

航天 TDI-CCD 亚像元相机的 MTF 研究

张 毅^{1,2} 李英才¹ 王 虎^{1,2}

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710068)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘 要 讨论了不同步采集和偏流角带来的像移对航天 TDI-CCD 亚像元相机系统相机调制传递函数的影响. 通过对成像工作方式中所产生的速度失配和方向失配的调制传递函数影响的分析, 得出了提高相机采集同步精度和消除偏流角的方法.

关键词 TDI-CCD; 亚像元; MTF

中图分类号 **文献标识码** A

0 引言

航天遥感器的轻小型化和高分辨率, 是遥感卫星和遥感技术发展的重点. 把 TDI-CCD 器件和亚像元动态成像技术相结合是目前国际上实现这一要求的有效的新的方法.

TDI-CCD 器件通过多级时间积分来延长积分曝光时间, 可以实现对同一景物多次曝光, 不仅提高了相机的灵敏度和信噪比, 而且降低了光能量对相机相对孔径的要求, 有利于降低重量和成本. 相对于同样的线阵 CCD 相机而言, 由于 M 级的积分, TDI-CCD 相机的光能量利用率提高 M 倍, 信噪比提高 \sqrt{M} 倍.

亚像元动态成像技术是利用分光棱镜将光等分成两路, 分别将景物成像在焦面位置的两排长线阵 CCD 上(两排线阵在线阵方向错开半个像元), 这样两排 CCD 在同一视场上获得两幅图像, 把两幅图像进行一系列处理, 可以得到分辨率提高了一幅新图像.

相机调制传递函数(MTF)反映了相机摄影时的空间频率和图像对比度的关系, 是评价相机性能的一项关键指标, 主要考虑 Nyquist 频率下的 MTF 值. 影响成像系统的 MTF 因素很多, 本文主要讨论由于不同步采集和偏流角带来的像移对系统 MTF 的影响^[1~4], 其它方面的影响暂且不考虑.

1 速度失配和方向失配

TDI-CCD 在工作中, 由于 TDI 方向电荷转移速度与像速度不可能严格同步, 从而造成 TDI 方向上的像移. 使成像模糊, 降低成像系统的 MTF. 推荐的速度同步精度 1%~4%.

在空间中, 对航天相机来说被摄目标的速度基

本上是地球表面自转速度和星下点速度的合速度^[5], 如图 1.

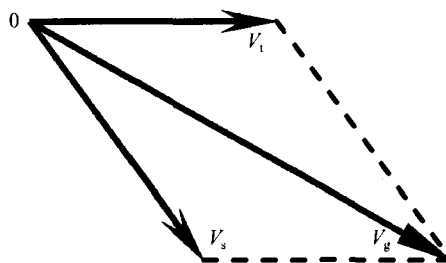


图 1 目标速度的合成

Fig. 1 Synthesis of target speed

图中 V_t 为地球表面自转速度; V_s 为星下点速度; V_g 为被摄目标速度, 即相机的推扫方向.

如图 2, V_g (推扫方向) 和 TDI 积分方向的夹角

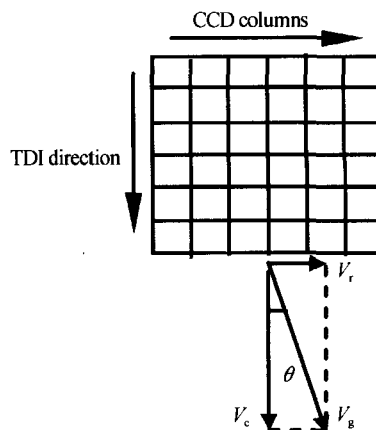


图 2 偏流角

Fig. 2 Drift angle

θ 即为偏流角. 通常情况下, 偏流角是个很小的值.

$$\theta = \arctan \left[\frac{V_r}{V_c} \right] \quad (1)$$

式中 V_r 为 V_g 在 CCD 行方向的速率分量, V_c 为 V_g 在 TDI 积分方向的速率分量.

2 TDI-CCD 亚像元相机的 MTF

TDI-CCD 分辨率是对景物细节的分辨能力, 由

所能分辨的最高空间频率表示, 单位为 lp/mm. 由 Nyquist 采样定理知, TDI-CCD 理论上所能分辨的最高空间频率就是它的空间采样频率 f_{sp} 的一半, 即 Nyquist 频率 f_{Nq} . 假设 TDI-CCD 像元间隔为 p (长和宽相同), 则

空间采样频率

$$f_{sp} = \frac{1}{p} \quad (2)$$

Nyquist 采样频率

$$N_{Nq} = \frac{1}{2p} \quad (3)$$

TDI-CCD 本身是一个矩形采样函数, 则亚像元成像系统的 MTF 是

$$MTF(u, v) = MTF_{\text{column}} \cdot MTF_{\text{row}} = \sin c(pu) \cdot \sin c(pv) \quad (4)$$

图 3 给出了 TDI-CCD 亚像元成像系统的三维 MTF 曲线.

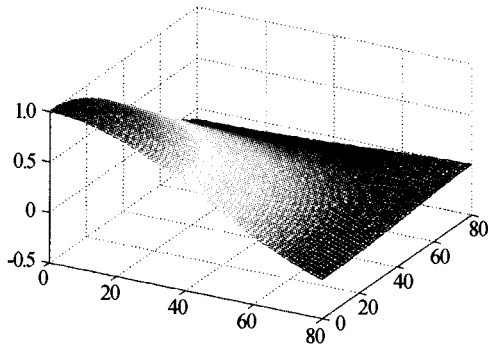


图 3 TDI-CCD 亚像元成像系统三维 MTF
Fig. 3 3-D MTF of TDI-CCD imaging system

由于速度的不同步和偏流角造成的像移, 对 TDI-CCD 亚像元成像系统的 MTF 引起退化. 速度失配造成的像移是在 TDI 积分方向上. 速度失配引起的 MTF 退化为

$$MTF'_{\text{column}}(u) = \frac{\sin \left[\frac{\pi}{2} \frac{u}{f_{Nq}} M \cdot d \right]}{\frac{\pi}{2} \frac{u}{f_{Nq}} M \cdot d} \quad (5)$$

式中: M 为 TDI 级数; $d = \frac{\Delta V}{V_i}$ 为同步准确度, ΔV 为像扫描速度与 TDI 电荷转移速度差; $V_i = f(V/H)$ 为像扫描速度, V 为卫星飞行速度, H 为摄影高度, f 为焦距.

以 Dalsa 公司的 IT-F2 型 TDI-CCD 作为例子, 级数 $M=96$, 像元尺寸为 $13 \mu\text{m} \times 13 \mu\text{m}$, 像元尺寸和像元间隔相同. 图 4 仅考虑的是速度失配时, 不同的同步精度对在 TDI 积分方向的 MTF 影响曲线.

TDI 作用会增大速度失配对 MTF 的影响, 在速度失配因子 $M \cdot d \leq 2$, 速度失配影响是可以接受的, 因此, $M \cdot d = 2$ 成为 TDI-CCD 的一个重要设计

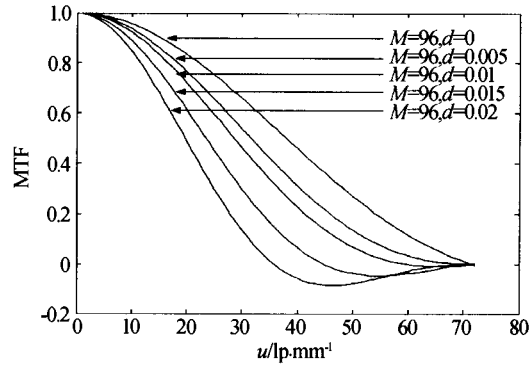


图 4 速度失配引起的 MTF 退化 ($u=v$)
Fig. 4 Degraded MTF by velocity mismatching ($u=v$)

依据. 级数越多, 对运动速度的同步准确度要求越高, 若 TDI-CCD 工作于 96 级, 那么要求速度的同步准确度为 $d < 2.08\%$. 从图 4 可以看出 $d=0.02$ 时, 相机的 MTF 值在 Nyquist 频率时已经下降为 0 了. 由此可见, 实际工作中, 应该尽量减少速度失配引起的 MTF 下降.

方向失配造成的像移主要是在 CCD 行方向上, 对于 TDI 积分方向上的影响很小, 可以忽略不考虑. 方向失配对 MTF 的影响

$$MTF'_{\text{row}}(v) = \frac{\sin \left[\frac{\pi}{2} \frac{v}{f_{Nq}} M \tan \theta \right]}{\frac{\pi}{2} \frac{v}{f_{Nq}} M \tan \theta} \quad (6)$$

采用同型号的 TDI-CCD, 图 5 仅考虑的是方向失配时, 不同的偏流角对在 CCD 行方向的 MTF 影响曲线.

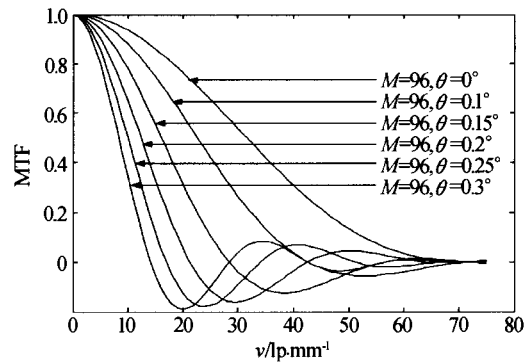


图 5 方向失配引起的 MTF 的退化 ($u=v$)
Fig. 5 Degraded MTF by misalignment ($u=v$)

通常情况, 偏流角是个很小的值 ($0^\circ \sim 0.3^\circ$). 从图 5 可以看出, 偏流角越大, 对图像质量的影响越大; 在积分级数 $M=96$ 的情况下当偏流角 $\theta=0.15^\circ$ 时, 相机的 MTF 值在 Nyquist 频率时已经下降为 0 了. 因此必须消除偏流角, 以便能获得高质量的图像.

图 6 是同时考虑了速度失配和方向失配时, 在同步精度 $d=0.015$, 偏流角 $\theta=0.2^\circ$, 积分级数分别为 64、96 情亚像元成像系统的 MTF 是

$$MTF(u, v) = MTF'_{\text{column}} \cdot MTF'_{\text{row}} \quad (7)$$

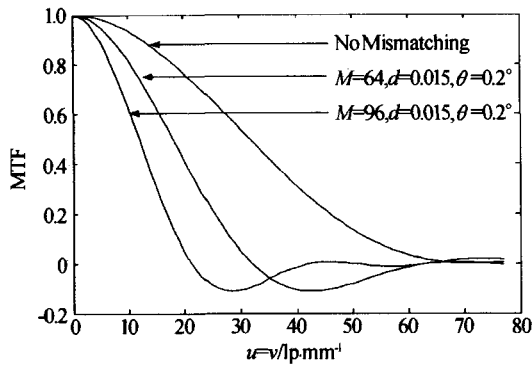


图6 速度失配和方向失配共同引起 MTF 退化($u=v$)
Fig. 6 Degraded MTF by misalignment & velocity mismatching($u=v$)

图7是 $d=0.015$,偏流角 $\theta=0.2^\circ$, $M=64$ 情况下 TDI-CCD 亚像元成像系统的三维立体 MTF 曲线。

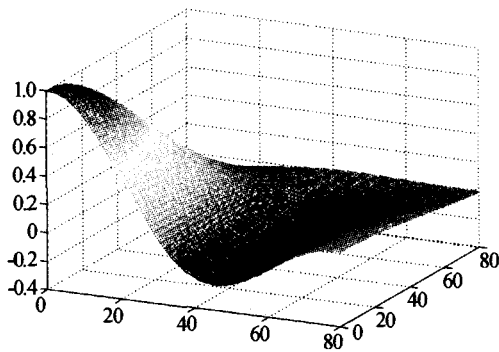


图7 TDI-CCD 亚像元成像系统退化的三维 MTF
Fig. 7 3-D degraded MTF of TDI-CCD imaging system

4 结论

由于 TDI-CCD 亚像元相机的特殊工作方式,

速度失配和方向失配对成像质量的影响十分明显,速度的不同步对 TDI 积分方向的影响敏感,方向失配对 CCD 行方向的影响敏感. 为了达到理想的成像要求,必须采用一定的技术把速度匹配精度和方向匹配精度控制在必要的范围内.

参考文献

- 1 郝云彩,杨秉新. 航天线阵 CCD 相机推扫成像过程的像质研究. 光子学报,1998,27(7):639~644
Hao Y C, Yang B X. *Acta Photonica Sinica*, 1998, 27(7):639~644
- 2 刘新平,王虎,汶德胜. 亚像元线阵 CCD 焦平面的光学拼接. 光子学报,2003,31(6):781~784
Liu X P, Wang H, Wen D S. *Acta Photonica Sinica*, 2003,31(6):781~784
- 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):1418~1420
Che S L, Wen D S. *Acta Photonica Sinica*, 2001,30(11):1418~1420
- 4 张平,王凌,冯华君,等. 基于多次成像的分辨率提高算法研究. 光子学报,2003,32(2):192~194
Zhang P, Wang L, Feng H J, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003,32(2):192~194
- 5 李友一. 空间相机中的偏流角控制. 光学精密工程, 2002,10(4):402~406
Li Y Y. *Optics and Precision Engineering*, 2002,10(4):402~406
- 6 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

Analysis of the MTF of the TDI-CCD Camera

Zhang Yi^{1,2}, Li Yincai¹, Wang Hu^{1,2}

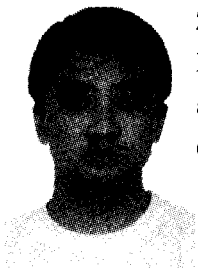
1 Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068

2 Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039

Received date: 2005-01-13

Abstract TDI-CCD Subpixel dynamic imaging technology was a valid novel approach for meeting the requirements of high-resolution and lightweight of remote sensing cameras. Because of its special work method, the affect of velocity mismatch and misalignment was unavoidable. Through analyzing the effect on MTF, the result shows that it is very important to improve quality of imaging through improving the synchronous accuracy and reducing the drift angle.

Keywords TDI-CCD; Sub-pixel; MTF



Zhang Yi was born in 1977. He received his B. S degree from the Northwestern Polytechnical University in 2000. Now he is a master candidate in the Space Optics Lab of Xi'an Institute of the Optics and Precision Mechanics. His research work focuses on image quality measure and image processing.