

文章编号: 0258-7025(2003)Supplement-0082-03

TDI-CCD 推扫成像传递函数的数字仿真与分析

颜昌翔, 王家骥

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所空间光学部, 吉林 长春 130022)

摘要 针对现有文献对 TDI-CCD 成像传递函数的结论, 进行了数字仿真研究, 将文献中结论加以修正阐述, 引入了最大传递函数与平均传递函数的概念, 使 TDI-CCD 推扫成像的传递函数计算更为准确。

关键词 信息光学; TDI-CCD; 数字仿真; 传递函数

中图分类号 O242.1

文献标识码 A

Numeric Simulation and Analysis of MTF in TDI-CCD Push-sweeping imaging

YAN Chang-xiang, WANG Jia-qi

(Space Optics Department Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
The Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130022, China)

Abstract TDI-CCD is a special photo sensor that is widely applied in aerospace remote sensing. Analyzing the MTF of TDI-CCD will be helpful to study and apply it. This paper aimed at the conclusion about the MTF of TDI-CCD push-sweeping imaging, doing the numeric simulation. The analysis corrected the conclusion in the literatures. Two concepts, Max-MTF and Mean-MTF, are proposed with that the calculation of MTF in TDI-CCD push-sweeping imaging will be more nicety.

Key words information optics; TDI-CCD; simulation; MTF

1 引言

由于 TDI-CCD 器件采用了特殊的扫描方式, 必然在时间和空间位置的控制上带来特殊的要求^[1-5]。尤其是 TDI-CCD 相机行扫描速率的同步控制。TDI-CCD 器件的像元输出信号是地面同一景物在不同时刻和不同像元上曝光后得到的信号的叠加, 为保证尽可能地发挥 TDI-CCD 像元几何分辨力, 即达到 Nyquist 频率下高的输出传递函数, 要求每经过一个积分周期, 景物的像恰好移动一个像元的长度, 也就是要求 TDI-CCD 的行扫描速率与像移速率相匹配。在焦距固定的条件下, 像移速率与航天器轨道运动参数、姿态参数和地球自旋运动等参数有关, CCD 的行扫描速率实时地跟踪由以上参数确定的像移速率, 把行扫描速率的调整称为行扫描速率的同步控制。其目的就是把像移速率匹配后的残差控制在允许的范围内。针对现有文献对 TDI-CCD 成像传递函数的结论, 通过数字仿真手段

对推扫情况下的 TDI-CCD 成像传递函数作仔细的研究和拟合归纳计算。通过数字仿真研究, 将文献中结论加以修正阐述, 引入了最大传递函数与平均传递函数的概念, 使 TDI-CCD 推扫成像的传递函数计算更为准确。

2 仿真参数的定义与计算方法

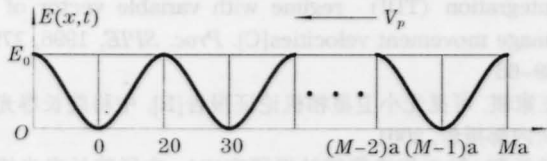
图像和 TDI-CCD 的几何关系如图 1 所示。图中横坐标为 TDI-CCD 的列方向位置坐标, a 为 TDI-CCD 的像元大小, M 为 TDI-CCD 的级数。纵坐标为像的照度, 由于在推扫成像时图像沿 TDI-CCD 列方向以 V_p (像移速度) 运动, 图像是空间频率为 f 的正弦波, 因此图像照度是位置和时间的函数, 可以用下式表示

$$E(x, t) = \frac{1}{2} E_0 \{1 + \cos[2\pi f(x - V_p t)]\} \quad (1)$$

其中, E_0 为正弦波图像像面照度的最大值; f 为图像的空间频率; V_p 为图像在 TDI-CCD 列方向的推扫速度。

作者简介: 颜昌翔(1973.8-), 男, 湖北省洪湖市人, 现为中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士后。

E-mail: yanxc@ciomp.ac.cn

图1 $f=f_N, t=0$ 时图像和 TDI-CCD 的几何关系Fig.1 Relationship between image and TDI-CCD when $f=f_N, t=0$

TDI-CCD 的行转移周期由 V_p 来确定, 当 CCD 相机控制器根据卫星的轨道、姿态等参数计算出 V_p 后, TDI-CCD 应根据 V_p 确定出行转移周期 (即 TDI-CCD 的积分时间) $T, T=a/V_p$ 。当 T 精确地符合上式时, 即没有像移匹配误差时, TDI-CCD 能输出最大的传递函数的图像信号。实际上由于种种原因, 存在像移匹配误差, 即 TDI-CCD 的行转移速率 V_c 与 V_p 的真值之间会存在一个误差量 ΔV , 为分析方便起见, 将这一误差归算到 V_p 中, 而 $V_c=a/T$, 即

$$V_p = a/T \pm \Delta V_p \quad (2)$$

其中

$$\Delta V_p = \frac{a}{T} \cdot \frac{k}{m} \quad (3)$$

(3)式物理意义为经过 m 级积分后, 总的推扫积分路程与真实的像移路程相差一个像元尺寸 a 的一个分数 $k(0 \leq k \leq 1)$, 即

$$mT \cdot \Delta V_p = ka \quad (4)$$

将以上的关系代入(1)式可得

$$E(x,t) = \frac{1}{2} E_0 (1 + \cos[2\pi f [x - \frac{a}{T} (1 \pm k/m) t]]) \quad (5)$$

正弦波图像经过 TDI-CCD M 级 (TDI-CCD 的最大级数, $m=M$) 推扫积分后的输出为一个曝光量的数列。

第 n 个输出为

$$H(n) = \sum_{i=1}^M \left[\int_{(n+i-2)T}^{(n+i-1)T} \left[\int_{(i-1)a}^{ia} E(x,t) dx \right] dt \right] \quad (6)$$

$$MTF_{\max} = \left| \text{sinc} \left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{f}{f_N} \right) \cdot \text{sinc} \left[\frac{\pi}{2} \cdot \frac{f}{f_N} \left(1 - \left| \frac{\Delta V_c}{V_p} \right| \right) \right] \cdot \text{sinc} \left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{f}{f_N} m \left| \frac{\Delta V_c}{V_p} \right| \right) \right| \quad (8)$$

$$MTF_{\text{mean}} = MTF_{\max} \left| \text{sinc} \left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{f}{f_N} \right) \right| \quad (9)$$

由拟合结果, 证实平均和最大调制传递函数的比值与像移速度匹配误差无关, 而与 f/f_N 呈 $\text{sinc}(\cdot)$ 函数关系。

通过以上叙述, 验证了文献关于 TDI-CCD 成像的结论, 通过对 TDI-CCD 推扫成像情况的仿真计算, 引出了最大调制传递函数和平均调制传递函

数归一化因子为

$$H_0(n) = \sum_{i=1}^M \left[\int_{(n+i-2)T}^{(n+i-1)T} \left[\int_{(i-1)a}^{ia} E_0 dx \right] dt \right] \quad (7)$$

因此归一化后, 结果为正弦波图像经过 TDI-CCD M 级推扫积分后输出的相对曝光量。

相对曝光量的序列为 $H_i(n)$, 根据(1)式的设定条件, 输入图像的调制度为 1, 由传递函数定义, 计算 TDI-CCD 推扫成像的调制传递函数, 只需计算 $H_i(n)$ 的调制度。可以看出在存在像移匹配误差的情况下, 输出的相对曝光量序列构成的图形与理想的正余弦函数有区别, 类似于在理想正余弦函数的基础上加了一个较低频的调制。要想准确评判这时的调制度, 必须增加考虑波动起伏的因素, 即输出相对曝光量分布的局部不一致。所以本文引入最大传递函数和平均传递函数的概念。

最大传递函数代表了输出图像的调制度最大值对应的传递函数, 平均传递函数代表了输出图像的调制度的平均值对应的传递函数, 平均传递函数在评价 TDI-CCD 推扫成像的调制传递函数更为全面。

计算最大传递函数和平均传递函数过程如下: 先计算出相对曝光量的分布的所有局部调制度, 再对所有局部调制度求最大值和平均值, 则得到最大传递函数和平均传递函数。

3 结论

将数值积分的结果进行拟合后, 获得了如下的解析结果。

通过 TDI-CCD m 级积分后, 在输出信号中可以达到的最大调制传递函数和平均调制传递函数的解析表达式分别为(8)式和(9)式。

数的概念并得出了其分析公式, 此结论优于文献记载。此公式可以应用于 TDI-CCD 相机的传递函数分析计算中。

参考文献

- 1 Suhail Agwan, Dave Dobson, William Washkurak et al.

A high speed dual output channel, stage selectable, TDI-CCD image sensor for high resolution applications [C]. *Proc. SPIE*, 1994, **2415**:124~133

- 2 M. Forrier, S. R. Kamas, M. Fred *et al.*. Megapixel image sensors with forward motion compensation for aerial reconnaissance applications [C]. *Proc. SPIE*, 1993, **2023**:80~93
- 3 A. I. Baklanov. Specialized CCD for the time delay and

integration (TDI) regime with variable vector of an image movement velocities[C]. *Proc. SPIE*, 1996, **2790**: 59~66

- 4 王家骥. 可见光小卫星相机论证报告[R]. 中科院长春光机所内部报告, 2001
- 5 颜昌翔. 航天相机像移补偿研究[D]. 中科院长春光机所 博士论文, 2001

计,又实现面阵输出,由式(1)可知,面阵输出图像,其分辨率只与像面像元尺寸有关,而与像元尺寸无关。因此,在像面像元尺寸一定的情况下,面阵输出图像的分辨率与像元尺寸成正比。面阵输出图像的分辨率与像元尺寸成正比,这为面阵输出图像的高分辨率提供了理论依据。面阵输出图像的分辨率与像元尺寸成正比,这为面阵输出图像的高分辨率提供了理论依据。面阵输出图像的分辨率与像元尺寸成正比,这为面阵输出图像的高分辨率提供了理论依据。

大量实验结果表明,面阵输出图像的高分辨率与像元尺寸成正比,这为面阵输出图像的高分辨率提供了理论依据。面阵输出图像的分辨率与像元尺寸成正比,这为面阵输出图像的高分辨率提供了理论依据。面阵输出图像的分辨率与像元尺寸成正比,这为面阵输出图像的高分辨率提供了理论依据。

参 考 文 献

- 1 王家骥. 可见光小卫星相机论证报告[R]. 中科院长春光机所内部报告, 2001
- 2 颜昌翔. 航天相机像移补偿研究[D]. 中科院长春光机所 博士论文, 2001

$$\begin{aligned}
 (8) \quad & \left| \frac{MTF_{TDI-CCD}}{MTF_{CCD}} \right| = \left| \frac{1 - \exp(-i\pi \cdot \Delta x \cdot \xi)}{i\pi \cdot \Delta x \cdot \xi} \right| \\
 (9) \quad & \left| \frac{MTF_{TDI-CCD}}{MTF_{CCD}} \right| = \left| \frac{1 - \exp(-i\pi \cdot \Delta x \cdot \xi)}{i\pi \cdot \Delta x \cdot \xi} \right|
 \end{aligned}$$

面阵输出图像的高分辨率与像元尺寸成正比,这为面阵输出图像的高分辨率提供了理论依据。面阵输出图像的分辨率与像元尺寸成正比,这为面阵输出图像的高分辨率提供了理论依据。面阵输出图像的分辨率与像元尺寸成正比,这为面阵输出图像的高分辨率提供了理论依据。

英文摘要

I. G. Baklanov, D. V. Lobanov, V. V. Vashurin *et al.*

TDI-CCD 相机输出图像的高分辨率与像元尺寸成正比,这为面阵输出图像的高分辨率提供了理论依据。面阵输出图像的分辨率与像元尺寸成正比,这为面阵输出图像的高分辨率提供了理论依据。面阵输出图像的分辨率与像元尺寸成正比,这为面阵输出图像的高分辨率提供了理论依据。

$$\begin{aligned}
 (10) \quad & \left| \frac{MTF_{TDI-CCD}}{MTF_{CCD}} \right| = \left| \frac{1 - \exp(-i\pi \cdot \Delta x \cdot \xi)}{i\pi \cdot \Delta x \cdot \xi} \right| \\
 (11) \quad & \left| \frac{MTF_{TDI-CCD}}{MTF_{CCD}} \right| = \left| \frac{1 - \exp(-i\pi \cdot \Delta x \cdot \xi)}{i\pi \cdot \Delta x \cdot \xi} \right|
 \end{aligned}$$

面阵输出图像的高分辨率与像元尺寸成正比,这为面阵输出图像的高分辨率提供了理论依据。面阵输出图像的分辨率与像元尺寸成正比,这为面阵输出图像的高分辨率提供了理论依据。面阵输出图像的分辨率与像元尺寸成正比,这为面阵输出图像的高分辨率提供了理论依据。

$$\left| \frac{MTF_{TDI-CCD}}{MTF_{CCD}} \right| = \left| \frac{1 - \exp(-i\pi \cdot \Delta x \cdot \xi)}{i\pi \cdot \Delta x \cdot \xi} \right|$$

$$\left| \frac{MTF_{TDI-CCD}}{MTF_{CCD}} \right| = \left| \frac{1 - \exp(-i\pi \cdot \Delta x \cdot \xi)}{i\pi \cdot \Delta x \cdot \xi} \right|$$

面阵输出图像的高分辨率与像元尺寸成正比,这为面阵输出图像的高分辨率提供了理论依据。面阵输出图像的分辨率与像元尺寸成正比,这为面阵输出图像的高分辨率提供了理论依据。面阵输出图像的分辨率与像元尺寸成正比,这为面阵输出图像的高分辨率提供了理论依据。

面阵输出图像的高分辨率与像元尺寸成正比,这为面阵输出图像的高分辨率提供了理论依据。面阵输出图像的分辨率与像元尺寸成正比,这为面阵输出图像的高分辨率提供了理论依据。面阵输出图像的分辨率与像元尺寸成正比,这为面阵输出图像的高分辨率提供了理论依据。