

文章编号: 1002-2082(2006)02-0167-04

# 基于MTF的时间延迟积分CCD 成像系统同步误差分析

张林<sup>1,2</sup>, 吴晓琴<sup>2</sup>, 汤宫民<sup>1</sup>

(1. 南京理工大学机械工程学院, 南京 210094; 2. 合肥学院, 合肥 230022)

**摘要:** 通过像移调制传递函数MTF分析了TDI-CCD行扫速率与运动像不同步时对相机成像质量的影响。为验证速度失配对TDI-CCD相机成像质量的影响, 针对应用环境, 利用高对比度靶标对TDI-CCD动态成像进行了仿真实验和动态测试, 结果表明, 在奈奎斯特频率范围内, 只要将相机动态成像系统的同步误差控制在 $\pm 2\%$ 的范围内, 并使图像时钟处于连续多相的工作方式, 就可以基本上消除同步误差对成像质量的影响。

**关键词:** TDI-CCD; 同步误差; 调制传递函数(MTF); 像移

中图分类号: O433.1

文献标志码: A

## Analysis of synchronization error for time delayed integration (TDI) CCD imaging system based on MTF

ZHANG Lin<sup>1,2</sup>, WU Xiao-qin<sup>2</sup>, TANG Gong-min<sup>1</sup>(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science & Technology,  
Nanjing 210094, China; 2. Hefei University, Hefei 230022, China)

**Abstract:** The negative effect of the mismatch between time delayed integration (TDI) CCD line scanning velocity and image motion on image quality is fully analyzed with phase-motion modulated transfer function (MTF). In order to verify the effect of the velocity mismatching on the image quality of 96-stage TDI-CCD camera, based on the application environment, the simulative experiment and dynamic testing for the dynamic imaging of the TDI-CCD camera were conducted by utilizing the target with high contrast characteristic. The results show that within the range of Nyquist frequency, the effect of the synchronization error on the imaging quality can be basically eliminated during the processing of imaging so long as the synchronous error is strictly controlled in the range of  $\pm 2\%$  and the imaging clock is in the continuous four-phase operating mode.

**Key words:** TDI-CCD (time delayed integration charge coupled device); synchronous error; modulated transfer function(MTF); image motion

## 引言

CCD作为一种新型的探测和成像器件, 其应用已经深入到国民经济各个领域。特别在现代靶场

立靶测试和航天卫星的遥感遥测等领域具有广泛的应用。在线阵CCD交汇测量系统中, 对于大靶面、高速飞行的小目标, 常规CCD基本上搜索不到

收稿日期: 2005-03-19; 修回日期: 2006-01-11

基金项目: 安徽省教育厅自然科学基金资助项目(2005kj090); 合肥学院科研发展基金资助项目(05ky007zr)

作者简介: 张林(1962—), 安徽省阜阳市人, 合肥学院副教授, 主要从事传感器及测试技术方面的教学和科研工作。

E-mail: njlgdzt@126.com

目标的任何信息,而TDI-CCD可以在低照度下捕获到动态目标的相关信息。TDI-CCD的工作方式比较特殊,在对动态目标成像时,要求它的行扫速率与目标的运动速率严格同步。否则不能保证TDI-CCD同一列上的每一个像元都能对同一目标成像,从而引起在延迟积分时间内的像移:如果同步误差较大,会造成相机输出图像的混叠与模糊。事实上,在现有的技术条件下严格同步是不可能的。因此,如何公正客观地评价TDI-CCD器件的成像质量,无论是对CCD的使用者还是制造者来说,都是一个极其重要而又尚待解决的问题。近年来的研究表明,调制传递函数(MTF)仍然是目前评价TDI-CCD成像质量的可靠方法<sup>[1]</sup>。因此,对TDI-CCD相机的像移最大容量以及速度失配与相机的MTF和像质的关系进行分析与实验是十分必要的。本文通过建立像移调制传递函数MTF的数学模型,重点分析了TDI-CCD行扫速率与运动图像不同步时产生的像移对相机成像质量的影响,并利用高对比度测试靶标来模拟运动的图像,对像移影响相机的MTF分别进行了动态测试与理论计算。结果表明,对于96级TDI-CCD器件,当空间频率在奈奎斯特频率范围内,且像移量被限制在一个像素内,即同步误差控制在2%的范围内,就可以获得理想运动图像的像质。

### 1 TDI-CCD的工作原理及像移分析

TDI-CCD是时间延迟积分电荷耦合器件,其内部结构如图1所示。图1中的行数为延迟积分的级数(M),其工作原理是:当沿着CCD级数方向推扫成像时,在第1个积分周期目标在某列第1个像元曝光积分,得到的光生电荷下移1个像元;在第2个积分周期目标恰好移动到该列第2个像元处曝光积分,得到的光生电荷与上一像元来的电荷相加后移到下一像元...直到第M个积分周期目标移到该列第M个像元曝光积分,产生的光生电荷与前(M-1)个电荷相加后移入读出寄存器并读出。M列像元实际是TDI-CCD的同一列像元在M个积分周期内对同一目标的曝光,TDI-CCD级数方向的电荷转移是靠外同步信号触发的,当CCD像元光生电荷包的转移速度与像的移动速度不匹配时,就会产生像移。其像移通常可用2种形式表示:一是在延迟积分时间内的总像移量S;二是在单个行周期内由不同步采集所产生的像移量X。若把像移分解为TDI-CCD行方向(线视场方向)的分量S<sub>R</sub>

和ΔX<sub>R</sub>以及推扫方向(积分方向)上的分量S<sub>C</sub>和ΔX<sub>C</sub>,由于行方向上的像移数值很小可以忽略不计,则TDI积分方向上总像移量与单个行周期内的像移量的关系表达式为

$$S_C = M \times \Delta X_C + K \times \alpha \tag{1}$$

式中, M 为积分级数; α 为 CCD 像元的尺寸(设像元为正方形); K 为 TDI-CCD 在行周期内的曝光时间与行周期的比值; K × α 的像移是由相机的推扫工作方式造成的。由(1)式可知,积分级数越高,产生像移越大。工作在突发模式的TDI-CCD相机的K值由用户设定<sup>[2]</sup>,对于工作在连续模式的TDI-CCD相机来说,其电荷沿TDI方向的转移是靠图像时钟来控制的。若成像转移时钟为4相驱动,则K值为1/4;若为3相驱动,则K值为1/3;若为2相驱动,则K值为1/2。显然,成像转移时钟相数越多,产生的像移越小。

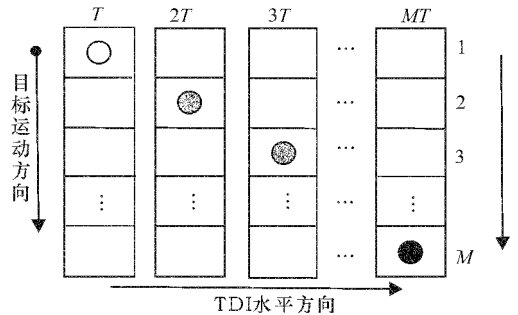


图1 TDI-CCD工作原理

Fig. 1 The operational principle of TDI-CCD

### 2 基于MTF的速度同步误差分析

#### 2.1 TDI-CCD像移的MTF

在线阵CCD交汇测量系统中产生TDI-CCD像移的原因很多,包括速率失配的不同步采集、振动、光学系统的像差等。其中不同步采集带来的像移是最主要因素,它随着积分级数的增加而线性增加。这里考虑的是在延迟积分时间内的总像移,近似认为像移是受速度失配的不同步采集影响,因速度失配造成的像移对相机成像质量的影响可用调制传递函数MTF来衡量。由于垂直于TDI方向上的像移数值很小,为分析方便可忽略不计,所以速度失配引起像移调制传递函数的退化仅仅考虑作用于TDI积分方向。对于一个M级TDI-CCD,设电荷转移的平均速度为V,像移速度为V<sub>T</sub>,则速度失配量为ΔV = V - V<sub>T</sub>;设像元中心间距等于像元宽度α,则电荷沿TDI积分方向转移M次后失配的距离为S = Mα(ΔV/V)。式中,ΔV/V为速度失配率,即同步误差。令d = (ΔV/V),则S = Mad。由此可

知,同步误差 $d$ 越大,引起的像移 $S$ 越大。若这里主要考虑速度失配效应,因此可看作一个宽度为 $M\alpha$  ( $\Delta V/V$ )的有限孔径采样一定空间频率 $f$ 的静止波。那么由速度失配的线扩展函数 $L(x) = 1/M\alpha(\Delta V/V)$ ,  $-\frac{M\alpha(\Delta V/V)}{2} < x < \frac{M\alpha(\Delta V/V)}{2}$ , 可求得同步误差引起MTF变化的数学模型为

$$\text{MTF}_{\Delta V} = \sin(\pi\alpha f M \frac{\Delta V}{V}) / (\pi\alpha f M \frac{\Delta V}{V}) \quad (2)$$

DALSA公司的一份研究报告<sup>[3]</sup>表明,同步误差对像质的影响可由 $M(\Delta V/V)$ 表示。当 $M(\Delta V/V) = 0$ 时,即速度完全匹配,有 $\text{MTF}_{\Delta V} \approx 1$ ,不影响图像分辨率。对于 $M(\Delta V/V) = 1$ ,在奈奎斯特频率极限处 $f = f_n = 1/2 \alpha$ 时, $\text{MTF}_{\Delta V} = 0.64$ ;在 $f = 2 f_n$ 时,MTF已严重退化为0。根据对MTF的要求,只有成像系统的 $\text{MTF} \geq 0.02$ 时,人眼才能分辨。因此,这种退化一般认为是不可接受的。也就是说,相机在空间频率高于奈奎斯特频率的条件下工作,违反采样定理,图像会出现混叠效应。所以,在对CCD调制函数进行分析时,工作频率尽可能在奈奎斯特频率范围内。当 $M(\Delta V/V) = 2$ 时,在奈奎斯特频率极限处, $\text{MTF}_{\Delta V} = 0$ 。此时表明,同步误差较大,引起MTF的严重衰减。所以,通常将 $M(\Delta V/V) = 2$ 定义为TDI-CCD的速度失配容限;级数越多,对运动速度的同步精度要求越高。对于工作在96级的TDI-CCD,则要求速度同步误差 $\Delta V/V$ 控制在 $\pm 2\%$ 以内。

图2为像元尺寸 $\alpha = 13 \mu\text{m} \times 13 \mu\text{m}$ ,在TDI-CCD积分方向上不同步采集时的不同像移量引起MTF的衰减曲线。从图2可以发现,同步误差 $d$ 越大,MTF的值衰减越快。当不同步采集时的像移 $d = 0.02$ 时,相机的MTF值在CCD奈奎斯特频率 $f_n = 38 \text{ lp/mm}$ 时已衰减为0,这种结果是难以接受的。

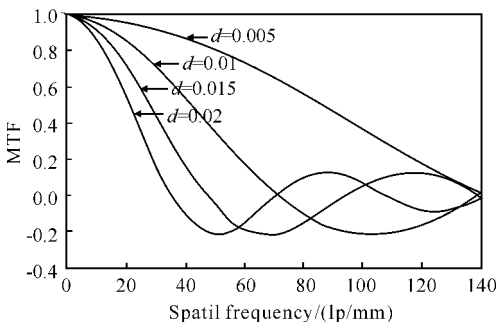


图2 TDI-CCD积分方向上的像移量对MTF的影响

Fig. 2 Effect of length of image motion in the direction of TDI-CCD integration on MTF

所以, $d = \Delta V/V < 2\%$ 成为TDI-CCD同步控制要求的一个重要设计依据。

## 2.2 像移对成像质量的评价

从图2可以看到,像移对TDI-CCD相机MTF的影响是比较严重的,但仅靠MTF曲线很难完全理解像质的变化。目前,图像系统的性能越来越多地采用美国国家图像解释分级标准NIIRS (the National Image Interpretability Rating Scale)来描述。像移 $S_c$ 对NIIRS的影响可用如下经验公式表示<sup>[4]</sup>

$$\text{NIIRS}_{\text{loss}} = 0.003 \ 1 - 0.063 \ 0 S_c - 0.005 \ 9 S_c^2 \quad (3)$$

式中, $S_c = M \times \Delta X_c + K \times \alpha$ 为像移量,单位为像素。为便于分析,用 $\Delta \text{NIIRS}$ 表示 $\text{NIIRS}_{\text{loss}}$ 。当 $\Delta \text{NIIRS} < 0.1$ 时,感受不到图像质量的变化;当 $0.1 \leq \Delta \text{NIIRS} \leq 0.2$ 时,可以感受到像质的变化;当 $\Delta \text{NIIRS} < 0.2$ 时,像质会有明显的变化。按照以上标准,随着像移量不断增大,NIIRS损失也随着增大。当像移量 $S_c < 1$ 个像素时, $\Delta \text{NIIRS} < 0.1$ ,感受不到图像质量的变化;当像移量 $S_c = 2.64$ 像素时, $\Delta \text{NIIRS} = 0.2$ ,对像质产生一定影响;当像移量 $S_c > 3$ 个像素时, $\Delta \text{NIIRS} > 0.2$ ,像质的影响不可接受。

## 3 仿真实验与分析

为了验证速度失配对TDI-CCD相机成像质量的影响,本文对 $M = 96$ 级的TDI-CCD动态成像进行了仿真实验。针对应用环境,利用高对比度靶标对CCD相机的MTF进行动态测试<sup>[5-6]</sup>。对于CCD相机的空间分辨率特性,通常用调制传递函数来表征。在宏观上可以认为光电成像系统是一个线性不变系统。因此,相机系统的MTF可以由各个分系统的MTF相乘得到。当正弦靶标经过镜头成像后再被CCD采样成像,相机系统的调制传递函数为2者的乘积,即 $\text{MTF}_{\text{SYS}} = \text{MTF}_{\text{OPTICS}} \text{MTF}_{\text{CCD}}$ 。由于正弦靶标很难制造,实际应用中常用矩形靶标来代替。按照傅里叶变换原理的光传递函数理论, $\text{MTF}_{\text{CCD}} = \sin(\pi\alpha f) / \pi\alpha f$ 。若 $f = 1/2\alpha$ , $\text{MTF}_{\text{CCD}} = 2/\pi = 0.636 \ 6$ , $\text{MTF}_{\text{SYS}} = 0.636 \ 6 \ \text{MTF}_{\text{OPTICS}}$ 。根据调制传递函数MTF的定义<sup>[5]</sup>,相机系统的调制传递函数可表示为 $\text{MTF}_{\text{OPTICS}}(f) = M_o/M_i$ 。式中, $M_i$ 为目标的输入调制度; $M_o$ 为图像的输出调制度。对于高对比度靶标,可以近似认为 $M_i$ 为1。因此, $M_o$ 即可认为是相机系统的MTF,它随着成像质量的

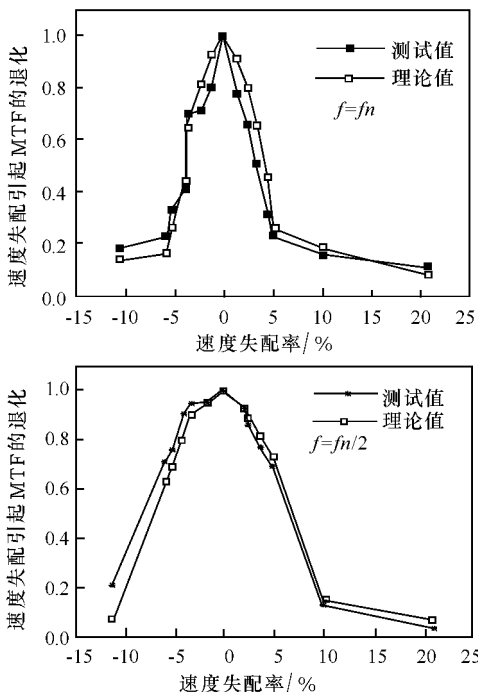


图3 2种空间频率下的实测数据与理论计算值

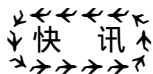
Fig. 3 Data from test and values from theoretical calculation in case of two spatial frequencies

改变而发生变化。通过在成像测试过程中对相机输出调制度分别进行实时和理论计算<sup>[7]</sup>,可以得到CCD在2种空间频率下因速度失配引起MTF的退化曲线(如图3所示)。图中基于调制传递函数的理论分析值与实验测试值基本上是一致的,其存在的

差别主要是靶标在成像时由CCD光敏元与靶标之间的相对位置变化而造成的。从对相关测试数据所进行的分析可以看出,在奈奎斯特频率 $f_n$ 的范围内,空间频率越小,MTF值衰减的越慢。当采用96级延迟积分的TDI-CCD器件,速度失配只有控制在 $\pm 2\%$ 的范围内,MTF值的退化才会不明显,成像质量才能得到保证。

参考文献:

- [1] 宋敏, 邹新凯, 郑亚茹. 非理想情况下的CCD调制传递函数的综合表示方法[J]. 光学技术, 2003, 29(6): 720-726.
- [2] 刘良云, 张伯珩, 李英才, 航天TDI-CCD相机的MTF和像质分析[J]. 光学技术, 2000, 26(6): 481-483.
- [3] DALSA CORP. CCD Image Sensors Databook[M]. Canada: DALSA Corp, 1999.
- [4] SMITH S L, MOONEY J, TANTALO T A, et al. Understanding image quality losses due to smear in high-resolution remote sensing imaging system[J]. Opt Eng, 1999, 38(5): 821-826.
- [5] 杨桦, 朱永红, 焦文春, 等. CCD的输出响应与相机MTF测试[J]. 光学技术, 2001, 27(5): 444-446.
- [6] 万春明, 佟首峰. CCD相机调制传递函数的测试原理分析[J]. 半导体光电, 2002, 23(1): 40-43.
- [7] 杨桦, 朱永红, 焦文春, 等. TDI-CCD成像的速度同步分析和实验[J]. 航天返回与遥感, 2003, 24(1): 38-42.



### 联姻行业权威, 加强国际合作

## “武汉·中国光谷”与美国国际光学工程学会达成全面合作协议

2006年2月23日, 武汉东湖新技术开发区管委会与美国国际光学工程学会(SPIE)在武汉香格里拉大饭店就双方科技交流与合作、国际会展、人才培养等方面的合作签署合作备忘录, 这标志着国际最大的光电权威机构与“武汉·中国光谷”的合作全面启动。武汉市委常委副市长袁善腊、东湖新技术开发区管委会主任唐良智、美国国际光学工程学会主席麦克马拉蒙博士、执行主席亚瑟博士等出席了签字仪式。

美国国际光学工程学会是致力于光电子信息领域研究和应用的国际著名专业机构, 成立五十年来在全球有超过15 000名正式会员, 该组织每年举办350多次国际性专业技术研讨会以及各种培训教学活动, 所发表的会议文献反映了国际光电行业领域的最新进展和动态, 具有极高的学术价值。由该机构主办的“亚太光通信及无线通信学术会议暨展览会”(APO)是当今全球最权威的光电子行业盛会之一。国际光学工程学会早在2003年便与“武汉·中国光谷”国际光电子博览会进行了首度合作, 同时对“武汉·中国光谷”的发展表现出极大的关注。

据悉, 此次双方协议的合作领域十分广泛, 除了联手打造武汉“光博会”品牌之外, 还将在武汉地区联手举办一系列的国际学术会议、国际展览、研讨讲习班等, 国际光学工程学会也将在其发起的众多国际活动中为东湖开发区的科研技术人员提供国际交流的机会。

(武汉东湖开发区生产力促进中心 张佳)