

TDICCD 亚像元技术应用于小相对孔径光学系统*

李相国 汶德胜 王华 卓越

(中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710068)

摘要 TDI CCD 器件和亚像元成像技术都是实现相机小型化的有效途径, TDI CCD 器件和亚像元成像技术结合应用于小相对孔径光学系统具有重要的应用价值. 就成像系统需要满足 Nyquist 频率处静态传函 ≥ 0.2 条件对系统进行了分析、讨论, 并就设计中引入信噪比指标提出了一点建议.

关键词 TDI CCD; 亚像元成像; 调制传递函数

中图分类号 TP702 **文献标识码** A

0 引言

在推扫式线阵 CCD 光学遥感器中, 当采用常规 CCD 时, 由于需要满足一定的曝光量要求, 一般需要配以大相对孔径 ($> 1/4$) 的光学系统, 因而相机的体积和重量都比较大^[1]. 若采用 TDI CCD 器件, 由于 TDI CCD 的高灵敏度, 使得可以应用小相对孔径 ($1/8 \sim 1/20$) 的光学系统. 引入亚像元成像技术, 可以在 CCD 像元大小及间距受限的情况下, 提高获得图像的分辨率. TDI CCD 器件和亚像元成像技术相结合应用于小相对孔径光学系统, 可以明显减小相机的体积和重量, 减小航天发射综合成本.

本文介绍了 TDI CCD、亚像元成像技术, 并对 TDI CCD 器件结合亚像元成像技术应用于小相对孔径光学系统的系统性能进行了分析、讨论.

1 TDI CCD 成像器件

TDI (Time Delay and Integration) 也称作延迟相加或者图像运动补偿模式. TDI CCD 阵列像元是一个面阵结构, TDI CCD 通过目标和相机之间在 TDI 方向上的相对运动及阵列像元内电荷包的行转移速度和像面上像的移动速度相对静止来实现对同一目标进行多次扫描. 当每一次电荷包行转移时刻到来时, 在转移时钟信号作用下, 垂直于推扫方向上每一行像元的电荷包转移到其下一行的同一列像元上去, 最后一行像元的电荷包转移到移位寄存器内依次经过读出电路输出. 可以看出, 每一次电荷包行转移时转移到某一像元的电荷量是同一列上位于其前面的所有像元对同一目标在不同积分时间段内的积分电荷量之和, 转移到移位寄存器某一单元内的电荷量等于阵列对应某一列内所有像元对其对应目标的积分电荷量之和, 所以, TDI CCD 对同一目标进

行多次扫描积分, 相当于增加了 CCD 像元的积分时间, 降低了输出信号的噪声水平, 从而提高了获得图像信号的信噪比.

对于 N 级 TDI CCD 器件, 每个等效像元有如下关系^[2]: $S \propto NET, r_{\text{integ}} = VT$. 其中 S 为像元输出信号电压, E 为像元输入照度, T 为单个像元积分时间, r_{integ} 为推扫方向上积分时间引起的积分孔径大小 (r_{integ} 的大小影响了推扫方向上的地元分辨率), V 为像元投影到物面的运动速度. 可见, 由于引入了多级积分因子 N , 提高了等效积分时间, 解决了弱光条件下成像问题, 使得可以应用小相对孔径的光学系统, 同时解决了在弱光条件下提高输出信号信噪比 (即延长像元积分时间) 和空间分辨率降低 (即 r_{integ} 变大) 的矛盾^[2]. 分析可以知道, TDI CCD 输出信号信噪比提高为单级积分元的 \sqrt{N} 倍; 而且, 积分级数 N 可以调节, 增加了 TDI CCD 使用的灵活性.

对于 TDI CCD 器件, 电荷包行转移速度需要和目标运动速度比较严格的同步, 否则, 两者的速度失配因子将影响系统性能, 直接影响推扫方向上的地元分辨率.

2 亚像元成像技术

亚像元成像的一个实现原理如图 1^[3]. 分光棱镜把成像光等分成两路, 分别成像于放置在像面位置的两路线阵 CCD 上, 这两路 CCD 沿垂直轴线平行放置, 在垂直轴线方向上错开半个像元间距. 显

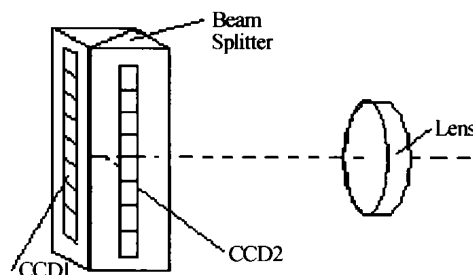


图1 亚像元成像原理图

Fig. 1 Sketch for sub-pixel imaging principle

然,这两路成像 CCD 相互独立,所以,可以同时获得同一目标的两幅不同的采样图像.对获得的两幅图像进行数据融合处理,可以获得垂直扫描方向上分辨率提高近一倍的新图像.

在阵列方向上,线阵 CCD 完成像元对输入强度函数的积分功能和像元位置点上的采样功能.亚像元通过多片线阵 CCD 获取同一目标景物的不同采样图像.对于图 1 所示两片 CCD 情形,以 CCD1 为基准,设 CCD 像元的点扩展函数为 $h(x)$, CCD 像元大小为 d , 间距为 p , 像面图像强度分布函数为 $s_{cn}(x)$. 则 CCD1 输出为

$$i_{ccd1}(x) = [h(x) * s_{cn}(x)] \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(x - np) \quad (1)$$

CCD2 输出为

$$i_{ccd2}(x) = [h(x) * s_{cn}(x)] \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(x - np - p/2) \quad (2)$$

在相差 $p/2$ 理想状态下,数据融合输出为

$$i_{subpixel}(x) = [h(x) * s_{cn}(x)] \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(x - np) + [h(x) * s_{cn}(x)] \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(x - np - p/2) \quad (3)$$

由于

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(x - np) + \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(x - np - p/2) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(x - np/2)$$

所以,可以得到^[4]

$$i_{subpixel}(x) = [h(x) * s_{cn}(x)] \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(x - np/2) \quad (4)$$

对式(4)取傅里叶变换,有

$$I_{subpixel}(u) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} H(u - 2n/p) S_{cn}(u - 2n/p) \quad (5)$$

对于普通 CCD 即 CCD1 或 CCD2 输出,有

$$I_{ccd}(u) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} H(u - n/p) S_{cn}(u - n/p) \quad (6)$$

下面对式(5)、(6)进行比较,不考虑式中 $S_{cn}(u)$ 项.取像元填充因子为 100%,即 $d = p$,可以得出, $H(u) = \text{sinc}(ud)$, 其中 $\text{sinc}(x) = \sin(\pi x) / \pi x$, 如图 2.

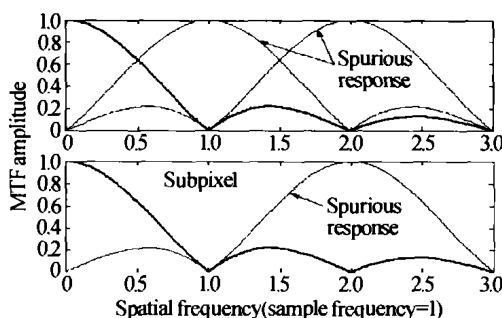


图 2 普通 CCD 系统与亚像元系统响应函数比较
Fig. 2 Comparison of response function between normal CCD and sub-pixel imaging systems

由图 2 可以看出,亚像元系统和普通 CCD 系统

相比,前者的输出信号频谱得到了展宽,采样引起的频谱混迭效应明显减小.上述分析过程没有考虑光学系统所具有的空间频率上的低通特性,然而,后面可以看到,光学系统的空间截止频率大于 CCD 的采样频率,即上述分析结果是成立的.需要说明的是,图(1)结构还有两片 CCD 的其它布置方式,可以同时提高其它方向上的分辨率.所以,在单片 CCD 像元大小及采样间隔受限的情况下,采用亚像元技术及数据融合处理,提高了系统的等效采样频率,从而扩展了系统获取信号的频谱,减小了采样频谱混迭效应及提高了输出信号的信噪比;最终提高了整个成像系统的成像质量.

在亚像元结构中,通过棱镜分光到达每一路线阵 CCD 的光强减弱一倍,但由于使用了 TDI CCD 器件,光强的损失可以通过 TDI 进行补偿,所以棱镜分光对光学系统要求没有大的影响.亚像元成像有如下特点:每一路 CCD 都产生一幅独立的图像,对于分辨率要求低的场合,每一路都可以满足要求,即使用其中的任何一路 CCD 的输出都可以等价于普通 CCD 相机输出;采用亚像元成像技术来取代同一分辨率的成像系统,则光学系统的焦距可以相应的减小,从而减轻了光学系统的体积重量,实现相机的小型化.

3 TDI CCD 亚像元技术应用于长焦距小相对孔径光学系统

通过 TDI 技术,使用 TDI CCD 解决了弱光条件下成像问题,从而使得小相对孔径光学系统并配以亚像元成像技术能够实现.

调制传递函数用来衡量一个成像系统在空间频率上的对比度传输能力,是评价相机系统的一项关键指标.一般要求星载成像系统在 Nyquist 频率处的静态传递函数值 $MTF(u_N) \geq 0.2$ ^[1].

如前所述,亚像元成像技术扩展了获取数据的有效频谱,同时明显地减小了采样混迭效应,从下面有关数据可以看出,绝大多数 CCD 成像系统均为欠采样系统,也就是说,亚像元成像技术的引入对于提高系统成像质量是十分有效的.然而,在该成像系统中,直接成像的是两路相互独立的 CCD 系统,成像系统输出的是两路独立的图像,所以,尽管引入了亚像元成像技术,系统的 Nyquist 频率仍按单路 CCD 成像计算,也就是说,任一单路 CCD 成像需要满足静态传函要求.这里选用的单路 CCD 像元大小及间隔为 $10 \mu\text{m}$, 所以 $u_N = 50 \text{ lp/mm}$.

TDI CCD 相机系统调制传递函数可以表示为

$$MTF_{\text{sys}}(u) = MTF_{\text{optics}}(u) \times MTF_{\text{CCD}}(u) \times$$

$$MTF_{\text{defocus}}(u) \times MTF_{\text{process}}(u) \times MTF_{\text{display}}(u) \quad (7)$$

静态传函是指有效载荷没有任何运动时的传递函数数值,主要由光学系统和 TDI CCD 系统决定^[1],并考虑离焦影响因素及 CCD 装配准确度对亚像元数据融合的影响.

3.1 光学系统的 MTF

对于理想的圆孔径无遮拦光学系统,MTF 理论值可按式计算

$$MTF_{\text{opt}}(u) = \frac{2}{\pi} \left[\cos^{-1} \left(\frac{u}{u_{\text{oc}}} \right) - \frac{u}{u_{\text{oc}}} \sqrt{1 - \left(\frac{u}{u_{\text{oc}}} \right)^2} \right] \quad (8)$$

式中 $u < u_{\text{oc}}$. u_{oc} 为光学截止频率, $u_{\text{oc}} = 1/\lambda F$, F 为相对孔径(入瞳直径与镜头焦距之比)的倒数, λ 为可见光平均波长,取 $\lambda = 0.65 \mu\text{m}$.

CCD 器件是离散采样系统,按照 Shannon 采样

表 1 光学系统不同 F 数下 u_{oc} , I_0 及 MTF 理论值

F	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
u_{oc}	192.3	170.9	153.8	139.9	128.2	118.3	109.9	102.6	96.2	90.5	85.5	81.0	76.9
I_0	0.520	0.585	0.650	0.715	0.780	0.845	0.910	0.975	1.040	1.105	1.170	1.235	1.300
$MTF_{\text{out}}(u_N)$	0.6727	0.6330	0.5936	0.5547	0.5163	0.4785	0.4413	0.4048	0.3691	0.3342	0.3001	0.2670	0.2351

从表 1 可以看出:1) MTF_{opt} 在 Nyquist 频率处数值是 F 数的单调递减函数,也就是说,存在满足静态传函条件的最大 F 数. 通过全部子系统 MTF_i 的计算,可找到满足静态传函条件的最大 F 数. 2) 在所列 F 数下,所有的 I_0 均小于 2. 由采样定理可知, $I_0 \geq 2$ 时,单路 CCD 输出才没有混迭失真,若 $I_0 < 2$ 则亚像元技术有提高图像质量的可能, $I_0 < 1$ 则说明系统中采用亚像元技术对于提高成像质量将是十分有效的.

所有的实际光学系统,由于受设计、制造、装配及环境因素的影响,实际存在的相差,有的还有遮拦,都会引起 MTF 的下降^[1]. 通常取影响因子为 0.8~0.90,考虑设计余量,这里取 0.8. 所以

$$MTF_{\text{optics}} = 0.8 \times MTF_{\text{opt}}$$

3.2 TDI CCD 系统的 MTF

TDI CCD 系统的 MTF 由像元的几何特性 MTF 及电特性 MTF 组成^[6]. 前者来自具有一定大小像元的积分特性,后者来自电荷包的转移特性.

一个像元的 MTF 理论上可以表示为 $MTF_{\text{integ}}(u) = \text{sinc}(ud)$, d 为像元大小,这里像元大小及间距相等: $d = p = 10 \mu\text{m}$. 可以计算得到, $MTF_{\text{integ}}(u_N) = 0.6366$.

由于电荷包转移的离散性与像移连续性的差异即两者不严格同步,引起 CCD 系统推扫方向上 MTF 下降,有关系 $MTF_{\text{DCT}}(u) = \text{sinc} \left(\frac{u}{2u_N} \frac{1}{n_\phi} \right)$,其中 n_ϕ 为每级转移相位数. 取 $u = u_N$,可以计算得到:

定理,CCD 采样频率 u_s 只有大于光学截止频率 u_{oc} 的二倍,才有可能理论上无失真的恢复出相应的模拟输入信号,否则,高于 Nyquist 频率的高频分量会映射到低频分量上去,产生频谱混迭效应. 为描述采样系统的混迭效应,引入描述采样混迭效应的图像质量因子 I_0 定义为^[5]

$$I_0 = \frac{u_s}{u_{\text{oc}}} = \frac{1/p}{1/\lambda F} = \frac{\lambda F}{p} \quad (9)$$

可以看出,在 CCD 像元间隔 p 和可见光平均波长 λ 确定情况下,质量因子 I_0 是光学系统 F 数的单值函数.

可以计算出光学系统在不同 F 数下的光学截止频率 u_{oc} 、质量因子 I_0 及在 Nyquist 频率处的 $MTF_{\text{opt}}(u_N)$ 值,如表 1 所示.

$MTF_{\text{DCT}} = 0.9003 (n_\phi = 2)$, $MTF_{\text{DCT}} = 0.9549 (n_\phi = 3)$, $MTF_{\text{DCT}} = 0.9745 (n_\phi = 4)$. 这里取 $MTF_{\text{DCT}} = 0.9745 (n_\phi = 4)$.

电荷在转移过程中的损失即衡量这种损失程度的电荷转移损失率 ε 也影响推扫方向上 CCD 系统的 MTF,可以表示为^[2]

$$MTF_\varepsilon(u) = \frac{1}{N(a^2 + b^2)} \left(\{ a - e^{(-Na)} [a \cos(Nb) - b \sin(Nb)] \}^2 + \{ b - e^{(-Na)} [a \sin(Nb) + b \cos(Nb)] \}^2 \right)^{1/2} \quad (10)$$

其中, $a = \varepsilon [1 - \cos(\pi u/u_N)]$, $b = \varepsilon \sin(\pi u/u_N)$, ε 为电荷转移损失率, N 为电荷包转移次数. 以 $\varepsilon = 0.00001$, $M = 96$ 级 $n_\phi = 4$ 即 $N = 96 \times 4$ 计算, $MTF_\varepsilon(u_N) = 0.996$,可以看出,实际 CCD 器件的电荷转移损失率对 MTF 的影响可以忽略不计.

所以,可以计算得到 CCD 系统 $MTF_{\text{CCD}} = 0.6204$.

3.3 离焦

离焦也会引起相机 MTF 的下降,计算公式可以表示为: $MTF_{\text{defocus}} = 2J_1(x)/x$,其中 J_1 为一阶贝塞尔函数, $x = \pi u \Delta (1 - u \lambda F)/F$, Δ 是离焦量. 可以取 $MTF_{\text{defocus}} = 0.90$.

3.4 装配准确度影响

由于采用了亚像元结构,理论上,两片 CCD 在垂直轴线上应该错开半个像元间距,由于实际的装配误差,会引起最终亚像元数据融合质量下降. 把该影响因子折算到成像系统中,以 1/5 像元误差为

实际误差极限,影响因子为 0.9511.

所以,可以计算整个光学系统的静态传递函数在 Nyquist 频率处值

$$MTF_{sys} = MTF_{optics} \times MTF_{CCD} \times MTF_{defocus} \times Factor_{assemble}$$

如前所述,光学系统的 MTF 是 F 数的单调递减函数,可以计算得: $MTF_{sys} = 0.2193 (F = 12)$; $MTF_{sys} = 0.2033 (F = 13)$; $MTF_{sys} = 0.1875 (F = 14)$. 可以看出:在满足 Nyquist 频率处的静态传递函数值 $MTF(u_N) \geq 0.2$ 的条件下,最大可取 $F = 13$,此时光学截止频率等于 118 lp/mm, $I_0 = 0.845$,即 TDI CCD 结合亚像元技术可以应用于小相对孔径光学系统.

4 小结

通过上述分析,可以得到:TDI CCD 器件的引入,使得可以在弱光条件下使用小相对孔径光学系统,结合亚像元成像技术,可以获得高分辨率图像输出. 上述计算表明,该系统完全符合设计要求.

从上文可以看出,由于 CCD 成像系统存在欠采样过程,因而存在频谱混迭效应,对输出图像信号的

信噪比构成很大影响. 所以, Nyquist 频率处系统静态传函条件没有包括信噪比要求,如果再加进去信噪比条件要求,系统设计将更合理.

参考文献

- 1 杨秉新. TDI CCD 相机的相对孔径与器件像元尺寸关系的研究. 航天返回与遥感, 2001, 22(2): 9 ~ 12
Yang B X. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2001, 22(2): 9 ~ 12
- 2 Wong H S, Yao Y L, Schlig E S. TDI charge-coupled devices: design and applications. IBM J Res Develop, 1992, 36(1): 83 ~ 106
- 3 车双良, 汶德胜. 亚像元动态成像系统空间分辨率研究. 光子学报, 2001, 30(11): 1418 ~ 1419
Che S L, Wen D S. Acta Photonica Sinica, 2001, 30(11): 1418 ~ 1419
- 4 Vollmerhausen R H, Driggers R G. Analysis of Sampled Imaging System. SPIE PRESS, 2000. 117
- 5 朱敏, 金伟其. JZ-1 星座 CCD 摄像机光学系统 F 数的选择. 光学技术, 2002, 28(6): 485 ~ 487
Zhu Min, Jin Weiqi. Optical Technique, 2002, 28(6): 485 ~ 487

Application of TDI CCD and Sub-pixel Imaging Technique to Smaller Relative Aperture Optical Systems

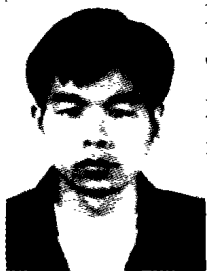
Li Xiangguo, Wen Desheng, Wang Hua, Zhuo Yue

Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Academia Sinica, Xi'an 710068

Received date: 2003-07-16

Abstract Both TDI CCD and sub-pixel imaging technique are effective methods to minimize the Camera, and it's of practical value to combine these two techniques together to implement a smaller relative aperture optical system. A systematic analysis and discussion is made under the rule that the value of static Modulation Transfer Function at Nyquist frequency be equal to or more than 0.2, a suggestion of introducing SNR to imaging system design is proposed.

Keywords TDI CCD; Sub-pixel imaging; MTF



Li Xiangguo received the BS degree in signal and information processing from Harbin Institute of Technology in 2001. He is currently pursuing master degree in communication and signal processing in Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS. His research is the area of image processing.