



# 光学拼接误差对 TDI-CCD 相机的影响

肖占全<sup>1,2</sup>, 翟林培<sup>1</sup>, 丁亚林<sup>1</sup>, 王俊善<sup>1,2</sup>, 陈洪立<sup>1,2</sup>, 耿文豹<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 光学拼接是扩大 CCD 相机视场的有效方法,其关键技术为拼接精度的设计计算和正确评价。为了对光学拼接的工艺性进行有效评价,指导 CCD 光学拼接的设计,以光学调制传递函数(MTF)为其评价函数,分别对光学拼接的搭接误差、直线性误差、共面性误差对时间延迟积分电荷耦合器件(TDI-CCD)相机光学传递函数的影响进行了理论分析,给出了各种光学拼接误差对光学系统传递函数的调制方程,为光学拼接技术的精度评价提供了理论依据,能够有效指导光学设备焦平面组件的工程设计。

**关键词:** 光学拼接误差; TDI-CCD 相机; 调制传递函数

**中图分类号:** TN386.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-5868(2008)05-0795-04

## Research of Optical Assembly Errors Effects on TDI-CCD Camera

XIAO Zhan-quan<sup>1,2</sup>, ZHAI Lin-pei<sup>1</sup>, DING Ya-lin<sup>1</sup>, WANG Jun-shan<sup>1,2</sup>, CHEN Hong-li<sup>1,2</sup>, GENG Wen-bao<sup>1,2</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, CHN;

2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, CHN)

**Abstract:** The optical assembly of CCD is an effective technology for broadening view field of camera, and its key way is the right design and assessment of assembly precision. For evaluating optical assembly precision and instructing the design of CCD optical assembly, MTF is used for its evaluating function, and analysing overlap error, linear error and coplane error influence on TDI-CCD camera's modulation transfer function (MTF). The modulating equation of assembly errors on MTF is given, and supply theoretical reason for the assessment of optical assembly precision, and guide the engineering design of optical equipment's focal plane.

**Key words:** optical assembly errors; TDI-CCD camera; modulation transfer function

## 1 引言

CCD 已广泛应用于光学遥感领域,但 CCD 器件的有限长度和光学系统较大成像视场之间的矛盾限制了 CCD 在这一领域的应用, CCD 的光学拼接是在现有条件下解决这一问题的重要技术。CCD 的光学拼接原理为利用拼接棱镜的分光原理,将成像面分成空间分离的两个面,用以放置多个 CCD,并使相邻两片 CCD 像元首尾精密重叠,在像方空间形成宽视场的探测器阵列<sup>[1]</sup>,如图 1 所示。在光学拼接方面,我国有很多科研院所都进行了卓有成效

的研究,但是主要集中于光学拼接的工艺技术的研究上,没有对拼接精度的评价和设计给出可靠的理论依据。为了适应对光学系统的整体分析和结构设计需要,从理论角度给出有效评价光学拼接的方法是一个重要的问题。

本文以反映时间延迟积分电荷耦合器件(TDI-CCD)相机对不同空间频率的目标的响应能力的光学调制传递函数(MTF)作为评价函数,讨论了 TDI-CCD 相机在推扫模式下光学拼接时的各种误差因素对 TDI-CCD 相机的调制传递函数(MTF)的影响。

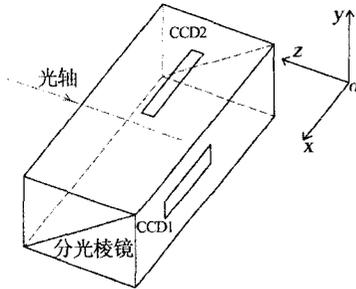


图1 CCD光学拼接原理示意图

## 2 光学拼接误差调制传递函数的分析

光学拼接是利用分光棱镜将两块 CCD 拼接起来,在一定程度上达到针对同一视场同时成像的使用效果。由于光学拼接中搭接误差、直线性误差和共面性误差的客观存在,造成相机在前向和横向的光学传递函数降低,从而影响系统的成像质量。所以有必要从光学拼接的几种误差形式分别分析其调制传递函数。

### 2.1 搭接误差的影响

相机在焦平面上采用 CCD 的个数即 CCD 的阵列长度由光学系统的视场决定。根据公式

$$N = \frac{2f \tan \alpha}{a} \quad (1)$$

式中,  $N$  为像元个数,  $a$  为像元尺寸,  $f$  为焦距,  $\alpha$  为相机视场角。

搭接误差对光学传递函数的影响与其工作方式有关,这里相机在工作时,各 CCD 分别独立成像,因此两 CCD 之间的搭接不会影响各自的成像质量,但是由于载体姿态(尤其是载机的横滚)的影响,一般情况下搭接的像元个数要达到 5~10 个像元。

### 2.2 直线性误差的影响

理论上要求, TDI-CCD1 和 TDI-CCD2 的同一级的所有像素必须在同一直线上,并且要求每片 TDI-CCD 的阵列方向与推扫方向垂直,这是光学拼接的理想效果。但在实际实现上,两片 TDI-CCD 不可能准确位于同一直线上,以其中的 TDI-CCD1 为基准,其 TDI 方向和推扫方向完全重合,设另一片 TDI-CCD2 的 TDI 方向和推扫方向成的角度为  $\theta$ ,如图 2 所示。

$oy$  为 TDI-CCD1 的 TDI 方向,  $ox$  为 TDI-CCD1 的阵列方向,  $oy_1$  为 TDI-CCD2 的 TDI 方向,  $ox_1$  为 TDI-CCD2 的阵列方向。

设 TDI-CCD2 的像元尺寸为  $a$ , 级数为  $M$ , 行转

移周期为  $\tau$ 。将前向速度在 TDI-CCD2 的 TDI 方向和阵列方向上分解,设 TDI-CCD2 的像移补偿速度为  $V_c$ , 前向速度为  $V$ , 在  $oy_1$  和  $ox_1$  方向上分解速度分别为

$$\begin{aligned} V_{y1} &= V \cos \theta, \\ V_{x1} &= V \sin \theta \end{aligned} \quad (2)$$

因此,在 TDI 方向和阵列方向上的速度差为

$$\Delta V_{y1} = V_{y1} - V_c = V \cos \theta - V_c = 0 \quad (3a)$$

$$\Delta V_{x1} = V_{x1} - 0 = V \sin \theta \quad (3b)$$

经  $M$  级积分后,在 TDI 方向上完全消除像移,在阵列方向上的像移为

$$L_{x1} = \Delta V_{x1} \times \tau \times M = MV\tau \sin \theta \quad (4)$$

由于在 TDI 方向上完全消除像移即  $V \cos \theta = V_c$ , 又因为  $a = V_c \tau$ , 所以式(4)即为

$$L_{x1} = Ma \tan \theta \quad (5)$$

将式(5)在  $oy$  方向和  $ox$  方向分解:

$$\begin{aligned} L_y &= Ma \tan \theta \sin \theta, \\ L_x &= Ma \sin \theta \end{aligned} \quad (6)$$

由像移引起的调制传递函数为

$$MTF = \text{sinc}(\pi fL) \quad (7)$$

其中,  $f$  为空间频率,  $L$  为像移。

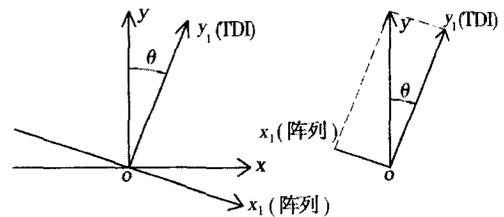


图2 前向像移分解

在这里,讨论在奈奎斯特空间频率  $f_N$  下倾斜角  $\theta$  对 TDI-CCD 的影响,因为  $f_N = 1/2a$ , 所以在前向和横向引起的 MTF 为

$$\begin{aligned} MTF_{xy}(f_N) &= \text{sinc}(\pi f_N L) = \text{sinc}\left(\frac{\pi Ma \tan \theta \sin \theta}{2a}\right) = \\ &= \text{sinc}\left(\frac{\pi}{2} M \tan \theta \sin \theta\right) \end{aligned} \quad (8a)$$

$$\begin{aligned} MTF_{xy}(f_N) &= \text{sinc}(\pi f_N L) = \text{sinc}\left(\frac{\pi Ma \sin \theta}{2a}\right) = \\ &= \text{sinc}\left(\frac{\pi}{2} M \sin \theta\right) \end{aligned} \quad (8b)$$

则角度  $\theta$  对相机前向和横向的 MTF 影响曲线如图 3 和 4。从图 3、图 4 可以看出,随着直线性误差的误差  $\Delta\theta$  角度的增大,前向和横向 MTF 都下降,在相同角度下,倾斜角度对横向 MTF 的影响远远大于对前向 MTF 的影响,并且随着 TDI-CCD 的级数

的增加前向和横向 MTF 都下降,所以在考虑倾斜角度对相机的影响时,主要考虑对相机横向 MTF 的影响,当倾斜角  $\theta$  为 0.001 rad 时,96 级 TDI-CCD 的横向 MTF 为 0.996 2,前向 MTF 接近 1,所以光学拼接时要使成像器件倾斜角度小于 0.001 rad。

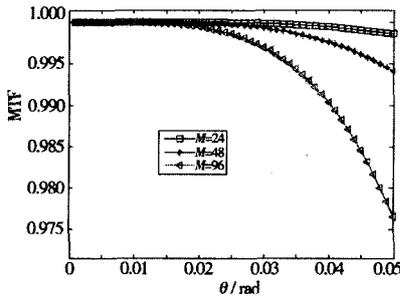


图 3 线性误差的误差  $\Delta\theta$  角引起的前向 MTF 退化曲线

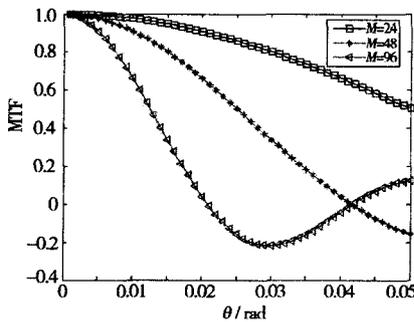


图 4 线性误差的误差  $\Delta\theta$  角引起的横向 MTF 退化曲线

### 2.3 共面性误差 $\Delta z$ 的影响

TDI-CCD 器件在拼接时,要求它们在光学系统的焦平面上,也就是必须保证所有 TDI-CCD 的光敏面在光学系统的焦深范围以内。设 TDI-CCD2 与基准 TDI-CCD1 之间的共面性误差为  $\Delta z$ ,相机在基准 TDI-CCD1 不离焦的情况下 TDI-CCD2 已经产生了离焦量  $\Delta z$ ,因此 TDI-CCD2 成像模糊,引起相机 MTF 下降。

相机成像时,点光源在像平面上发生弥散,可以认为点光源在像平面上呈一圆盘状的像,出现离焦时,其半径为  $b = \frac{\Delta}{2F}$ ,  $\Delta$  为离焦量,其中  $D/f = 1/F$  为成像物镜的相对孔径,  $D$  为入射光瞳直径,  $f$  为光学系统的焦距。由于圆函数是对称的,在数学上圆域函数描述为

$$\text{circ}\left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{b}\right) = \begin{cases} 1, & 0 \leq \sqrt{x^2 + y^2} \leq b \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

其傅里叶变换为

$$G(f_x, f_y) =$$

$$\iint \text{circ}\left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{b}\right) \exp[-i2\pi(f_x x + f_y y)] dx dy \quad (10)$$

引入下列变换:

$$x = r \cos \theta, \quad y = r \sin \theta, \quad r = \sqrt{x^2 + y^2},$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{y}{x}\right), \quad f_x = \rho \cos \varphi, \quad f_y = \rho \sin \varphi,$$

$$\rho = \sqrt{f_x^2 + f_y^2}, \quad \varphi = \tan^{-1}\left(\frac{f_y}{f_x}\right), \quad dx dy = r dr d\theta$$

所以式(9)用极坐标表示为

$$\text{circ}\left(\frac{r}{b}\right) = \begin{cases} 1, & 0 \leq r \leq b \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

其傅里叶变换为

$$G(\rho, \varphi) = \int_0^\infty \int_0^{2\pi} r \text{circ}\left(\frac{r}{b}\right) \exp[-i2\pi r \rho (\cos \theta \cos \varphi + \sin \theta \sin \varphi)] d\theta dr \quad (12)$$

$\varphi$  可认定为常数,利用贝塞尔等式

$$J_0(x) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp[-ix \cos(\theta - \varphi)] d\theta \quad (13)$$

并令  $x = 2\pi r \rho$ , 得

$$G(\rho, \varphi) = 2\pi \int_0^\infty r \text{circ}\left(\frac{r}{b}\right) J_0(2\pi r \rho) dr = 2\pi \int_0^b r J_0(2\pi r \rho) dr \quad (14)$$

设  $r' = 2\pi r \rho$ , 带入式(14)得

$$G(\rho, \varphi) = \frac{2\pi}{(2\pi\rho)^2} \int_0^{2\pi\rho b} r' J_0(r') dr' = \frac{b J_1(2\pi b \rho)}{\rho} \quad (15)$$

设  $\rho = 0$  并带入式(12)得

$$G(0, \varphi) = \iint r dr d\theta = \pi b^2 \quad (16)$$

因此归一化的传递函数

$$\text{MTF}(\rho) = \frac{G(\rho, \varphi)}{G(0, \varphi)} = \frac{J_1(2\pi b \rho)}{\pi b \rho} = 2 \frac{J_1(2\pi b \rho)}{2\pi b \rho} \quad (17)$$

即

$$\text{MTF}(\rho) = 2 \frac{J_1\left(\pi \frac{\Delta}{F} \rho\right)}{\pi \frac{\Delta}{F} \rho} \quad (18)$$

$J_1(\cdot)$  为一阶贝塞尔函数。设像元尺寸为  $a = 13 \mu\text{m}$ ,  $D/f$  分别为 1/5.6 和 1/11.2 时,在奈奎斯特频率下,  $\Delta z$  对 TDI-CCD 相机的调制传递函数影响曲线如图 5 所示(此时未考虑相机调焦误差)。

从图 5 中可以看出,在像元尺寸一定的情况下,

相机的调制传递函数随着共面性误差  $\Delta z$  的增大而下降。在  $\Delta z$  相同时,  $F$  数越小, MTF 下降越大, 说明相对孔径越大, CCD 拼接的共面性误差对成像质量要求越高。

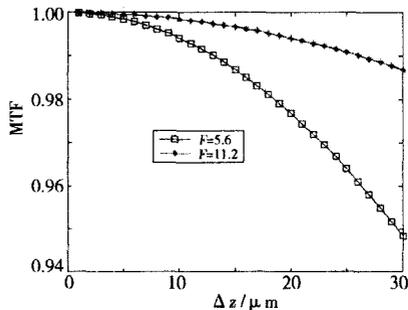


图5 共面性误差  $\Delta z$  引起的 MTF 下降

### 3 结论

从以上的分析可以看出, 光学拼接时各个误差对 TDI-CCD 相机的 MTF 的影响不同。两片 TDI-CCD 的搭接不会影响相机的调制传递函数。直线性误差中 TDI 方向与推扫方向的角度会影响相机的前向和横向调制传递函数。共面性误差同时影响相机的前向和横向上的调制传递函数。

给出了拼接误差中的各个误差对 TDI-CCD

相机前向和横向 MTF 的影响方程, 可在拼接前设定 MTF 标准, 反过来求得各个拼接精度标准, 由此使拼接精度在现有技术条件下很容易实现, 对相机成像质量不产生影响或产生的影响很小。

#### 参考文献:

- [1] Sadowski H. Large time delay and integration focal plane assembly with an optically contiguous pixel format[J]. Proc. SPIE, 1980, 217:111-117.
- [2] 杨桦, 郭悦, 伏瑞敏. TDICCD 的视场拼接[J]. 光学技术, 2003, 2(29):226-228.
- [3] 张毅, 李英才, 王虎. 航天 TDI-CCD 亚像元相机的 MTF 研究[J]. 光子学报, 2005, 10(34), 1590-1592.
- [4] 吕乃光. 傅里叶光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006. 29-39.
- [5] 王之江. 光学技术手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987. 932-933.
- [6] Slater P N. Effects of atmosphere on oblique reconnaissance[J]. Proc. SPIE, 1985, 561:42-46.

#### 作者简介:

肖占全(1979—), 男, 河北遵化人, 硕士生, 主要从事航测相机结构研究。

E-mail: xzq9829@163.com

(上接第 794 页)

### 6 结论

目前, 衡量图像的质量还难以建立客观标准, 本论文中采用的算法虽然已取得一定的成效, 但是为了达到更好的效果, 需要进一步对视频底层图像挖掘进行深入的理论研究, 寻求挖掘参数的自动寻优算法。本文视频图像挖掘针对本地文件, 下一步工作可与摄像机或视频采集设备配合使用, 可以对所观察的影像进行时实的视频传输及影像记录工作, 建立夜视成像系统的后端处理方法和技术。

#### 参考文献:

- [1] 陈福胜. 现代夜视技术及其发展方向[J]. 舰船光学, 2001, 37(4):1-4.
- [2] 谢正祥, 王颖, 彭子芯, 等. 基于 Zadeh-X 变换的图像隐藏和挖掘技术[J]. 中国医学物理学杂志, 2007, 24(6):9-11.
- [3] Hsu W, Lee M L, Zhang J. Image mining: trends and developments [J]. J. of Intelligent Information

Systems, 2002, 19(1):7-23.

- [4] 宋方洲, 王志芳, 谢正祥. 一种视觉对比度分辨率测试方法[P]. 中国发明专利, 2007-10-10.
- [5] 王国权, 仲伟波. 灰度图像增强算法的改进与实现研究[J]. 计算机应用研究, 2004, (4):175-176.
- [6] 栗载福, 谢正祥, 郭必贵, 等. 模糊数学与医学[M]. 重庆: 科学技术文献出版社重庆分社, 1989. 127-128.
- [7] 武英. 基于直方图的暗背景图像自适应增强[J]. 南京晓庄学院学报, 2006(6):72-75.
- [8] Zhang Yu, Wang Xi-qin. New image enhancement algorithm for night vision[J]. J. Qinghua University Science and Technology, 1999, 39(9):201-203.
- [9] 史再峰, 刘志贵, 姚素英. 基于动态阈值的视频对比度调节的电路设计[J]. 电子技术应用, 2007(2):61-62.
- [10] 谢正祥, 王志芳, 刘燕欢, 等. 灰度谱分级平坦化理论[J]. 中国医学物理学杂志, 2006, 23(6):405-407.

#### 作者简介:

艾安娜(1982—), 女, 硕士研究生, 研究方向为视频图像处理和多媒体技术。

E-mail: aianna123456@163.com