

TDI-CCD 的空间分辨率特性

蒋光伟

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海, 200083)

摘 要 TDI-CCD 的极限分辨率为空间采样频率的一半, 且受到像元几何孔径、电荷转移失效率、速度匹配和电荷转移离散运动的影响。在低光照度下, 分辨率则将受到噪声限制。TDI 级数对分辨率的影响被详细分析。结果表明 TDI-CCD 具有优良的低光照扫描特性。

关键词 TDI-CCD 分辨率 MTF 噪声

1 引言

面阵结构 CCD 的一个重要应用是作为 TDI (Time-Delay and Integration) 器件用于扫描成像。TDI-CCD 基于对同一目标多次曝光, 从而延长光积分时间, 增加光能收集, 大幅度提高信号强度。与一般的线阵 CCD 相比, 具有很高的灵敏度和良好的均匀性。这种扫描成像技术最早由美国 Fiarchild 公司在 70 年代初期开发并应用于航空照相侦察。由于提供了高速、低光照扫描特性, 它正成为卫星 (或小卫星) 遥感领域理想的成像探测器件。

空间分辨率是评价 CCD 性能的重要参数。TDI-CCD 在获得高灵敏度的同时并不降低器件的空间分辨率, 其极限分辨率为器件采样频率的一半, 由像元的中心间距确定, 此外还受到像元几何孔径、电荷转移失效率、速度匹配和电荷转移离散运动的影响。在低光照度下, 分辨率则将受到噪声限制, TDI 级数将影响器件的分辨率。本文将针对这些问题进行详细分析。

2 TDI-CCD 的工作原理

TDI-CCD 的结构如图 1 所示, 它类似于一个普通的面阵 CCD。成像区可以看成由一排垂直 CCD 寄存器组成, 由于 TDI-CCD 为线扫

器件, 垂直 CCD 的个数为像元数, 位数则对应 TDI 级数。在成像区下方有一个转移门, 用于控制电荷从最后一行像元转移到水平读出 CCD 寄存器。

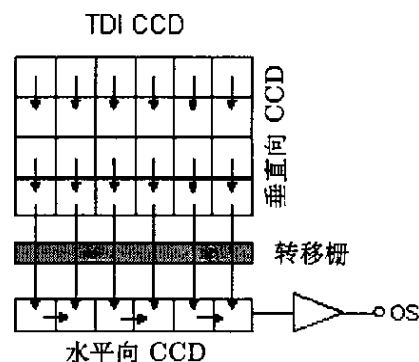


图 1 TDI-CCD 的组织结构图

当器件以推帚方式成像时, 目标图像将自上而下依次扫过各级 TDI 像元, 每级像元对目标的凝视时间为一个曝光积分周期。在第一个积分周期, 第一级像元对目标曝光并收集信号电荷, 当积分周期结束时, 信号电荷转移至第二级像元; 在第二个积分周期, 第二级像元在前级转入电荷基础上继续收集同一目标的信号电荷, 当积分周期结束时, 信号电荷再转入第三级像元; 在第三个积分周期, 第三级像元将以同样的方式对同一目标曝光并转移电荷。以此类推, 当最后一个积分周期结束时, 转移到水平

读出 CCD 寄存器中的信号电荷为全部 TDI 像元的积分电荷之和。垂直方向的电荷转移为串行移位方式。每级像元将电荷转出的同时,也接收前级像元转入的下一目标的信号电荷,并在下一个积分周期继续对该目标曝光。因此,每经过一个积分周期,TDI-CCD 将输出一行视频信号。

显然,对于 M 级 TDI-CCD,若积分时间为 T,入射光照度为 H,其输出信号 S 满足

$$S \propto HMT \quad (1)$$

为确保 CCD 输出信号为同一目标的累加信号电荷,TDI 方向像元间的电荷转移速度必须与像元上目标图像的移动速度同步。

3 空间分辨率

CCD 的像元中心间距决定了器件的空间采样频率。设像元中心间距等于像元宽度,若像元宽度为 α ,则空间采样频率为 $1/\alpha$ 。根据奈奎斯特(Nyquist)采样定理,一个 CCD 能够分辨的最高空间频率等于其空间采样频率的一半。这个频率称为奈奎斯特极限频率,表达式为

$$f_N = 1/2\alpha \quad (2)$$

可见,CCD 的极限分辨率是采样频率的二分之一,为 $1/2\alpha$ (线对/mm)。CCD 的分辨率除了取决于像元的几何孔径外,还受到电荷转移效率的影响;如果采用推帚成像方式,还存在像移问题;对于 TDI-CCD 而言,速度失配也会影响分辨率。通常采用调制传递函数(MTF)评价 CCD 的分辨率和成像质量。

影响 TDI-CCD 分辨率的因素主要有四方面:①像元的几何积分孔径;②电荷转移与图像移动的速度失配;③电荷转移离散运动;④电荷转移失效率。

3.1 积分孔径 MTF

像元的几何形状构成了 CCD 的积分孔径,曝光积分过程可以看作一个有限宽度的孔径 α

对一定空间频率 f 的静止波采样。成像结果为输入图像的光强分布函数与成像系统的线扩展函数的卷积。

输入光强分布函数以空间频率为 f 的正弦波光栅作参考

$$I(x) = I_0[1 + M \cos(2\pi f x)] \quad (3)$$

积分孔径的归一化线扩展函数为

$$L(x) = 1/\alpha \quad -\alpha/2 < x < \alpha/2 \quad (4)$$

设像元中心间距等于像元宽度 α ,通过卷积运算,可得积分孔径 MTF_{integ}

$$MTF_{integ} = \sin(\pi \alpha f) / (\pi \alpha f) \quad (5)$$

在奈奎斯特频率(即 CCD 的极限分辨率), $MTF_{integ} = 0.64$ 。

3.2 速度失配 MTF

TDI-CCD 工作需要 TDI(垂直)方向的电荷转移速度和图像运动速度同步,速度失配将导致不同目标的信号电荷相互混合,降低图像分辨率。

对于 M 级 TDI-CCD,设电荷转移和图像移动的平均速度为 ν ,速度失配量为 $\Delta\nu$,则电荷沿 TDI 方向转移 M 次后失配距离为 $M\alpha(\Delta\nu/\nu)$ (设像元中心间距等于像元宽度 α)。只考虑速度失配效应,可看作一个宽度 $M\alpha(\Delta\nu/\nu)$ 的有限孔径采样一定空间频率 f 的静止波。

速度失配的线扩展函数为

$$L(x) = \frac{1}{M\alpha(\Delta\nu/\nu)} \quad -\frac{M\alpha(\Delta\nu/\nu)}{2} < x < \frac{M\alpha(\Delta\nu/\nu)}{2} \quad (6)$$

可求得速度失配 $MTF_{\Delta\nu}$

$$MTF_{\Delta\nu} = \sin\left(\pi \alpha f M \frac{\Delta\nu}{\nu}\right) / \left(\pi \alpha f M \frac{\Delta\nu}{\nu}\right) \quad (7)$$

在奈奎斯特频率,当 $\Delta\nu = 0$ 时, $MTF_{\Delta\nu} = 1$,即速度完全匹配不影响图像分辨率。当 $M(\Delta\nu/\nu) = 2$ 时, $MTF_{\Delta\nu} = 0$ 。通常将 $M(\Delta\nu/\nu) = 2$ 定义为 TDI-CCD 的速度失配容限。

3.3 离散运动 MTF

对于推帚成像, 在 CCD 积分时间内, 相机与景物的相对运动引起图像移动, 其像质影响可以用像移调制传递函数 MTF_{ν} 来计算。

设一个积分周期内, 图像在像敏面上的移动距离为 s , 线扩展函数为

$$L(x) = 1/s \quad -s/2 < x < s/2 \quad (8)$$

可得到

$$MTF_{\nu} = \sin(\pi s f) / (\pi s f) \quad (9)$$

由于像移距离与像元宽度相等 (设像元中心间距等于像元宽度 α), 在奈奎斯特频率, 线阵 CCD 的像移 $MTF_{\nu} = 0.64$ 。

像移问题的实质是: 图像的移动是均匀的, 电荷的转移是离散的。在两次电荷转移的间隔内, 图像移动了一定距离。因此, 对于 TDI-CCD 而言, 即使速度匹配, 仍然存在像移问题。像移 MTF_{ν} 在 TDI-CCD 中也叫做离散运动 MTF_{disc} 。

3.3.1 连续时钟

TDI 方向的电荷转移采用 n 相连续时钟, 电荷每向下传递一个像元宽度经过 n 次转移, 每转移一次的像移距离为 $s = \alpha/n$, 同样求得

$$MTF_{disc} = \sin\left(\frac{\pi \alpha f}{n}\right) / \left(\frac{\pi \alpha f}{n}\right) \quad (10)$$

公式 (10) 表明, MTF_{disc} 随着时钟相数的增加而增大。在奈奎斯特频率, 采用两相、三相、四相连续驱动时钟的 MTF_{disc} 值分别为 0.900、0.955 和 0.974。采用四相连续时钟可以有效消除像移影响。

3.3.2 突发时钟

若电荷转移采用 n 相突发时钟, 电荷转移的几个步骤在很短时间内集中完成, 可等同于一次转移。像移距离 $s = \alpha$ 。相应的 MTF_{disc} 为

$$MTF_{disc} = \sin(\pi \alpha f) / (\pi \alpha f) \quad (11)$$

在奈奎斯特频率, MTF_{disc} 恒为 0.64, 与时钟相数无关。

3.4 转移失效 MTF

电荷转移失效率引起信号电荷衰减和相位漂移:

$$G_n = \exp[-n\varepsilon(1 - \cos 2\pi f \alpha)] \quad (12)$$

$$\Delta\phi_n = n\varepsilon \sin(2\pi f \alpha) \quad (13)$$

ε 为电荷转移失效率, n 为电荷转移总次数, α 为像元宽度 (设像元中心间距与像元宽度相等。)

公式 (12)、(13) 式可直接计算水平方向的转移失效 MTF_{ε} 。TDI 方向的计算公式较复杂, 因为 TDI 方向的电荷转移是累加转移, 在像元阵列中不同地点相加的电荷苞转移次数和相移均不同。一般而言, 采用四相时钟驱动的 100 级 TDI-CCD, 其电荷转移总次数为 400, 若转移失效 ε 为 0.0001, 在奈奎斯特频率, 可求得 TDI 方向的转移失效 MTF_{ε} 为 0.961。目前埋沟道 TDI-CCD 的转移失效率 ε 可达到 10^{-5} , 因此, 转移失效率对分辨率的影响可以忽略。

3.5 像质评价

调制传递函数具有相乘性, 求出各个单项值, 可以得到总的 MTF 值。

对于 TDI-CCD, TDI 方向和水平方向的 MTF 值为

$$MTF_{TDI} = \begin{cases} MTF_{integ,y} \times MTF_{\Delta\nu} \times MTF_{disc,y} \times MTF_{\varepsilon} \\ MTF_{integ,x} \times G_n \end{cases} \quad (14)$$

线性 CCD 以推帚方式成像时, 垂直方向和水平方向 MTF 值为

$$MTF_{line} = \begin{cases} MTF_{integ,y} \times MTF_{\nu} \\ MTF_{integ,x} \times G_n \end{cases} \quad (15)$$

对于埋沟道 CCD 而言, 转移失效率 ε 很小, MTF_{ε} 接近 1, 对像质的影响可以忽略。

由于四相连续时钟可以有效地消除像移, 在速度匹配条件下 ($MTF_{\Delta\nu} = 1$), TDI-CCD 的成像质量优于可比线阵 CCD。

4 噪声限制空间分辨率

TDI-CCD 为高灵敏度成像器件,除了在正常光照度下工作外,还可以在低光照度下应用。在正常照度下,其极限分辨率受到像元几何孔径的限制。在低照度下,噪声将限制分辨率。

4.1 信噪比

对于 M 级 TDI-CCD,若积分时间为 T,像元面积为 A,响应率为 S,图像平均光照度为 H,则收集的光生电荷数 N_s 为

$$N_s = HSAMT/e \quad (16)$$

N_s 为平均电荷数,若景物图像反差度为 C,则有效信号电荷 ΔN_s 为

$$\Delta N_s = CH_s = CHSAMT/e \quad (17)$$

TDI-CCD 中的噪声主要包括背景噪声(光子噪声)、像元区噪声(转移噪声、俘获噪声等)、输出噪声(读出放大电路噪声)等。

光子噪声为入射平均光子数的均方根值,噪声电荷 N_{np} 为

$$N_{np} = (HSAMT/e)^{1/2} \quad (18)$$

像元区噪声与 TDI 级数 M 有关,若每级 TDI 像元引入的噪声为 N_{ni} ,则 M 级像元累加后的噪声为 $M^{1/2}N_{ni}$;输出噪声与 TDI 级数 M 无关,为 N_{nr} ,因而可求得总噪声 N_n 为

$$N_n = (HSAMT/e + MN_{ni}^2 + N_{nr}^2)^{1/2} \quad (19)$$

TDI-CCD 的信噪比 SNR 为

$$SNR = \frac{N_s}{N_n} = \frac{CHSAMT/e}{\sqrt{HSAMT/e + MN_{ni}^2 + N_{nr}^2}} \quad (20)$$

公式表明,当光子噪声或像元区噪声为器件主要噪声时,信噪比 SNR 与 $M^{1/2}$ 成正比;当输出噪声为主要噪声时,信噪比 SNR 与 TDI 级数 M 成正比。

4.2 分辨率

在正常照度下,CCD 具有一定的信噪比,

不会影响器件的极限分辨率;当照度降低时,信噪比减小,如果信噪比低于一定数值,几何孔径确定的极限分辨率就不能保证。公式(20)表明,信噪比随像元面积的增大而增大,因此,将几个相邻像元的信号累加,可以提高信噪比,但损失了空间分辨率。观看图像时,人眼响应也有类似的累加效应。如果单个像元的信噪比过低,人眼将对几个相邻像元的信号进行累积响应,实际观察到的图像最小特征将大于几何孔径确定的理论值。

CCD 的极限分辨率为采样频率的二分之一,若像元尺寸为 α ,则分辨率为 $1/2\alpha$ (线对/mm)。低照度下噪声限制的 TDI-CCD 分辨率 R 为

$$R = \frac{1}{2\alpha} \cdot \frac{SNR}{K} = \frac{1}{2\alpha} \cdot \frac{CHSAMT/e}{K(HSAMT/e + MN_{ni}^2 + N_{nr}^2)^{1/2}} \quad (21)$$

公式(19)的限制条件为 SNR/K 不大于 1。 K 为分辨最小图像特征所必须满足的信噪比要求。对于较细的图案, K 选取 3—5,对于较粗的图案, K 接近于 1。若 SNR/K 大于 1,CCD 的分辨率仍由几何孔径限制为 $1/2\alpha$;若低照度下 SNR/K 小于 1,噪声限制的分辨率将小于 $1/2\alpha$ 。

在低照度下,TDI-CCD 的分辨率与级数 M 有关,当光子噪声或像元区噪声为主要噪声时,分辨率与 $M^{1/2}$ 近似成正比;当输出噪声为主要噪声时,分辨率与级数 M 近似成正比。对于埋沟道 TDI-CCD,输出噪声尤其是读出电路的复位噪声是器件的主要噪声,因此,噪声限制的 TDI-CCD 分辨率与级数 M 近似成正比。

对于一般线阵 CCD 而言,其噪声限制的分辨率为

$$R = \frac{1}{2\alpha} \cdot \frac{SNR}{K} = \frac{1}{2\alpha} \cdot \frac{CHSAMT/e}{K(HSAMT/e + N_{ni}^2 + N_{nr}^2)^{1/2}} \quad (22)$$

比较公式(21)、(22),显然,在噪声限制条件下,TDI-CCD 比一般线阵 CCD 具有更高的分辨率,提供了更好的低光照度扫描特性。

5 结束语

TDI-CCD 在不牺牲空间分辨率的前提下，大幅度提高了输出信号强度。在推帚成像模式中，其空间分辨率受到像元几何孔径、速度失配、电荷转移失效和离散运动的影响。而且，采用四相连续时钟，可以有效地消除推帚成像带来的像移问题，在速度匹配条件下，TDI-CCD 的成像质量要优于线阵 CCD。

在低光照度下，TDI-CCD 的分辨率将受到噪声限制，实际分辨率将低于像元几何孔径确定的极限分辨率。噪声限制下的分辨率与 TDI 级数有关。级数越多，分辨率越高。在低照度

下，TDI-CCD 的分辨率要优于线阵 CCD。作为高灵敏度 CCD 成像器件，TDI-CCD 提供了优良的低光照度扫描特性。

参考文献

- [1] CCD Image Sensors Databook 1996-1997, DALSA INC, Canada.
- [2] D. F. Barbe, Time Delay and Integration Image Sensors, in Solid State Imaging, The Netherlands: Nordhoff, 1976, 659-671.
- [3] S. G. Chamberlain et. al., High Speed, Low Noise, Fine Resolution TDI CCD Image Sensors, SPIE Proc. Vol 1242, 252-262, Feb, 1990.

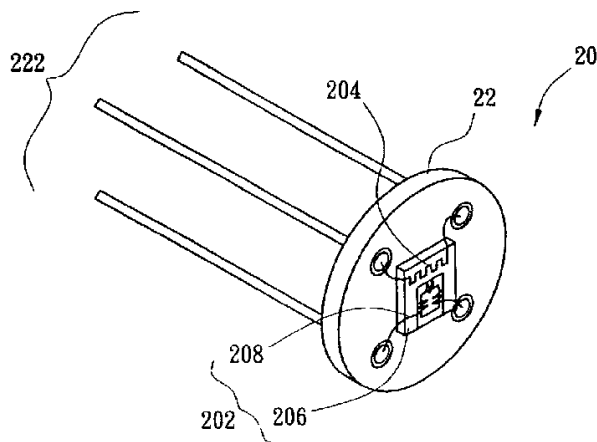
· 国外专利介绍 ·

温度计的红外探头

美国专利 US6076962
(2000 年 6 月 20 日公布)

本发明提供一种可供温度计使用的红外探头，该红外探头包括一个可以直接探测温度的传感器装置，它可以减少探测热波时产生的测量误差，从而使测量变得更精确。传感器装置内装有一个红外传感器和一个温度传感器，由于它去除了普通传感器中所使用的波导管，因而其成本被降低了。

本专利文献共 5 页，其中有 2 张插图。



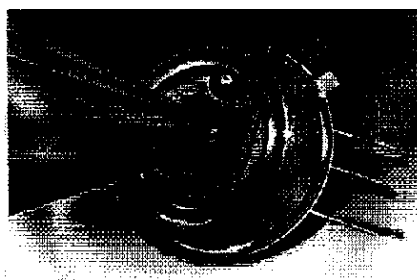
高 编译

· 简 讯 ·

波长传感器

美国太平洋硅传感器公司推出了一种型号为 PSS-WS-7.56 的波长传感器。这种独特的传感器的工作波长范围为 450 nm 至 900 nm，它能测定单色光（如激光器或发光二极管发出的光）的实际波长，并能测定包含许多波长的光的光谱峰值。其测量是通过对进入两个互相叠合的硅光电二极管结的光进行比较完成的。顶层结吸收较短的波长（如，蓝光），并传递较长的波长（如，红光）。两种输出的商与入射波长成正比。在出现饱和之前，这是与光强度无关的。该传感器的光敏

面积为 7.56 mm²，它装在一个密封的 TO-5 外壳内。其应用包括：激光器测试、发光二极管筛选、分析仪器以及颜色匹配等。这种波长传感器的库存单价为 43 美元。



□ 高国龙