路,从光信号转换成光生电子,再从电子转换成电压信号,对模拟电压信号进行数字化后,最终成为数字信号。在这个过程中,图像信号经历了三个“域”:电荷域、模拟域和数字域。TDI 是一个对图像信号进行时间延迟累加的过程。显然,TDI 过程需

要在这三个域中的某一个域内进行。TDI CCD 器件的时间延迟积分过程是在电荷域内进行。TDI CCD 的电荷域在器件内部,通过势垒和势阱的交替变化来转移和累加电荷。CMOS 内部结构不同于 CCD,不能在电荷域内实现 TDI,那么只能在模拟域和数字域中来完成。模拟域中实现 CMOS 的 TDI 需要改变器件制造工艺,Gerald Lepage 等人在模拟域中用电压累加的方法实现了 CMOS 的 TDI^[10]。而本文提出的算法不依赖器件本身特点,在数字域解决普通面阵 CMOS 图像传感器的 TDI 问题。因为 CMOS 器件输出的就是数字信号,可以利用 FPGA 或 DSP 等芯片很方便地对数字图像信号进行处理。通过对多帧图像的移位、累加和存储等操作就可以在数字域中实现 CMOS 图像传感器的 TDI 功能。

3.1 算法原理

在数字域进行 TDI 和在电荷域进行 TDI 的原理是一致的,都是通过对同一景物多次曝光后进行延迟累加。

在推导 CMOS 数字域 TDI 算法之前还需定义三个域。第一个域是景物域(S),根据分辨力(GSD)指标可以将景物分成若干个边长为 GSD 的连续正方形区域,每个正方形区域的景物对应 CMOS 传感器上的一个像元。第二个域是积分图像域(P),这个域是一个矩阵空间。对于一个 c (列) \times r (行) CMOS 器件,如进行 m 级积分,则积分图像域为一个 $c \times m$ 矩阵。这个矩阵由 m 个行向量构成,每个行向量有 c 个元素,每个元素代表一个像素值。因为 CMOS 具有窗口选择功能,故每帧只输出 $c \times m$ 个像素。第三个域为输出域(O),输出域为一个行向量,这个行向量也有 c 个元素,每个元素表示最终完成积分的输出像素。

下面以 4 级积分为例推导 CMOS 数字域 TDI 算法。假设景物域为一个 10×10 矩阵,图像域为 10×4 矩阵。

其中, $S_n = \{S_{n,1}, S_{n,2}, \dots, S_{n,10}\}$,表示第 n 行景物; $P_n(t) = \{P_{n,1}(t), P_{n,2}(t), \dots, P_{n,10}(t)\}$,表示在第 t 个行周期内获得的第 n 行图像; $O(t) = \{O_1(t), O_2(t), \dots, O_{10}(t)\}$,表示在第 t 个行周期输出的最终图像。算法的最终目标是推导出 $O(t)$ 的计算公式。算法的推导过程如图 2~6 所示。其中每幅图的上半部为景物域,下半部为积分图像域和输出域。 P 域中的每个像元图像与 S 域

中每块景物一一对应。积分图像域中阴影部分为需要存储的图像。

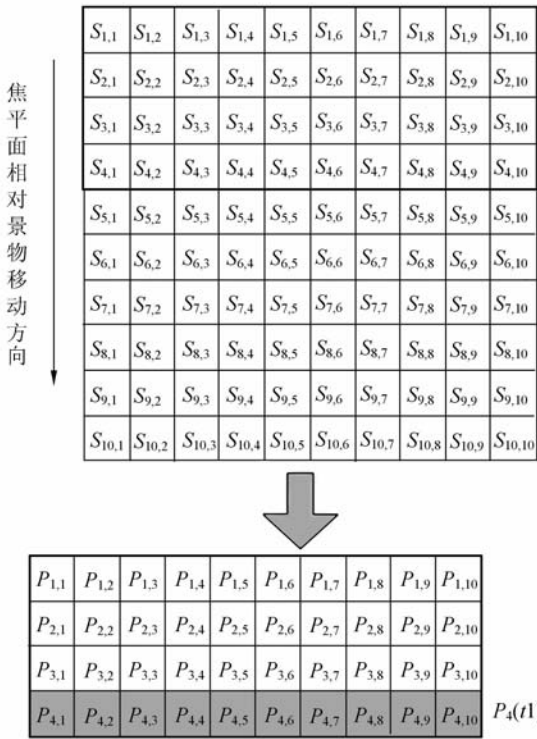


图 2 第一个行周期积分过程

Fig. 2 Integration process in the first line time

在第一个行周期 ($t = 1$) 内,如图 2 所示,CMOS 曝光并得到 4×10 个像素图像,其中第 4 行图像 $P_4(1)$ 是对第 4 行景物 S_4 进行第一次曝光得到的图像。

在第二个行周期 ($t = 2$) 内,如图 3 所示,第 3 行图像 $P_3(2)$ 是对第 4 行景物 S_4 进行第二次曝光得到的图像,而第 4 行图像 $P_4(2)$ 是对第 5 行景物 S_5 进行第一次曝光得到的图像。

在第三个行周期 ($t = 3$) 内,如图 4 所示,第 2 行图像 $P_2(3)$ 是对第 4 行景物 S_4 进行第三次曝光得到的图像,第 3 行图像 $P_3(3)$ 是对第 5 行景物 S_5 进行第二次曝光得到的图像,第 4 行图像 $P_4(3)$ 是对第 6 行景物 S_6 进行第一次曝光得到的图像。

在第四个行周期 ($t = 4$) 内,如图 5 所示,第 1 行图像 $P_1(4)$ 是对第 4 行景物 S_4 进行第四次曝光得到的图像,第 2 行图像 $P_2(4)$ 是对第 5 行景物 S_5 进行第三次曝光得到的图像,第 3 行图像 $P_3(4)$ 是对第 6 行景物 S_6 进行第二次曝光得到的图像,第 4 行图像 $P_4(4)$ 是对第 7 行景物 S_7 进

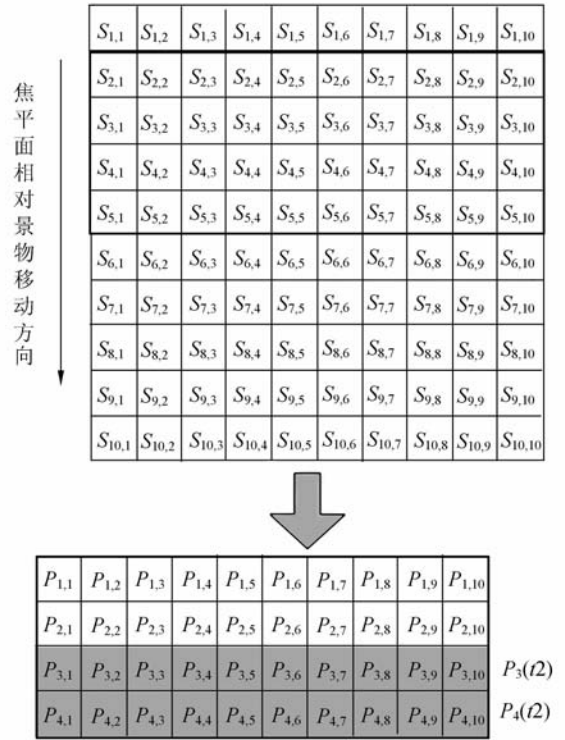


图 3 第二个行周期积分过程

Fig. 3 Integration process in the second line time

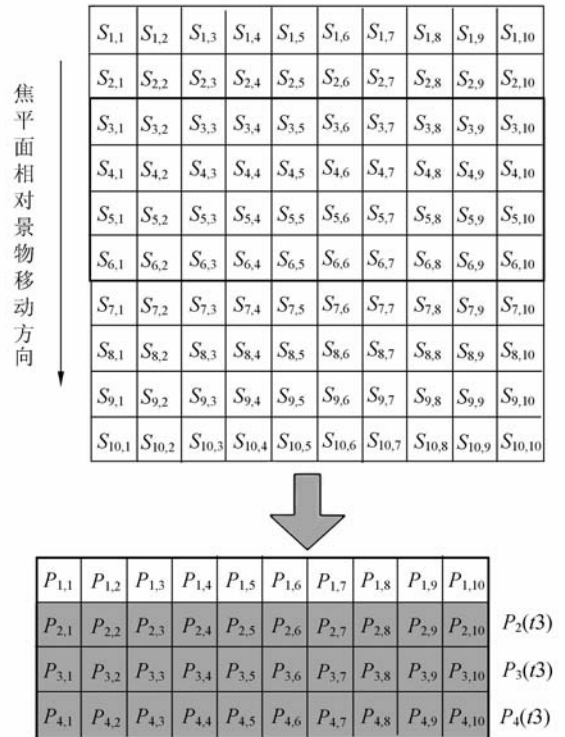


图 4 第三个行周期积分过程

Fig. 4 Integration process in the third line time

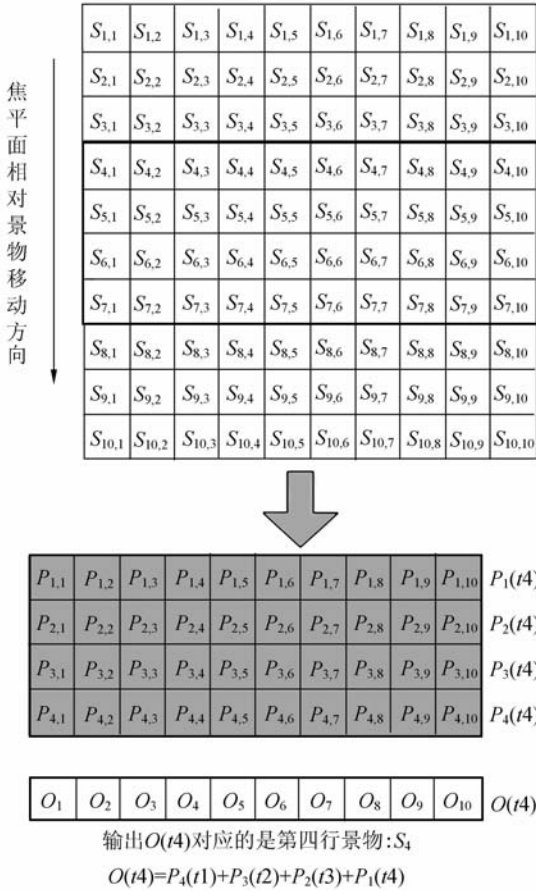


图 5 第四个行周期积分过程

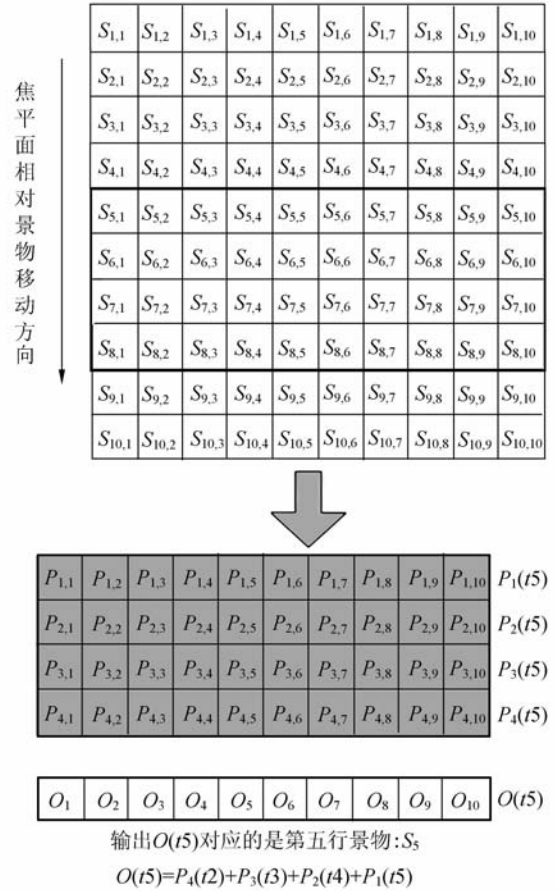


图 6 第五个行周期积分过程

Fig. 6 Integration process in the fifth line time

行第一次曝光得到的图像。至此,第四行景物 S₄ 完成了四次曝光,将四次曝光量化后的数字图像进行累加,就得到了 S₄ 最终的 4 级 TDI 结果 O(4):

$$O(4) = P_4(1) + P_3(2) + P_2(3) + P_1(4) \quad (1)$$

依此类推,在第五个行周期(t=5)内,如图 6 所示,可以得到 S₅ 最终的 4 级 TDI 结果 O(5):

$$O(5) = P_4(2) + P_3(3) + P_2(4) + P_1(5) \quad (2)$$

通过对 5 个行周期内积分和累加过程的分析,可以看出:CMOS 的 4 行感光像元在连续 4 个行周期内逐行对同一景物进行了曝光。完成 4 次曝光后,将 4 次结果进行累加即可得到这行景物的 4 级 TDI 结果。依此过程顺序执行,即可得到一幅景物的连续推扫 TDI 图像结果。

由此,可以推导出 CMOS 数字域 TDI 计算方法:

$$O(t) = P_m(t-m+1) + P_{m-1}(t-m+2) + \dots + P_2(t-1) + P_1(t) \quad (3)$$

其中:m 为积分级数。

3.2 改进算法

本文利用 FPGA 实现该算法。按照算法的延迟积分累加过程,需要在 FPGA 内部 RAM 中开辟延迟缓存区。FPGA 实现算法的内部信号流程图如图 7 所示。FPGA 中针对每行像元开辟不同数量的缓存用于延迟移位操作,最终将各行延迟移位结果进行累加即可得到 TDI 输出结果。从图 7 可以看出,这一算法在 FPGA 中实现需要很大的内存开销,对于 m 级积分,需要开辟 m · (m - 1) / 2 个内部行缓存区,这将给大积分级数应用场合带来很大困难。

针对基于 FPGA 的 CMOS 数字域基本 TDI 算法的不足,可以对该算法进行优化。从图 7 可知,基本算法中只有一个累加器,必须在所有积分行都完成延迟移位后才能进行累加操作,这使得 TDI 效率不高,同时又使内部延迟缓存数量随级数大幅增加。为克服该算法的不足,改变 FPGA

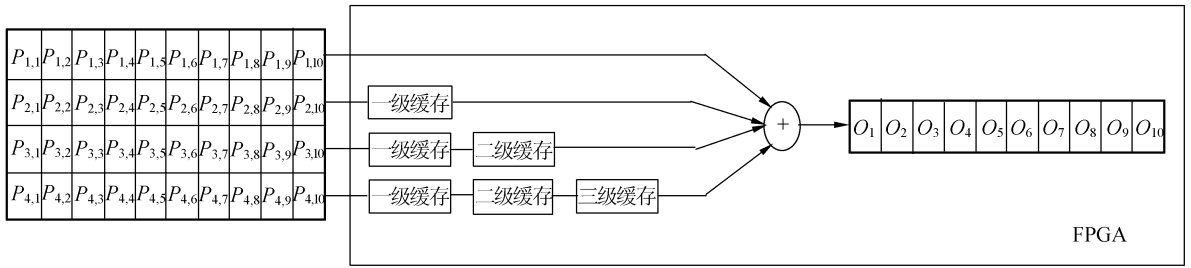


图 7 基本 TDI 算法 FPGA 内部信号流图

Fig. 7 Signal flow of basic TDI algorithm in FPGA

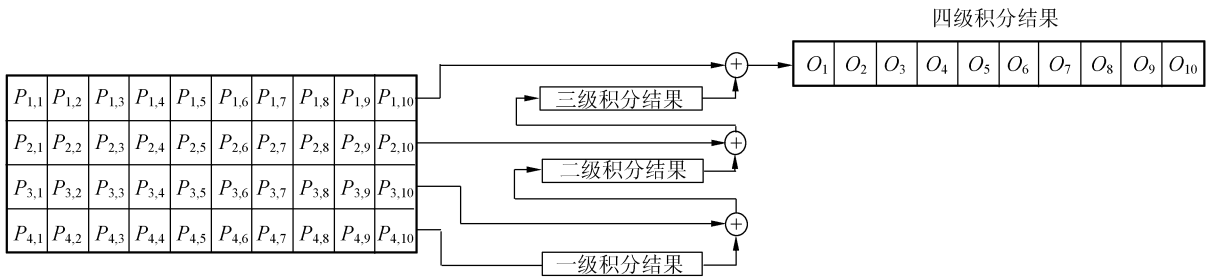


图 8 优化后 TDI 算法 FPGA 内部信号流图

Fig. 8 Signal flow of improved TDI algorithm in FPGA

内部信号流程,如图 8 所示。这一优化算法增加了累加器的数量,而延迟缓存区的数量大幅减少。在每个行周期内,FPGA 要完成两个工作。第一是延时移位操作,第二是积分累加工作。显然,内存优化算法比基本 TDI 算法大大节约了 FPGA 的内存开销,只用 $m-1$ 个内部行缓存就可以实现 TDI 功能,同时也提高了 FPGA 实现 TDI 算法的效率。

3.3 分辨率、行转移时间与帧频的关系

3.3.1 分辨率与行频的关系

首先计算卫星的星下点速度。如果卫星运行于圆轨道,则其星下点速度为:

$$v_g = \frac{R}{R+H} \cdot \sqrt{\frac{\mu}{R+H}}, \quad (4)$$

其中: v_g 为星下点速度,也被称作地速; R 为地球半径, H 为标称轨道高度。计算星下点速度是为了计算行转移时间,为使地速与像速相匹配,行转移时间 T_1 应为:

$$\frac{GSD}{v_g} = T_1, \quad (5)$$

其中: GSD 为地面像元分辨率。

3.3.2 行转移时间与帧频的关系

CMOS 在 TDI 模式下的工作节拍是以行转移时间为单位的,行转移时间又被称为行周期。在每个行周期内要完成两项任务,第一是 CMOS 感光像元曝光并进行光电转换,第二是要将转换后的有用光生电荷转移出去。要完成第二项任务,CMOS 器件必须要有足够高的像元读出频率 F_r 。 F_r 表示每秒钟可以读出的像元个数。但对于大多数 CMOS 器件,在器件手册上并没有读出频率这项指标,而多以帧频 F_f 表征像元读出速度,本节将推导满足 TDI 要求的行频与帧频之间的关系。

对于一个 $c(\text{列}) \times r(\text{行})$ CMOS 器件,如进行 m 级积分,则在一个行周期内需读出 $c \times m$ 个像元,如器件的像元读出频率为 F_r ,则读出 $c \times m$ 个像元所需的时间 $T_{c \times m}$ 为:

$$T_{c \times m} = \frac{c \times m}{F_r}. \quad (6)$$

而像元读出频率和帧频的关系为:

$$F_r = c \times r \times F_f, \quad (7)$$

则 $T_{c \times m}$ 与 F_f 的关系为:

$$T_{c \times m} = \frac{m}{r \times F_f}, \quad (8)$$

由于要求在一个行周期内将 m 行像素都读出,则 $T_{c \times m}$ 应小于 T_1 ,所以行转移时间与帧频的关系为:

$$F_f < \frac{m}{r \times T_1}. \quad (9)$$

4 算例与讨论

4.1 算例

假设卫星运行于轨道高度为 600 km 的太阳同步圆轨道,轨道参数和 CMOS 像元参数如表 1 所示,根据式(4)、(5)和(9)可以计算地面像元分辨率分别为 5,2,1 m,在不同积分级数下所对应的最小帧频,计算结果见表 2。

表 1 轨道参数和 CMOS 像元参数

Tab. 1 Orbital elements and CMOS pixel elements

H/km	R/km	$\mu/(\text{km}^3/\text{s}^2)$	$c/\text{个}$	$r/\text{个}$
600	6 378.137	3.986 004 36 $\times 10^5$	1 280	1 024

表 2 最小帧频计算结果

Tab. 2 Results of the minim frame frequency

GSD/m	T_1/ms	m/stage	$F_f/(\text{frame/s})$
5	0.724	12	16.2
		24	32.4
		48	64.8
		96	129.6
		12	40.5
2	0.290	24	81.0
		48	161.9
		96	323.8
		12	81.0
		24	161.9
1	0.145	48	323.8
		96	647.6

4.2 讨论

帧频指标是应用 CMOS 数字域 TDI 算法时

首先要考虑的一个因素,因为它制约了 CMOS 像素的读出速率,从而制约了行频的大小。目前的高帧频 CMOS 技术已经比较成熟,1 280 \times 1 024 像元 CMOS 器件的帧频已经可以做到 500 frame/s 以上,甚至 1 600 \times 1 200@1000 frame/s 的 CMOS 图像传感器也已问世^[1]。从表 2 可以看出,这一指标已经可以满足 1 m 分辨率大多级数下的 TDI 成像。

数字域 TDI 算法很适合在面阵 CMOS 传感器中使用,因为面阵 CMOS 在像元读出时不必和面阵 CCD 一样进行全帧转移输出,可以根据需要有选择地输出。这种窗口选择输出机制使读出效率得到了提高,变相提高了读出速率,也使其所适应的行转移时间的范围扩大,从而适合在高分辨力应用条件下使用。

5 结 论

本文首先剖析了 TDI CCD 的工作原理,在此基础上提出了一种在数字域实现面阵 CMOS 图像传感器的 TDI 算法,并讨论了如何利用 FPGA 实现该算法。为节省内存空间,提出了一种优化算法,可以节省 $(m-2)(m-1)/2$ 行内存空间。最后,以航天遥感相机为背景,讨论了地面像元分辨率、行转移时间与 CMOS 帧频的关系;通过一个算例计算出不同分辨率和积分级数条件下对 CMOS 帧频的要求。结果表明,对于帧频大于 648 frame/s 的 1 280 \times 1 024 CMOS,可以满足 600 km 轨道高度下地面像元分辨率为 1 m 的 96 级积分成像要求。

CMOS 图像传感器相对 TDI CCD 具有很多优势,很适合航天应用。本文提出的数字域 TDI 算法可以使 CMOS 增添时间延迟积分功能,使其在高分辨航天遥感相机中的应用具有广阔的前景。

参考文献:

- [1] 张达. 星上高速多通道 CCD 信号处理与传输技术研究[D]. 北京:中国科学院研究生院,2008.
ZHANG D. *Research of high-speed multi-channel CCD signal processing and transmission technology on satellite*[D]. Beijing:Graduate University of the

Chinese Academy of Sciences, 2008. (in Chinese)

- [2] 陈荣利,李英才,樊学武. TDICCD 相机像质综合评价研究[J]. 航天返回与遥感,2003,24(4):10-13.
CHEN R L, LI Y C, FAN X W. Investigation on synthetically evaluating image quality of TDI-CCD cameras[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2003,24(4):10-13. (in Chinese)

- [3] 李云飞,李敏杰,司国良,等. TDI-CCD 图像传感器的噪声分析与处理[J]. 光学精密工程,2007,15(8):1196-1202.
LI Y F, LI M J, SI G L, *et al.*. Noise analyzing and processing of TDI-CCD image sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(8):1196-1202. (in Chinese)
- [4] 曲宏松,金光,张叶. “NextView 计划”与光学遥感卫星的发展趋势[J]. 中国光学与应用光学,2009,2(6):467-476.
QU H S, JIN G, ZHANG Y. NextView program and progress in optical remote sensing satellites[J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2009, 2(6):467-476. (in Chinese)
- [5] 胡君,王栋. 空间光学遥感器的多光谱 TDI CCD 信号检测与生成[J]. 光学精密工程,2009,17(8):1810-1818.
HU J, WANG D. Detection and generation of multi-spectral TDI CCD signals for space optical remote sensors[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(8):1810-1818. (in Chinese)
- [6] TOMPSETT M F. Charge-coupled imaging devices: experimental results [J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 1971, 11(ED-18):992-996.
- [7] 佟首峰,李德志,郝志航. 高分辨率 TDI CCD 遥感相机的特性分析[J]. 光电工程,2001,28(4):64-67.
TONG SH F, LI D ZH, HAO ZH H. Analysis on the characteristics of TDI-CCD high-resolution camera for remote sensing [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2001, 28(4):64-67. (in Chinese)
- [8] 杨秉新. TDI CCD 在航天遥感中的应用[J]. 航天返回与遥感,1997,18(3):15-18.
YANG B X. Application of TDI CCD in space image sensor [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 1997, 18(3):15-18. (in Chinese)
- [9] BODENSTORFER E, FURLER J, BRODERSEN J, *et al.*. High-speed line-scan camera with digital time delay integration [J]. *SPIE*, 2007, 6496:1-10.
- [10] LEPAGEA G, DIDIER D, DIELSA W. CMOS long linear array for space application[J]. *SPIE*, 2006, 6068:1-8.
- [11] 孙宏海,李泽学,纪华,等. 半导体制冷型高帧频 CMOS 数字摄像机及其成像噪声分析[J]. 光学精密工程,2008,16(10):2038-2044.
SUN H H, LI Z X, JI H, *et al.*. High frame rate CMOS digital camera by semiconductor refrigeration and its imaging noise analysis[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(10):2038-2044. (in Chinese)

作者简介:



曲宏松(1980—),男,辽宁大连人,助理研究员,2008年于中国科学院研究生院获得博士学位,主要从事 TDI CCD 成像系统方面的研究。E-mail: qu-hongsong@yahoo.com.cn



张叶(1981—),女,吉林长春人,助理研究员,2008年于中国科学院研究生院获得博士学位,主要从事计算机视觉与模式识别的研究。E-mail: zhang.leaflet@gmail.com



金光(1958—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,主要从事空间遥感相机总体设计的研究。E-mail: jing@ciomp.ac.cn