

长焦距全景式航空遥感器像拖影分析及补偿抑制方法

刘志明^{1,2} 朱明¹ 陈黎¹ 李清军¹ 张雪菲¹ 赵晓晖³

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 中国科学院大学, 北京 100049
³ 吉林大学通信工程学院, 吉林 长春 130022

摘要 摆扫式航空遥感器采用线阵时间延迟积分电荷耦合器件(TDI-CCD)作为成像探测器,对运动的目标成像时,在积分时间内,飞行与时间延迟积分扫描二维空间上都存在拖影现象,降低了遥感系统的调制传递函数,导致图像的分辨率下降。针对上述现象,分析了像拖影产生的原因并建立了数学模型,定量分析了像拖影对调制传递函数的影响,通过调制传递函数与图像分辨率之间的关系,建立了像拖影与图像分辨率之间的映射,并采用主动补偿的方法进行像拖影补偿。利用动态目标发生器、平行光管以及三轴摇摆台模拟飞行环境,对理论分析结果进行实验验证。实验结果表明,当控制精度在理论允许的误差范围内时,图像拖影现象得到了明显改善,提高了图像的分辨率。

关键词 遥感;图像拖影;图像分辨率;运动模糊补偿;主动补偿;调制传递函数

中图分类号 V447.3; TN942.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0711001

Long Range Analysis and Compensation of Smear in Sweep Aerial Remote Sensing

Liu Zhiming^{1,2} Zhu Ming¹ Chen Li¹ Li Qingjun¹ Zhang Xuefei¹ Zhao Xiaohui³

¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
³ College of Communication Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract For sweeping aerial remote sensor using linear array time delay integration charge-coupled device (TDI-CCD) as an imaging detector, the moving target imaging, integral time, flight and TDI scan two-dimensional space all suffer from streaking phenomenon. This reduces the sensing system modulation transfer function (MTF), and leads to the decrease of the image resolution. For the above phenomenon, we analyze the causes of image smear and establish a mathematical model for the quantitative analysis of the influence of image smear on the MTF. Mapping of the image smear to the image resolution is then founded through the relation between MTF and image resolution. Active compensation is performed on the image smear. Flight environment is simulated by use of dynamic target generator, parallel light pipe and three-axis turntable, through which the theoretical analysis results are verified experimentally. The experimental results show that when the control accuracy in a theoretically allowable error range, image smear phenomenon can be compensated and image resolution can be improved obviously.

Key words remote sensing; image smear; image resolution; motion blur compensation; active compensation; modulation transfer function

OCIS codes 280.1100; 350.0730; 110.4850

收稿日期: 2012-11-19; 收到修改稿日期: 2012-12-24

基金项目: 国家 863 计划(2009AA7010102)

作者简介: 刘志明(1982—),男,博士研究生,助理研究员,主要从事航空成像与测量技术等方面的研究。

E-mail: qwwwz0000@sina.com

导师简介: 朱明(1964—),男,研究员,博士生导师,主要从事图像跟踪与处理技术等方面的研究。

E-mail: zhu_mingca@163.com

1 引 言

航空遥感器以飞机或飞艇为平台来实现对地面景物的侦察或测绘,载体飞行及姿态的变化造成遥感器与地面景物目标之间的相对运动,使遥感图像产生拖影现象。机载航空遥感器的图像分辨率是评判遥感器性能的重要技术指标。随着技术的进步,航空遥感器逐步朝着远作用距离、高分辨率的方向发展,长焦距遥感设备大大提高了遥感侦察区域半径。随着制造工艺日益进步,电荷耦合器件(CCD)像元尺寸越来越小(小于 $10\ \mu\text{m}$),光学系统的分辨率也显著提高。但是长焦距光学系统对运动模糊补偿残差所导致的像移十分敏感,如果像移量超出某一范围($1/3\ \text{pixel}$),图像会产生拖影现象,分辨率会迅速下降^[1]。

图像拖影的形成原因主要有三种:1)物像的相对运动造成的运动模糊;2)光学系统像差带来的像叠加;3) CCD 像元过饱和导致电荷溢出到其他势阱中使图像对比度下降。其中后两种属于静态指标,通过优化光学系统设计和提升探测器件工艺可以改善。而载体运动造成的图像拖影,需要通过坐标变换和空间光线分析等方法建立像移模型,根据模型参数设计控制系统进行高精度主动补偿。由于飞行时的姿态变化和振动环境很难估计,存在多频谱的随机扰动和噪声干扰,在主动补偿无法有效地抑制图像拖影的情况下,可以应用数字图像滤波技

术对图像进行事后被动补偿恢复^[2]。

调制传递函数(MTF)是光学系统像质评价的一项重要综合指标,它表明了整个光学系统对景物成像的分辨能力。图像拖影会对整个系统的 MTF 函数产生一定的衰减,而 MTF 的下降必然导致图像分辨率的下降^[3]。通过计算和实验,可以建立像拖影与图像分辨率之间的映射关系,从而验证主动补偿的补偿精度。本文利用动态目标发生器、平行光管以及三轴摇摆台^[4,5]模拟飞行实验,分析实验室中动态成像对 MTF 的影响,进而预测在航拍过程中航空遥感器的图像质量,并采用主动补偿方法抑制图像拖尾现象。实验结果表明当控制精度在理论允许的误差范围内时,可以明显改善图像拖影现象,从而大大提高图像的分辨率。

2 飞行运动物像相对运动模型建立

摆扫式航空遥感器的光学系统由四部分组成,分别为扫描反射镜、光学镜头、调焦反射镜和 CCD。在飞行运动时为保证物像不发生相对运动,必须确保遥感器的主光轴对准目标,控制扫描反射镜的转速可以实现飞行方向上的运动分量补偿。图 1 为相对运动的光路示意图,设地面景物坐标系为 σxy ,通过扫描反射镜转折后发生坐标旋转,经物镜成像坐标变换,再经焦面反射镜转折光路到达 CCD 像面。

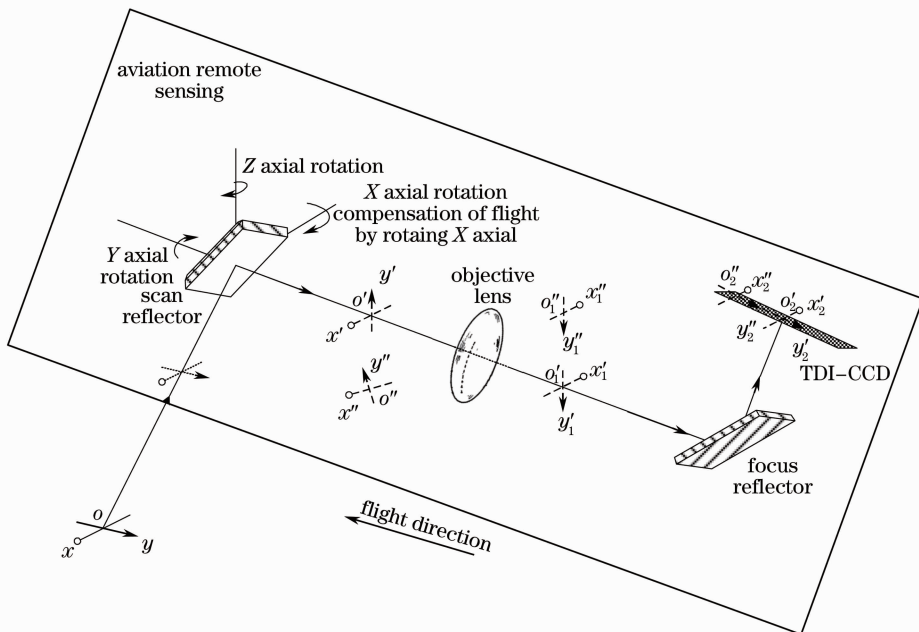


图 1 物像相对运动光路示意图

Fig. 1 Schematic optical diagram of object and image relative motion

扫描反射镜的功能是消除飞行方向上的物像运动,由反射镜共轭理论,可以建立反射镜入射光线和反射光线之间的映射矩阵。设非零向量 $\mathbf{W} \in \mathbf{R}^n$, $\mathbf{W} = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_N)^T$ 且满足条件 $\|\mathbf{W}\|_2 = 1$, 形如 $\tilde{\mathbf{H}} = \mathbf{E}(\mathbf{W}, \mathbf{W}, 2) = \mathbf{I} - 2\mathbf{W}\mathbf{W}^T$ 的 m 阶方阵称为 Householder 变换阵,其中 \mathbf{I} 为单位矩阵。设反射

镜入射向量为 \mathbf{A} , 反射向量为 \mathbf{A}' , 法线为 \mathbf{N} , $\mathbf{A}' = \mathbf{H}\mathbf{A}$, 其中 \mathbf{H} 为反射变换矩阵, $\mathbf{H} = \mathbf{I} - 2\mathbf{N}\mathbf{N}^T$ 。

景物坐标系经过反射镜后发生了坐标旋转,如图 1 所示,反射镜绕 X 、 Y 、 Z 轴旋转的角度分别为 α 、 θ 、 β , 则法线向量变换矩阵分别为

$$\mathbf{N}'_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_z \end{bmatrix}, \quad \mathbf{N}'_y = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_z \end{bmatrix}, \quad \mathbf{N}'_z = \begin{bmatrix} \cos \beta \\ \sin \beta \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_z \end{bmatrix}.$$

长焦摆扫式航空遥感器多为高空大角度倾斜成像,所以景物距传感器的距离远远大于其焦距,则其景深很大,故将物方坐标系 $\sigma\text{-}xy$ 设为二维空间坐标。由于反射镜在绕 Y 轴和 Z 轴转动时,传感器光学系统的各个部件之间无相对位移,所以在不考虑飞机横滚和偏流的情况下, Y 轴和 Z 轴转动不引起飞行方向上的物像运动。设扫描反射镜法线向量为 $[0 \ 0 \ -1]^T$, 则图 1 中的物方坐标系中的某向量经扫描反射镜光路折转后变为^[6]

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = (\mathbf{I} - 2\mathbf{N}\mathbf{N}^T) \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \left\{ \mathbf{I} - 2 \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} \right\} \left\{ \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} \right\}^T \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\alpha & \sin 2\alpha \\ 0 & \sin 2\alpha & -\cos 2\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}. \quad (1)$$

物镜的坐标变换阵为 $\begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$ 。焦面反射镜与 $\sigma\text{-}xy$ 平面夹角恒为 45° , 则景物坐标到 CCD 平面的

映射关系为

$$\begin{bmatrix} x'' \\ y'' \\ z'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\alpha & \sin 2\alpha \\ 0 & \sin 2\alpha & -\cos 2\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -\sin 2\alpha & -\cos 2\alpha \\ 0 & \cos 2\alpha & -\sin 2\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}. \quad (2)$$

当扫描反射镜绕 X 轴旋转时,主光轴指向向量 $[x \ y \ z]$ 与转角 α 关系满足(2)式。在图 1 中,飞机沿飞行方向运动时,地面景物点相对扫描反射镜发生了角位移,因而其在 CCD 面上发生移动,为了消除物像相对运动,则必须绕 X 轴顺时针旋转扫描反射镜以抵消物像间的相对位移,确保主光轴一直指向目标点。

除了飞行方向上的物像运动以外,摆扫方向上也存在像拖影现象。由于 CCD 是一种离散的成像器件,它不满足空间不变的条件,所以在每一行曝光时间内,物点会在时间延迟积分(TDI)方向上发生移动,如图 2 所示。物点在曝光的几十微秒瞬间沿 TDI 方向移动,在 CCD 上点目标同样变成了线目标。

航空遥感器扫描反射镜的角位移补偿精度是由其镜头焦距和 CCD 像元尺寸决定的,它应小于 n 个

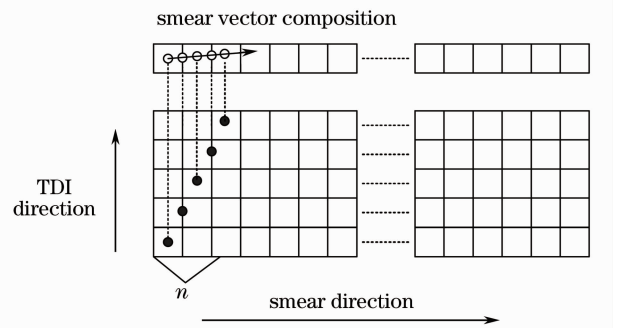


图 2 像元拖影示意图

Fig. 2 Schematic diagram of pixel smear

CCD 像元尺寸与镜头焦距之比, n 为系统在曝光时间内所允许的拖影像元数。补偿误差 $\Delta\theta \leq nDT/f$, 式中 n 为像素数, D 为像素尺寸, T 为曝光时间, f 为焦距。

在图 2 中,在无物像相对运动的情况下,像点仅成像在第一个像元中心点上,但是受扫描反射镜控制系统精度、抑制扰动收敛速度和 CCD 采样频率的影响,在像拖影主动补偿过程中,实现物像完全相对静止是不可能的,在曝光时间内,像点会在第 2 个、第 3 个、……、第 m 个像元二维方向上移动,这使得点目标拖影成为具有二维方向矢量线目标,拖影越严重,系统的 MTF 下降越快,分辨率越低。

3 拖影图像退化对分辨率的影响

在曝光时间内探测器与地面景物发生相对运动产生了像拖影现象,其矢量值由拖影程度的大小和方向来表示。系统的总像拖影模糊量是各个模糊源矢量叠加作用的结果,其像拖影模糊模型为^[7]

$$I'(x) = I(x) * \text{rect}\left(\frac{x}{s}\right), \quad (3)$$

式中 $I'(x)$ 为像拖影作用后的图像; $I(x)$ 为原始图像; s 为像拖影宽度。对(3)式进行傅里叶变换可得

$$I'(f_x) = I(f_x) \frac{\sin(\pi s f_x)}{\pi s f_x}, \quad (4)$$

式中 f_x 为目标的空间频率。

飞行方向上的像拖影图像的 MTF 为

$$f_{MT} = \frac{\sin(\pi s f_x)}{\pi s f_x}. \quad (5)$$

摆扫方向上的模型与飞行方向上的模型一致,二者同时作用时作矢量和。由图 3 可知,随着曝光时间内像移量的增大,CCD 的传递函数迅速下降,当像移量为 2 pixel 时,奈奎斯特频率处的 MTF 便下降到 0 以下^[8]。人眼可以分辨 MTF 大于 0.02 的目标,所以在特征频率处像移量大于 2 pixel,人眼无法识别该特征频率的目标。

利用图 3 所表征的性质,可以判断出某一特征频

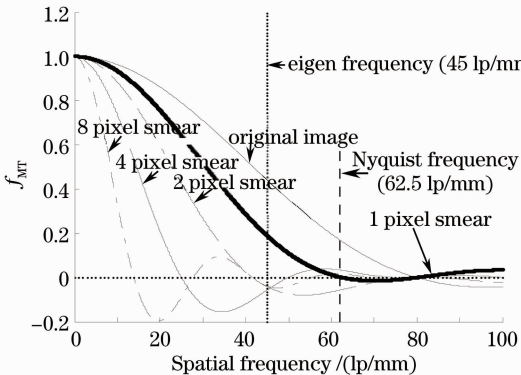


图 3 飞行方向上不同像移量时光学系统 MTF 衰减曲线
Fig. 3 Degradation curves of MTF with smear of different pixels along scan direction

率下的目标最大像移量阈值。如当可以分辨出 40 lp/mm 的目标而无法分辨 45 lp/mm 的目标时,则可以大致判断出像移补偿残差在 2 pixel 左右,由此可以预估像拖影主动补偿的精度。若控制精度不满足要求,需改进控制算法,改进算法后仍无法满足补偿精度要求(例如机载设备的振动环境成飞机姿态突变造成的图像拖影),只能对遥感图像进行被动补偿。

4 运动模糊主动补偿

4.1 飞行方向运动补偿

飞行方向上的运动补偿由伺服电机驱动扫描反射镜旋转以抵消飞行造成的物像之间的角位移来实现。根据分析,在补偿过程中对扫描反射镜的控制精度要求很高,要求速度补偿残差不大于 2 pixel。当转速较低时,机械结构的摩擦和非线性因素造成转速波动系数变大,因此消除或抑制系统中的周期性波动力矩扰动是进一步提高系统运动曲线跟踪性能的关键^[9]。如图 4 所示控制系统采用干扰观测器对外部扰动模型和未建模动态模型进行估计,从而减弱模型不确定性的影响。通过干扰观测器能够有效抑制负载转矩扰动对伺服系统的影响。

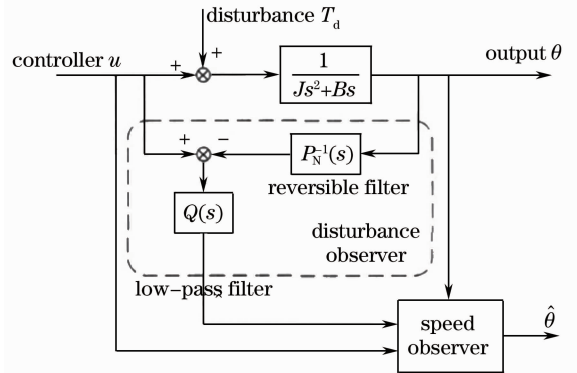


图 4 转速干扰观测器

Fig. 4 Speed disturbance observer

伺服系统的状态方程为

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + b_1 u + b_2 T_d \\ y = cx \end{cases}, \quad (6)$$

式中 $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{B}{J} \end{bmatrix}$, $b_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{J} \end{bmatrix}$, $b_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{J} \end{bmatrix}$, $c =$

$(1 \ 0)$, $x = \begin{pmatrix} \theta \\ \omega \end{pmatrix}$, $y = \theta$, 其中 θ 为角位移, ω 为角速度, J 为转动惯量, B 为阻尼系数, T_d 为扰动力矩。

建立线性状态观测器:

$$\dot{\hat{x}} = A_N \hat{x} + b_{N1} u + b_{N2} T_d + K(y - c\hat{x}), \quad (7)$$

式中下角 N 表示模型参数标称值, $A_N =$

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{B_N}{J_N} \end{pmatrix}, \quad b_{N1} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad b_{N2} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix},$$

$$K = \begin{pmatrix} k_1 \\ k_2 \end{pmatrix}.$$

干扰观测器中的滤波器为 $P_N(s) = \frac{1}{J_N s^2 + B_N s}$, 则干扰力矩估计值为

$$\hat{T}_d(s) = Q(s) \left[-u(s) + \frac{P(s)}{P_N(s)} u(s) + T_d(s) \right], \quad (8)$$

式中 $u(s)$ 为控制量, $Q(s)$ 为低通滤波器, $P(s) = \frac{1}{J s^2 + B s}$. 干扰观测器可以有效抑制模型摄动及外界扰动力矩^[10], 具有较强的稳健性, 控制系统速度回路采用二阶超前滞后控制算法, 可将系统开环增益设置为 2000 倍以上, 系统低速运动时, 闭环系统的控制精度也可达到 1% 以内。

本文介绍的长焦航空遥感器焦距为 1900 mm, 像元尺寸为 $8 \mu\text{m}$, 一个像元对应的张角为 $0.53 \mu\text{rad}$ (0.0000241°), 每个像元的曝光时间为 0.05 ms, TDI 级数为 50 级时, 在一个曝光周期内只要角速度不超过 $0.00964^\circ/\text{s}$, 像就不会移出该像元。根据几何光学, 扫描反射镜转一个单位角度, 出射光线旋转两个单位角度, 故要保证像移动量小于 2 pixel, 扫描反射镜的控制精度误差应小于 $0.00964^\circ/\text{s}$ 。控制系统输入为阶跃信号, 幅值为 $0.05^\circ/\text{s}$, 数字反馈陀螺输出通过数字信号处理 (DSP) 数字采样器观测, 得到闭环阶跃响应曲线, 其结果如图 5 所示, 其中横轴为时间, 纵轴表示速度, 根据数据统计, 稳速后速度均值为 $0.048^\circ/\text{s}$, 均方根为 $0.0088^\circ/\text{s}$, 满足控制精度要求。

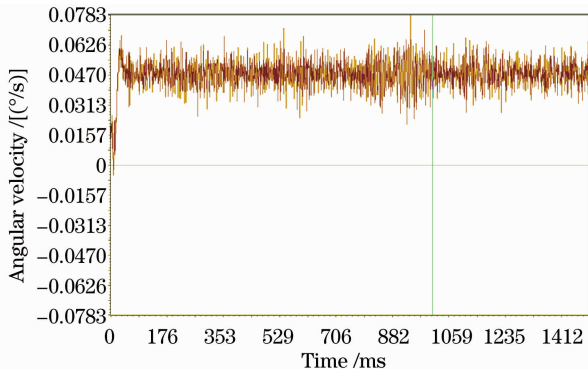


图 5 控制系统速度响应曲线

Fig. 5 Velocity response curve of control system

4.2 摆扫方向运动补偿

摆扫方向 (TDI 方向) 的运动模糊是由于 CCD 的离散采样特性造成的, 在一个行曝光周期内, 由于摆扫运动使得地面景物的像在 CCD 的像元上连续运动, 而 CCD 的一个像元只能对连续运动的点离散采样。如图 6 所示, 每隔一个周期行转移同步脉冲, TDI-CCD 便将该行的积分电荷转移至下一行像元中去, 在此过程中运动景物的像产生的电荷会在这一像元上积分, 这使得像元间的对比度下降, 造成 TDI 方向上的 MTF 下降, 影响图像的分辨率^[11]。

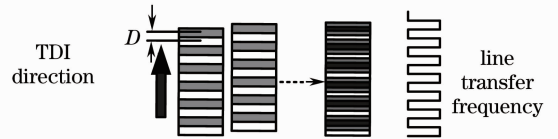


图 6 TDI 方向运动模糊示意图

Fig. 6 Schematic diagram of TDI direction smear

产生 TDI 方向上的像拖影现象的原因有两种, 即行转移同步脉冲脉宽波动导致的图像相位移和离散时间采样造成的同一像元对不同像点曝光。保证行转移同步脉冲的平稳性, 就是确保行转移脉冲的脉宽恒定, 这样第 i 次电荷转移的起始相位就不会波动; 增加 TDI-CCD 时钟相数, 将原来的 CCD 行转移同步脉冲时钟细分, 当相数由 1 增加到 p 时, 线阵 TDI-CCD 在 TDI 方向上的像移量达到 D/p (D 为像元中心距) 时便进行电荷转移^[12], 随着 p 的增大, 物像的相对位移量逐渐减小, 当 $p \rightarrow \infty$ 时, CCD 由离散时间采样变为连续时间采样, 由采样造成的 TDI 方向上的像拖影现象消失^[13]。其 MTF 对比曲线如图 7 所示。

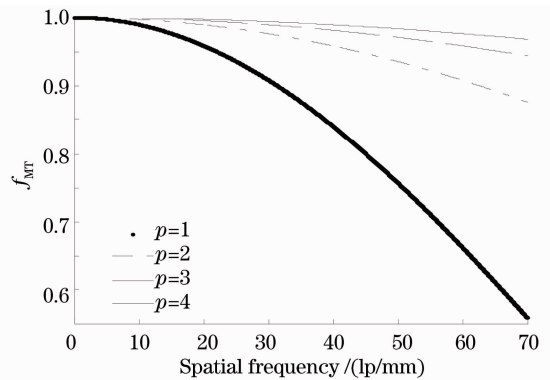


图 7 TDI 时钟相数取不同值时的 MTF 曲线

Fig. 7 Curves of MTF with different TDI clock phases

5 实验结果与分析

如图 8 所示, 全景式航空遥感器靠 TDI 积分摆

扫成像,扫描反射镜控制视轴指向。在动态成像实验室中,借助动态目标发生器模拟飞行运动景物目标,动态目标发生器靶面装订4#鉴别率板,按一定速度转动,通过平行光管将动态景物目标变成平行光,在遥感器扫描反射镜前可以看到运动的25组不同空间频率的靶标,根据目标景物转动的角速度计算出扫描反射镜的补偿角速度,从而控制扫描反射镜转动,补偿模拟飞行方向的像拖影。采用四相TDI-CCD时钟,20 kHz±1%的行转移频率的控制策略,抑制摆扫方向上的像拖影,提高其MTF。该实验装置可以同时验证飞行方向和摆扫方向上的二维补偿精度。

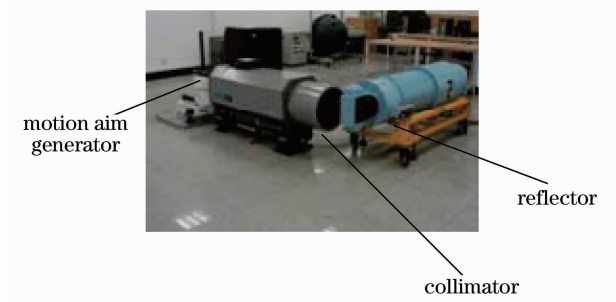


图 8 动态成像实验装置

Fig. 8 Dynamic imaging experiment system

该传感器采用8 μm大小像元,其CCD的奈奎斯特频率为62.5 lp/mm,根据光管焦距与动态目标发生器旋转半径的折算,4#鉴别率板的每组靶标所对应的空间频率如表1所示。

图9为不同补偿精度下的实验图像对比,通过

表 1 4#鉴别率板每组靶标的空间频率

Table 1 Target spatial frequencies of 4# identification plate

Group	Spatial frequency /(lp/mm)
1	32.9
2	34.84
3	36.9
4	39.1
5	41.4
6	43.89
7	46.5
8	49.3
9	52.2
10	55.2
11	58.4
12	62.1
13	65.7
14	69.5
15	73.7
16	78.4
17	82.6

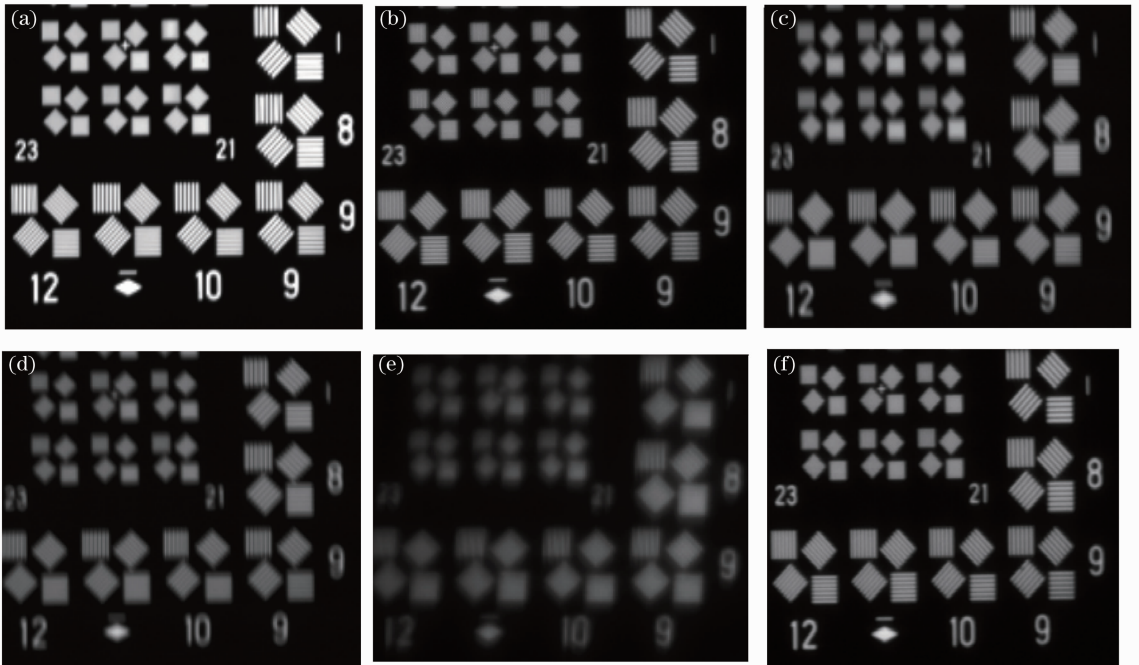


图 9 不同补偿精度下的实验图像对比。(a)静态图像;(b)1 pixel 像移图像;(c)2 pixel 像移图像;

(d)4 pixel 像移图像;(e)8 pixel 像移图像;(f)采用四相 TDI-CCD 时钟策略图像

Fig. 9 Experiment images comparison for different compensation resolution. (a) Static image; (b) 1 pixel smear image; (c) 2 pixel smear image; (d) 4 pixel smear image; (e) 8 pixel smear image; (f) TDI-CCD image using four-phase clock strategy

对比可以看出,不同程度的像拖影造成了 MTF 的下降,加上光学系统的奈奎斯特频率下降,使得系统无法分辨该频率下的目标。

图 9 中,水平方向为扫描反射镜补偿方向,垂直方向为 TDI-CCD 摆扫方向。其中图 9(a)为静态图像,可以分辨至第 13 组靶标,分辨的空间频率为 65 lp/mm;图 9(b)为水平像移量为 1 pixel 时的拖影图像,其垂直方向未采用四相 TDI-CCD 时钟策略,其中第 8 组靶标的分辨率小于 50 lp/mm;图 9(c)为水平像移量为 2 pixel 时的拖影图像,垂直方向未采用四相 TDI-CCD 时钟策略靶标,第 3 组靶标分辨率小于 35 lp/mm;图 9(d)为水平像移量为 4 pixel 时的拖影图像,垂直方向未采用四相 TDI-CCD 时钟策略,第 1 组靶标的分辨率小于 30 lp/mm;图 9(e)为水平像移量为 8 pixel 时的拖影图像,垂直方向未采用四相

TDI-CCD 时钟策略,分辨率下降到无法分辨 4 # 板的靶标,而且明显向右侧倾斜;图 9(f)为采用改进策略后的图像,第 12 组靶标分辨率升至 62 lp/mm,接近像元分辨率极限。可见采用主动补偿控制策略,可以将实验室动态成像分辨率提升至实验室静态分辨率的水平,表明该补偿方法有效地抑制了物像相对运动产生的像拖影现象。

前向飞行方向采用干扰观测器补偿,摆扫方向采用四相 TDI-CCD 时钟细分策略,保证了飞行成像的质量,有效地抑制了图像拖影现象。图 10 为采用该策略的飞行遥感图像,其中飞行海拔高度为 15863 m,遥感图像可以分辨铁道枕木(枕木间距约 0.3 m);航空遥感器的焦距为 1.5 m,其分辨率大于 45 lp/mm。



图 10 航拍遥感图像

Fig. 10 Remote sensing image of aerial shots

6 结 论

为了保证长焦距遥感相机的地面分辨率,运用坐标变换方法建立了前向飞行光轴指向变化模型,通过建立矩阵方程分析了物点在像平面上的运动方向和运动位移量以及摆扫方向的像移机理,得出图像的拖影表现为二者像移的矢量合成。利用傅里叶光学建立频域传递函数,定量分析了像拖影退化对 CCD MTF 数的影响。分析了影响其分辨率的主要因素,应用干扰观测器补偿控制算法,提高主动补偿伺服控制精度和动态补偿能力,减小了运动补偿控制残差,采用多相 TDI 时钟控制策略,抑制了摆扫方向上的像拖影。根据实验室动态实验和飞行实验

所获得的图片,可知采用主动补偿策略和多相 TDI 时钟控制策略有效地抑制了飞行过程中物像相对运动产生的像拖影现象,保证了航空成像的动态分辨率大于 45 lp/mm。

参 考 文 献

- 1 Zhai Linpei, Liu Ming, Xiu Jihong. Calculation of image motion velocity considering airplane gesture angle in oblique aerial camera [J]. Optics and Precision Engineering, 2006, 14(3): 490-494. 翟林培, 刘明, 修吉宏. 考虑飞机姿态角时倾斜航空相机像移速度计算[J]. 光学精密工程, 2006, 14(3): 490-494.
- 2 Zhang Shuqing, Ding Yalin, Li Youyi et al.. Computing aerial camera's image plane revolution by coordinate conversion [J]. Optical Instrument, 2007, 29(1): 22-26. 张树青, 丁亚林, 李友一等. 应用数学坐标变换方法计算航空相

- 机像面旋转[J]. 光学仪器, 2007, 29(1): 22-26.
- 3 Zheng Lina, Zhang Tao, Kuang Haipeng et al.. Image motion velocity measurement technique based on spatial filtering effect of line CCD for aerial camera [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(11): 1112002.
- 郑丽娜, 张涛, 匡海鹏等. 基于线阵 CCD 空间滤波效应的航空相机像移速度测量方法[J]. 光学学报, 2012, 32(11): 1112002.
- 4 Yuan Guoqin, Ding Yalin, Hui Shouwen et al.. Grouped approach algorithm for mapping camera calibration based on method of exact measuring angle [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(1): 0112005.
- 远国勤, 丁亚林, 惠守文等. 基于精密测角法的测绘相机分组渐进标定算法[J]. 光学学报, 2012, 32(1): 0112005.
- 5 Yuan Guoqin, Ding Yalin, Hui Shouwen et al.. Analysis of forward image displacement compensation and error correction for area scan color CCD airborne mapping camera [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(1): 0128001.
- 远国勤, 丁亚林, 惠守文等. 彩色大面阵航空测绘相机前向像移补偿分析及误差纠正[J]. 光学学报, 2013, 33(1): 0128001.
- 6 Warren J. Smith. Modern Optical Engineering (4th edn.) [M]. Bellingham: SPIE Press, 2008.
- 7 Sun Baizhong. Introduction to Advanced Optics (Book 3) [M]. Changchun: Changchun Press, 1986. 66-67.
- 孙柏忠. 高等光学导论(第三册)[M]. 长春: 长春出版社, 1986. 66-67.
- 8 Han Changyuan. Fundamental Theory and Application of Information Optics [M]. Changchun: Changchun Press, 1989. 155-156.
- 韩昌元. 信息光学基础理论及其应用[M]. 长春: 长春出版社, 1989. 155-156.
- 9 Yu Ai, Yang Geng, Xu Wenli. Stability analysis and speed loop design of speed control system with disturbance observer [J]. J Tsinghua University, 2005, 45(4): 521-524.
- 于艾, 杨耕, 徐文立. 具有扰动观测器调速系统的稳定性分析及转速环设计[J]. 清华大学学报, 2005, 45(4): 521-524.
- 10 Qiu Xiaobo, Dou Lihua, Shan Dongsheng. Design of active disturbance rejection controller for electro-optical tracking servo system [J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(1): 220-226.
- 邱晓波, 窦丽华, 单东升. 光电跟踪系统自抗扰伺服控制器的设计[J]. 光学精密工程, 2010, 18(1): 220-226.
- 11 Wang Ling, Zhang Ping, Feng Huajun et al.. An inversion analysis method based on multi-shift imaging for improvement of CCD imaging resolution [J]. Opto-Electronic Engineering, 2003, 30(3): 62-65.
- 王凌, 张平, 冯华君等. 用多次移位成像提高 CCD 成像分辨力的反演解析法[J]. 光电工程, 2003, 30(3): 62-65.
- 12 Yang Yongming, Li Xinyang, Zhao Jiabin. Scanning modulation transfer function analysis of push-broom linear TDI CCD [J]. J Applied Optics, 2011, 32(5): 872-877.
- 杨永明, 李新阳, 赵嘉鑫. 推扫式线阵 TDI-CCD 扫描调制传递函数分析[J]. 应用光学, 2011, 32(5): 872-877.
- 13 Steven L. Smith, James Mooney, Theodore A. Tantalio. Understanding image quality losses due to smear in high-resolution remote sensing imaging systems [J]. Opt Eng, 38(5): 821-826.

栏目编辑: 张 腾