

文章编号 1004-924X(2013)08-2195-06

遥感相机动态调制传递函数与时间延迟 积分 CCD 行周期误差的关系

郭汉洲¹, 吕恒毅², 曲利新^{2*}

- (1. 长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022;
2. 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:考虑推扫式遥感相机中的时间延迟积分(TDICCD)行周期误差对成像动态调制传递函数(MTF)影响较大,且积分级数越高影响越大,本文分析并推导了存在行周期误差时 TDICCD 推扫成像的动态 MTF 数学模型并进行了仿真验证。首先,介绍了典型的 TDICCD 的电荷行转移时序,分析并推导了该时序下单级和多级积分级数时的采样窗口函数以及该时序下 TDICCD 的行周期误差率与动态 MTF 之间的精确函数关系,并指出本文推导的精确函数比传统函数多一个非线性参量。然后,进行了仿真实验。结果表明:行周期误差率 $\Delta T/T=0$ 时,该时序下的 TDICCD 在 Nyquist 频率下的动态 MTF 为静态 MTF 的 0.632 5 倍(TDICCD 相数 $b=4$),显示得到的动态 MTF 与行周期误差率关系曲线较传统方法得到的曲线有明显差异且动态 MTF 值要高于后者。最后,给出了在不同积分级数下、5% 动态 MTF 下降率指标要求时的行周期误差率最大容许值。

关键词:遥感相机;时间延迟积分 CCD;行周期误差;动态调制传递函数

中图分类号:V443.5 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20132108.2195

Relation of line transfer period error and dynamic MTF of TDICCD in remote sensing camera

GUO Han-zhou¹, LÜ Heng-yi², QU Li-xin^{2*}

- (1. College of Opto-electronic Engineering, Changchun University of
Science and Technology, Changchun 130022, China;
2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)
* Corresponding author, E-mail: qulx2007@163.com

Abstract: The error of line transfer frequency from Time Delay Integration(TDI)CCD has strong influence on dynamic Modulation Transform Function(MTF) and it is stronger when the integral grade is higher. Therefore, this paper develops an accurate mathematical model for dynamic MTF and line transfer period error rate was developed. Firstly, a typical line transfer timing of TDICCD was introduced and the window functions of one integral grade and multiple integral grade were derived. On these bases, the relationship between line transfer period error rate and dynamic MTF for this timing

收稿日期:2013-07-11;修订日期:2013-08-01.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61036015)

was established by Fourier transform of the window functions and a nonlinear parameter was derived in the function which is none in the traditional one. Then, simulations and experiments were performed, which indicate that when $\Delta T/T=0$, the dynamic MTF value for this timing is 0.632 5 times of static MTF with the number of phases $b=4$. It also indicates that there are obvious differences between dynamic MTF curves from proposed method and traditional method. Finally according to the requirement of the index, the maximum line transfer period error rates with different integral grades are given, which ensures that the decline of the dynamic MTF is less than 5%.

Key words: remote sensing camera; time delay integration CCD; line transfer period error; dynamic Modulation Transform Function(MTF)

1 引 言

空间遥感相机^[1-3]是空间对地观测的重要手段,在军事侦察、资源勘探和测绘等领域发挥着至关重要的作用。目前,为了增加高分辨力遥感相机的曝光时间,提高信噪比,国内外均采用 TDI CCD^[4](时间延时积分电荷耦合器件)作为相机光学系统的焦面接收器件。TDICCD 是一种面阵结构、线阵工作模式的 CCD。在推扫方向上,它通过对同一景物的多次曝光来提高信噪比,这一过程也被称作时间延时积分,且积分级数越高,信噪比提高越大。但由于卫星姿态控制误差^[5-6]和行周期误差^[7]的存在,在较高积分级数成像时相机动态调制传递函数(MTF)损失较大。

为降低行周期误差对相机动态 MTF 的影响,通常将相机行周期设计为可调,从而适应卫星变轨或前后摆时的成像要求;而对于多片 TDICCD 拼接的大视场遥感相机,甚至需要实现各片 TDICCD 间以不同行周期成像来满足相机的动态 MTF 指标要求;但这一切的前提是构建一个行周期误差与动态 MTF 的精确数学模型。文献[7]计算并分析了行频(行周期的倒数)误差对动态 MTF 的影响,将相机推扫方向上的动态 MTF 分为不可补偿像移和可补偿像移,但其简单地将单积分级数下的像移量乘以积分级数作为总像移量,然后套用公式求动态 MTF,类似的推导也广泛见于其他文献中^[8-9],这并不符合实际情况。

鉴于此,本文针对目前国内外最常用一种 TDICCD 行转移时序,推导出了相应的单积分级数及多积分级数时的采样窗函数形式,并基于此

推导存在行频误差时的相机动态 MTF 精确数学模型。最后进行仿真和实验,并给出了结果。

2 TDICCD 推扫成像的采样窗

TDICCD 的基本工作原理可参见文献[7],而实际成像中 TDICCD 的像元电荷垂直转移由若干“相”组成,常见的有三相和四相,各相均有对应的驱动时序信号(记为 CI 信号)。当像元电荷垂直转移至若干级后由水平读出时钟 CR 驱动并将各像元电荷读出。TDICCD 行转移时序如图 1 所示。

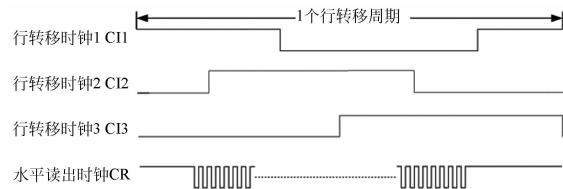


图 1 TDICCD 行转移时序图

Fig. 1 Line transfer timing of TDICCD

可以看出,图 1 中的时序均分一个行周期,电荷的相间转移在时间上是均匀的,可提高动态 MTF^[10]。

由线性系统及传递函数理论可知,MTF 可由系统的采样窗函数的傅里叶变换求模得到。设理想行周期为 T ,行周期误差为 ΔT , ΔT 对应的地面像移量为 Δa (即 $\Delta a = \Delta T \times v$, v 为相机相对地速), a 为地面像元分辨率,积分级数为 M (实际中 M 通常为偶数,即 $M = 2m$, m 为正整数)。设 TDICCD 单级相数为 b ,则每个行周期内进行 $2b$ 次电荷转移,因此单级采样窗函数 $\gamma(x)$ 和 M 级下的总采样窗函数 $\varphi(x)$ 可整理如图 2 所示。

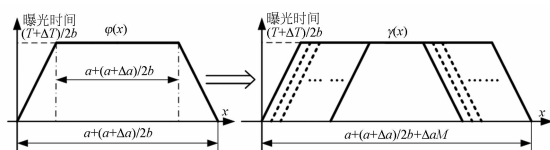


图 2 单级和 M 级采样窗函数

Fig. 2 Sampling windows of single and M grades

由图 2 可知, M 级下的总窗函数 $\varphi(x)$ 为单级下的窗函数 $\gamma(x)$ 通过平移后求和得到, 即

$$\varphi(x) = \sum_{k=0}^{2^{2M}-1} \gamma\left(x - k \cdot \frac{\Delta a}{2b}\right), \quad (1)$$

式(1)为本文推导出的具有行周期误差和任意积分级数时采样窗的理论函数形式。

3 TDICCD 动态 MTF 精确理论模型

针对图 1 中的时序, 对相应的窗函数求傅里叶变换, 然后归一化模值便可得到动态 MTF 公式。单级窗函数 $\gamma(x)$ 为梯形函数, 其傅里叶变换为:

$$\gamma(j\omega) = e^{-j\omega\left(\frac{a}{2} + \frac{a+\Delta a}{4b}\right)} \cdot \frac{(T+\Delta T)a}{2b} \cdot \frac{\sin(\omega a/2)}{\omega a/2} \cdot \frac{\sin(\omega(a+\Delta a)/4b)}{\omega(a+\Delta a)/4b}, \quad (2)$$

其中: $\omega = 2\pi f_c$, f_c 为空间频率。M 级下的窗函数的傅里叶变换为:

$$\Phi(j\omega) = FT\left\{\sum_{k=0}^{2^{2M}-1} \gamma\left(x - k \cdot \frac{\Delta a}{2b}\right)\right\} = \sum_{k=0}^{2^{2M}-1} e^{-j\omega k \frac{\Delta a}{2b}} \cdot \gamma(j\omega) = \gamma(j\omega) \cdot \sum_{k=0}^{2^{2M}-1} e^{-j\omega k \frac{\Delta a}{2b}}. \quad (3)$$

对式(3)两边取模得到有行周期误差时 TDICCD 推扫成像时动态 MTF 为:

$$MTF = |\Phi(j\omega)| = |\gamma(j\omega)| \cdot \sqrt{\left[\sum_{k=0}^{2^{2M}-1} \cos\left(\frac{k\omega\Delta a}{2b}\right)\right]^2 + \left[\sum_{k=0}^{2^{2M}-1} \sin\left(\frac{k\omega\Delta a}{2b}\right)\right]^2}, \quad (4)$$

将上式归一化得到:

$$\overline{MTF} = \frac{1}{2^{2M}} \cdot \frac{\sin(\omega a/2)}{\omega a/2} \cdot \frac{\sin(\omega(a+\Delta a)/4b)}{\omega(a+\Delta a)/4b} \cdot \sqrt{\left[\sum_{k=0}^{2^{2M}-1} \cos\left(\frac{k\omega\Delta a}{2b}\right)\right]^2 + \left[\sum_{k=0}^{2^{2M}-1} \sin\left(\frac{k\omega\Delta a}{2b}\right)\right]^2}, \quad (5)$$

若令 $\phi(\lambda) = \sqrt{\left[\sum_{k=0}^{2^{2M}-1} \cos(\lambda)\right]^2 + \left[\sum_{k=0}^{2^{2M}-1} \sin(\lambda)\right]^2}$,

则式(5)可化为:

$$\overline{MTF} = \frac{\sin(\omega a/2)}{bM\omega a} \cdot \frac{\sin(\omega(a+\Delta a)/4b)}{\omega(a+\Delta a)/4b} \cdot \phi\left(\frac{k\omega\Delta a}{2b}\right). \quad (6)$$

可见精确的动态 MTF 公式要比文献[7]等给出的公式多一项非线性参量 $\phi(k\omega\Delta a/2b)$ 。当 f_c 为 Nyquist 频率时 ($\omega = 2\pi f$), 即 $f_c = 1/2a$ 时, 式(6)为:

$$\overline{MTF}_{Nyquist} = \frac{\sin(\pi/2)}{bM\pi} \cdot \frac{\sin(\pi(1+\Delta T/T)/4b)}{\pi(1+\Delta T/T)/4b} \cdot \phi\left(\frac{k\pi\Delta T}{2bT}\right). \quad (7)$$

4 仿真与实验

由第 3 节可知, 在某一积分级数 M 下, TDICCD 在 Nyquist 频率处动态 \overline{MTF} 随 $\Delta T/T$ 的变化由式(7)给出。取积分级数 M 为 16、32、48、64 和 96, $\Delta T/T$ 取值范围选为 $[0, 0.1]$, 其关系曲线如图 3 所示, 其中 TDICCD 相数选为 $b=4$ 。

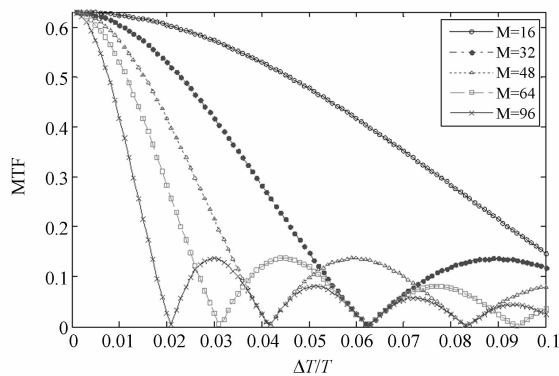


图 3 不同积分级数和行周期误差率下的 $MTF_{Nyquist}$

Fig. 3 $MTF_{Nyquist}$ at different M and T

从图 3 中可以看出, 推扫成像过程中, TDICCD(4 相)在无行周期误差时(即 $\Delta T/T=0$ 时)的 Nyquist 频率处的动态 MTF 为静态 MTF 的 0.6325 倍。且积分级数越大, 随着行周期误差的增大动态 $\overline{MTF}_{Nyquist}$ 下降越快。

为了对比采用传统窗函数和本文推导的理论窗函数时的动态 MTF 曲线的差异, 本文以积分级数为 16 和 64 时为例, 仿真结果分别如图 4 和图 5 所示。

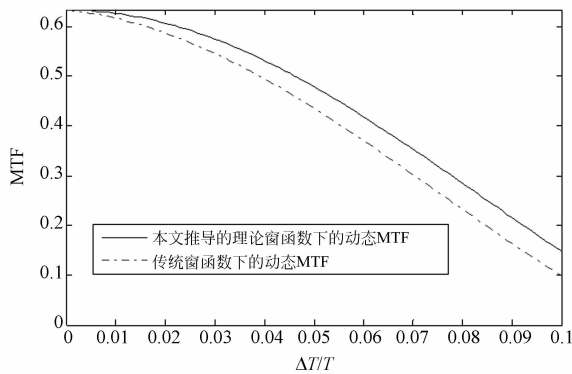


图 4 16 级时理论与传统窗函数下 MTF 曲线的比较
Fig. 4 Comparison of MTF curves using accurate and traditional sampling windows at 16 integral grades

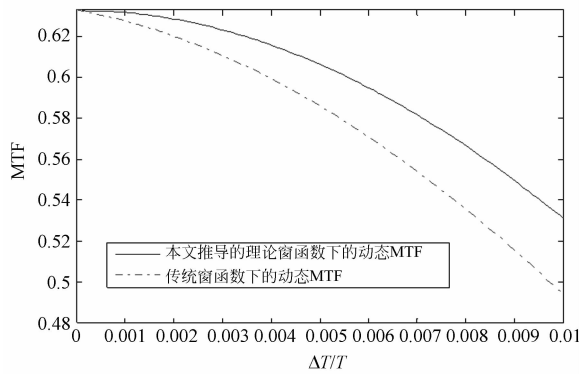


图 5 64 级时理论与传统窗函数下 MTF 曲线的比较
Fig. 5 Comparison of MTF curves using accurate and traditional sampling windows at 64 integral grades

由图 4 和图 5 可知,采用本文推导出的 TDICCD 理论采样窗函数时获取的 MTF 曲线较采用传统窗函数时有明显的差异,且数值要大于传统函数。

为展示行周期误差率 $\Delta T/T$ 对动态 MTF 的影响,搭建了成像实验平台(包括带有场景图片的可控转速的滚筒、多通道 TDICCD 及图像处理采集系统等)。在积分级数为 48,行周期误差率 $\Delta T/T=0$ 、 $\Delta T/T=5\%$ 和 $\Delta T/T=10\%$ 的条件下做成像实验对比,采集的图像分别如图 6、图 7 和图 8 所示。

由图 6、图 7 和图 8 可以直观看到,当积分级数一定时,行周期误差率越大,图像质量越差。

空间遥感相机中,为保证成像质量,通常要求

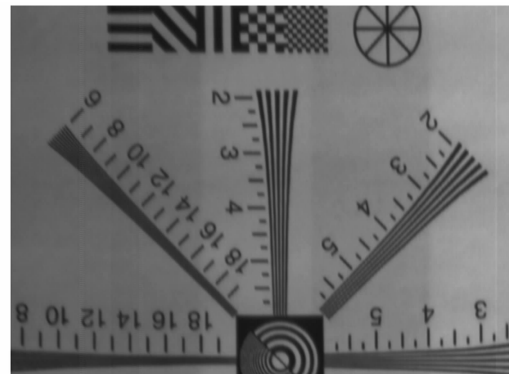


图 6 积分级数为 48 时无行周期误差的图像
Fig. 6 Image at 48 integral grade without ΔT

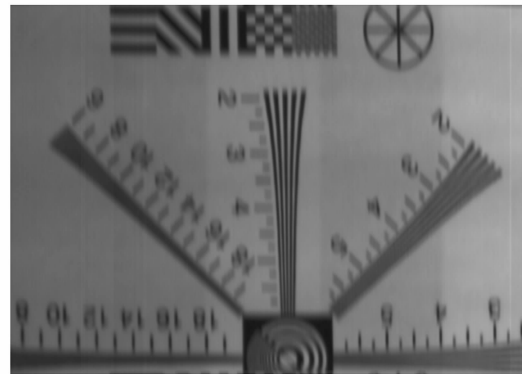


图 7 积分级数为 48 时行周期误差率为 5% 的图像
Fig. 7 Image at 48 integral grade with $\Delta T/T=5\%$



图 8 积分级数为 48 时行周期误差率为 10% 的图像
Fig. 8 Image at 48 integral grade with $\Delta T/T=10\%$

行周期误差造成的动态 $\overline{MTF}_{N_{yquist}}$ 下降不超过 5%。为保证该指标,在各积分级数下行周期误差率 $\Delta T/T$ 不可过大。依据式(7),表 1 给出了不同积分级数时的 $\Delta T/T$ 最大容许值。

表1 不同积分级数下行周期误差率最大容许值表

Tab.1 Maximum $\Delta T/T$ allowed at different M

积分级数	$(\Delta T/T)_{\max}$
$M=16$	1.91%
$M=32$	1.12%
$M=48$	0.78%
$M=64$	0.62%
$M=96$	0.45%

5 结 论

针对推扫式空间遥感相机中行周期误差对

TDICCD 动态 MTF 造成的影响, 推导出了一种典型的 TDICCD 行转移时序下的单级和多级采样窗函数, 从而推导出该时序下动态 MTF 与行周期误差率 $\Delta T/T$ 的精确函数关系, 并进行了仿真和成像实验。结果表明: $\Delta T/T=0$ 时, 该时序下的 TDICCD 动态 MTF 为静态 MTF 的 0.632 5 倍 (TDICCD 相数 $b=4$); 本文方法得到的动态 MTF 与行周期误差率关系曲线较传统方法得到的曲线有明显差异且动态 MTF 值要高于后者; 最后, 给出了不同积分级数下, 5% 动态 MTF 下降率指标要求时的行周期误差率最大容许值, 为工程实际应用提供了依据。

参考文献:

- [1] 姚呈康, 李庆辉, 胡琳. 星载遥感相机像移分析[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(5):901-904.
YAO CH K, LI Q H, HU L. Analysis of image motion of satellite remote sensing camera [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(5):901-904. (in Chinese)
- [2] 王雪晶, 张健, 魏仲慧, 等. 基于遥感相机模型的遥感图像彩色校正[J]. 红外与毫米波学报, 2002, 21(6):443-446.
WANG X J, ZHANG J, WEI ZH H, et al.. Color correction for remote sensing images based on remote sensing camera model [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2002, 21(6):443-446. (in Chinese)
- [3] 韩昌元. 高分辨力空间相机的光学系统研究[J]. 光学精密工程, 2008, 16(11):2164-2172.
HAN CH Y. Study on optical system of high resolution space camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(11):2164-2172. (in Chinese)
- [4] 郑耿峰, 张柯, 韩双丽, 等. 空间 TDICCD 相机动态成像地面检测系统的设计[J]. 光学精密工程, 2010, 18(3):623-629.
ZHENG G F, ZHANG K, HAN SH L, et al.. Design of test system for motion images of space TDICCD camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(3):623-629. (in Chinese)
- [5] 闫得杰, 徐岩岩, 韩诚山. 飞行器姿态对空间相机像移补偿的影响[J]. 光学精密工程, 2008, 16(11):2199-2203.
YAN D J, XU SH Y, HAN CH SH. Effect of aircraft attitude on image motion compensation of space camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(11):2199-2203. (in Chinese)
- [6] 闫得杰, 韩诚山, 李伟雄. 飞行器侧摆和前后摆及控制误差的优化设计[J]. 光学精密工程, 2009, 17(9):2224-2229.
YAN D J, HAN CH SH, LI W X. Optimization design of scroll and pitch and their control errors on aircraft [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(9):2224-2229. (in Chinese)
- [7] 马天波, 郭永飞, 李云飞. 科学级 TDICCD 相机的行频精度[J]. 光学精密工程, 2010, 18(9):2028-2035.
MA T B, GUO Y F, LI Y F. Precision of row frequency of scientific grade TDICCD camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(9):2028-2035. (in Chinese)
- [8] 龙夫年, 张旺, 刘剑峰. 卫星姿态精度对 TDICCD 相机的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2002, 34(3):382-384.
LONG F N, ZHANG W, LIU J F. Effect of satellite attitude control accuracy on TDI CCD cameras [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2002, 34(3):382-384. (in Chinese)
- [9] 胡永力, 谭南征. TDICCD 相机侧摆 MTF 的研究[J]. 航天返回与遥感, 2003, 24(1):33-37.
HU Y L, TAN N ZH. Study On Scroll MTF of TDICCD Camera [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2003, 24(1):33-37. (in Chinese)

[10] WANG D J, ZHANG T, KUANG H P. Clocking smear analysis and reduction for multi phase TDI

CCD in remote sensing system [J]. *Optics Express*, 2011, 19(5): 4868-4880.

作者简介:



郭汉洲(1990—),男,吉林长春人,主要从事光电方面的研究。E-mail: guo-hanzhou1@163.com



曲立新(1966—),男,吉林长春人,研究员,主要从事空间相机可靠性方面研究。E-mail: qulx2007@163.com



吕恒毅(1984—),男,辽宁大连人,硕士,助理研究员,主要从事空间相机成像系统视频处理方面研究。E-mail: lv_hengyi@163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)