

# 高线性大摆角扫描技术研究

陈洁, 朱江, 浦恩昌, 赵海生, 苏君红

(昆明物理研究所, 云南 昆明 650223)

**摘要:** 针对采用长线列焦平面红外探测器的高端热像仪发展需求, 提出研究高线性大摆角扫描技术。从伪物扫描方式、扫描匹配技术、等时间采样和等角度采样、扫描器控制带宽分析、控制对象系统辨识、数学模型建立和控制器设计实现等方面展开论述, 并给出设计验证实例。

**关键词:** 红外焦平面; TDI; 扫描器; 扫描匹配技术

**中图分类号:** TN216 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8891(2013)12-0793-05

## Research on the High Linearity and Large Swing Angle Scanner Technique

CHEN Jie, ZHU Jiang, PU En-chang, ZHAO Hai-sheng, SU Jun-hong

(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

**Abstract:** Aiming at the developing request of the high-end thermal imager with long line FPA detector, this paper performs research on the high linearity and large swing angle scanner technique. The contents consist of fake object scan, scan matching technique, average time sampling and average angle sampling, control bandwidth analysis of scanner, system identification of control object, math model building and design of scanner controller. The example of design verification is given.

**Key words:** infrared focal plane, TDI, scanner, scan matching technique

### 0 引言

线列焦平面红外探测器成像必须借助光机扫描覆盖视场, 由于应用的特殊性, 要求扫描精度高、响应时间快, 其研制过程涉及光、机、电、软件和自控技术领域, 设计难度大。而高线性大摆角扫描技术主要服务于采用小F数大相对孔径光学系统和长线列扫描型焦平面探测器的高端热成像系统, 要求扫描角度范围增大, 扫描线性度要求提高, 故必须尽快发展高线性大摆角扫描器技术。

在该技术领域, 需要研究以下技术问题:

### 1 伪物扫描方式

军用热像仪为了实现高速扫描、实时成像, 且要满足小体积要求, 通常采用伪物扫描<sup>[1]</sup>。如图1所示: 伪物扫描是在物扫描机构之前加装一套望远系统, 使光束口径变小。若不计望远镜的透射损失, 则在同样入射光束口径的条件下, 这种伪物扫描机构比物方扫描机构可以缩小扫描部件的尺寸, 有利于系统小型化及提高扫描速度。其缺点是结构较复

杂, 像差修正的难度较大, 并且为保证较高的透过率, 对镀膜工艺要求较高。

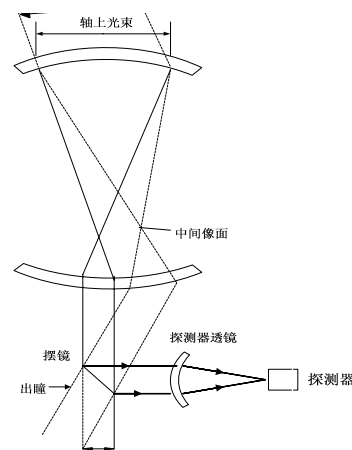


图1 伪物扫描方式示意图

Fig.1 Diagram of fake object scan

### 2 扫描匹配技术

在TDI型红外探测器成像应用中, 扫描器与TDI器件的扫描速度匹配问题是最重要的环节: 只有景物图像在像元间的时间延迟积分速度同步, 才

收稿日期: 2013-10-20; 修订日期: 2013-11-27.

作者简介: 陈洁 (1975-), 女, 研究员级高工, 博士研究生, 主要研究方向为红外系统伺服控制技术。E-mail: c\_jie2007@126.com。

能保证各级 TDI 像元对同一景物依次曝光,并最终输出同一景物的累加电荷信号,在不降低空间分辨率的前提下,大大提高光电灵敏度<sup>[2]</sup>。扫描速度匹配包含两方面内容:一是图像移动方向与 TDI 方向一致,二是图像移动速率与时间延迟积分速率相同<sup>[3]</sup>。

扫描匹配对图像质量的影响主要是由于其对空间分辨率进而引起传函降低而引起的,根据 Nyquist 采样定理,一个红外探测器能够分辨的最高空间频率等于其空间采样频率的一半,这个频率称为 Nyquist 极限频率。设像元中心间距为  $d$ , Nyquist 极限频率的表达式为:

$$f_N = \frac{1}{2d} \quad (1)$$

扫描速度失配对 TDI 器件分辨率的影响,可采用调制传递函数 (MTF) 来进行评价。红外探测器的曝光积分过程可以看作一个有限宽度的孔径  $Md$  对一定空间频率  $f$  的静止波采样,成像结果为输入图像的光强分布函数与成像系统看线扩展函数的卷积。输入光强分布函数以空间频率为  $f$  的正弦波光栅作参考,通过卷积运算,可得:

$$MTF_{\text{integ}} = \sin(\pi df) / (\pi df) \quad (2)$$

TDI 器件的时间延迟积分过程和图像运动速度若是失配,会导致不同目标的信号电荷累加,产生锯齿状现象,降低图像质量和分辨率。对于  $M$  级 TDI 器件,设延迟积分和扫描平均速度为  $v$ ,速度失配量为  $\Delta v$ ,则扫描过  $M$  个像元后失配距离为  $Md \cdot (\Delta v/v)$ 。只考虑速度失配效应,可将其看作一个宽度为  $Md \cdot (\Delta v/v)$  的有限孔径采样空间频率  $f$  的静止波。可求得:

$$MTF_{\Delta v} = \sin(\pi dfM \frac{\Delta v}{v}) / (\pi dfM \frac{\Delta v}{v}) \quad (3)$$

在 Nyquist 频率,当  $\Delta v=0$  时,  $MTF_{\Delta v}=1$ ,即速度完全匹配不影响图像分辨率。当  $M \cdot (\Delta v/v)=2$  时,  $MTF_{\Delta v}=0$ ,图像完全模糊。据工程经验,定义  $M \cdot (\Delta v/v)=0.1$  为 TDI 器件的速度失配容限,即 4N 型探测器,其速度失配需限制在 0.25% 以内,才能保证成像质量。而对于 6N 型,这个值将需要提高到 0.16% 以内。也就是说热成像扫描器线性度指标与红外探测器 TDI 级数  $M$  有直接关系。

然后可以确定扫描角度,如图 2 所示,长线列焦平面靶面垂直方向尺寸  $H$  增加,要保持图像的长宽比例  $r$ ,则水平扫描线距离相应必定增加,探测器透镜焦距受整机尺寸限制不可能取得太大,同时还要折衷考虑摆镜尺寸也不能太大,由此得出如式

(4)所示,扫描角度  $\gamma$  必然增加,这正是“大摆角”提出的由来。

$$\gamma = \frac{Hr}{f_d} \quad (4)$$

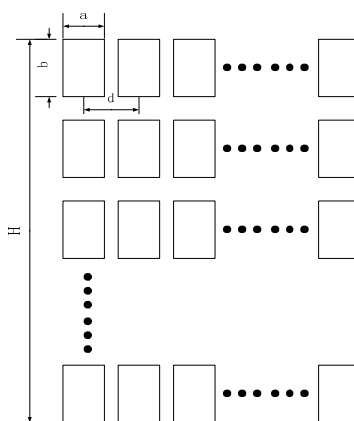


图2 探测器像元分布示意图  
Fig.2 Diagram of detector array

随后可计算扫描速度,以配合 Sofradir 480×6 型 TDI 探测器为例,TDI 级是一个 6 级模拟移位寄存器,它完成同一通道中 6 个探测器信号的叠加,每个像元的自动增益确保得到相同的总信号。公式如下:

$$s_6(t) = \frac{1}{6} \times [s_6(t) + s_5(t-3T) + s_4(t-6T) + s_3(t-9T) + s_2(t-12T) + s_1(t-15T)] \quad (5)$$

式中:  $T$  表示列周期时间;  $s(t)$  表示第  $i$  个像元在  $t$  时刻的输出信号,  $i=1, 2, \dots, 6$ ;  $s(6)$  表示经过 6 级 TDI 后的输出信号。由式(5)可以看出,每个像元的最终输出是经过 15 个列周期才完成的,而且每 3 个列周期累加一次,经过 5 次累加完成一次 TDI。

理论最佳扫描线速度为  $v=d/(3T)$ ,换算为角速度应为:

$$\omega = \frac{d}{3fT} \quad (6)$$

而扫描速度匹配工作就是让实际扫描速度  $\omega' = d\gamma/dt$  能够尽量接近以上理论值也即提高系统扫描线性度的过程。

### 3 等时间扫描与等角度扫描

扫描摆镜镜面加工误差、扫描速度不均,与探测器采样延迟匹配误差,扫描零位配准误差,扫描器与后端成像电路未实现采样时空匹配,均会引入非线性和不一致性,为了尽可能地减少此类问题,除了提高扫描器运行稳定性、扫描线性度之外,另一个关注点就是扫描之后的采样方式<sup>[4]</sup>。

扫描成像系统,为了减少图像的几何失真,一般都是采用均匀间隔采样方式<sup>[5]</sup>,主要有均匀时间间隔和均匀空间间隔两种方式。具体到本文扫描器的应用,可以进一步把均匀空间间隔限定为等角度空间。从本质上看,为了和探测器TDI积分过程匹配,避免图像失真,其实最终需要得到的是均匀空间间隔的扫描,若是扫描速度稳定性足够高,两种采样方式区别不大,但在扫描线性度存在缺陷的情况下,两者则必须分别讨论。

在扫描型热成像系统中,最常见的方式是采用容易实现的等时间间隔采样:利用一个稳定的时钟同步信号作为采样保持器的控制信号来实现。这种采样方式要求扫描镜以严格等速度运动时,被采样物体在相等的时间内移过相等的角度(路程)。但是如图3所示,事实上摆镜的实际摆动速度总与理想存在较大误差,接下来分析这里可接受的误差限。

由于热成像系统要求的图像配准精度通常为1/5~1/3个像元,当系统采用等时间采样方式时,线列探测器接收图像信号如图3所示。

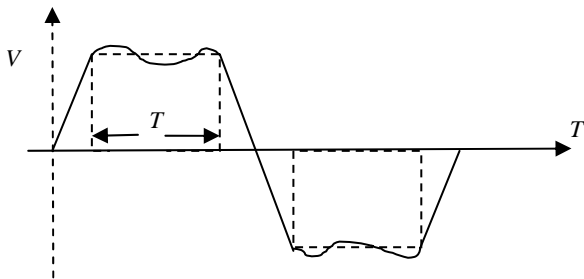


图3 扫描摆镜摆速对时间的曲线

Fig.3 Curve of scanning mirror speed vs. time

设每行的采样次数为 $L$ ,每行采样总时间为 $T_s$ ,成像系统的总有效视场为 $\lambda$ ,瞬时视场为 $\theta$ ,在扫描方向上(此处不考虑垂直方向的配准精度,由光机定位精度决定)相邻两像元间允许的速度变化 $\Delta\theta$ 应满足:

$$\int_{(N-1)\frac{T_s}{L}}^{N\frac{T_s}{L}} \Delta\theta \leq \frac{1}{5}\theta \sim \frac{1}{3}\theta \quad (N=1,2,\dots,L) \quad (7)$$

考虑最简单的 $\Delta\theta$ 与时间无关,也即在扫描线性段上的情况,因为扫描镜为平面反射镜,可得出扫描镜的转动速度应为允许速度的一半,则:

$$\left| \Delta\theta \right| \leq \frac{L\theta}{10T_s} \sim \frac{L\theta}{6T_s} \quad (8)$$

上式成立的条件是扫描控制系统具有足够大的转速变化分辨率(不小于 $\left| \Delta\theta \right|$ )和足够快的速度调节

灵敏度(能够在 $<1/L$ 的时间内对转速实施校正)。由于 $M=\lambda/\theta$ ,取平均速度 $C=\lambda/I$ 代入上式得:

$$\left| \Delta\theta \right| \leq \frac{\lambda}{10T_s} \sim \frac{\lambda}{6T_s} = \frac{C}{10} \sim \frac{C}{6} \quad (9)$$

为了达到成像系统的图像配准精度,就要求扫描器在运行过程中应具有良好的等角速性,即扫描系统应具有良好的扫描线性度,此时,理想的情况应是扫描镜转过的角度严格随时间作线性变化。当扫描机构在扫描过程中的线性度不佳,其转速有一定变化的情况下,图像容易出现奇偶场数据交错呈锯齿状。

另外一种采样控制方式则是等角度采样,也就是直接采用由角度传感器给出的等角度信号控制采样,如图4所示。理论上等角度采样控制方式工作的扫描器,由于系统的采样位置与采样时刻无关,因此与扫描摆镜的转速无关,所以无论扫描系统的速度稳定性如何都能获得均匀的空间采样。

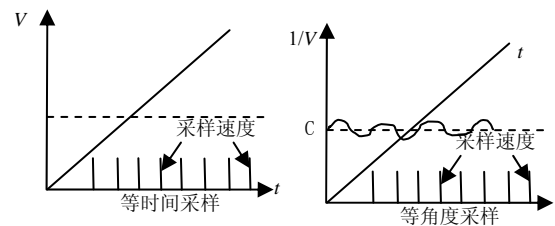


图4 等时间采样和等角度采样对比

Fig.4 Equal time sampling vs. equal angle sampling

采用等角度采样方式看起来似乎可以避开扫描线性度难以提高的技术难题,获得理想的均匀空间成像,事实上这是忽略了扫描速度与探测器TDI积分速度匹配的关键问题。在实际成像系统应用中,频繁更改系统积分周期和帧列周期也是不推荐采用的方式。最好的应用方式应该是结合采用两种采样方式:在零位附近采样角度信号,每场起始段都做一次零位校准,可有效避免累积误差。

## 4 控制器设计技术

### 4.1 控制带宽分析

该扫描运动形式属光栅扫描方式,扫描系统的控制命令是锯齿波函数<sup>[6]</sup>。典型的热成像系统要求扫描器响应如图5所示锯齿波波形,扫描频率50Hz,这是与最常见的PAL制式视频格式相对应的。扫描幅度取 $\pm 10^\circ$ ,扫描效率为85%。

利用MATLAB对此波形做FFT分析,得到波形图(如图6所示)。

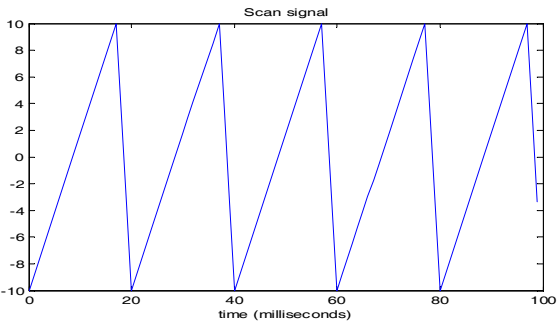


图5 扫描器控制命令波形  
Fig.5 Control wave for scanner

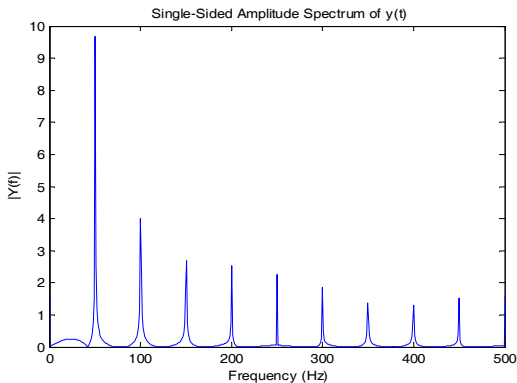


图6 锯齿波的FFT  
Fig.6 FFT of the sawtooth wave

由图6可见,要能够高保真地复现控制波形,控制带宽至少要达到500 Hz以上,也就是说即使只满足最小的采样频率要求,也必须达到1 kHz以上。工程中取到8倍,需采用4 kHz控制频率,也即50  $\mu$ s的控制周期<sup>[6]</sup>。

4.2 控制对象系统辨识

对扫描器精度影响较大的,主要有电机模型<sup>[7]</sup>、非线性摩擦模型和机械谐振模型。电机是控制系统的执行单元,其模型直接影响各环节控制器的设计,在分析电机模型基础上对电机电流进行闭环,闭环后可基本消除与速度成正比的反电势对输出力矩的影响<sup>[5]</sup>。

首先建立电机的数学模型,即寻找其传递函数,方法是先建立电机的数学方程:

$$\begin{cases} V = Ri + L \frac{di}{dt} + B \frac{d\theta}{dt} \\ T = K_t \cdot i = J \frac{d^2\theta}{dt^2} + c \frac{d\theta}{dt} + K_f \cdot \theta \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $B=K_t$  (反电势系数);  $c$  为阻尼系数;  $K_f$  为刚度系数;  $R$  为电机绕组电阻;  $J$  为转动惯量;  $i$  为电机工作电流; 变量  $\theta$  为电机转子旋转角度。

对(1)式做拉氏变换,即得:

$$\begin{cases} V = RI(s) + LsI(s) + B \cdot s\theta(s) \\ K_t I(s) = Js^2\theta(s) + cs\theta(s) + K_f \theta(s) \end{cases} \quad (11)$$

消去  $I(s)$ , 得:

$$\frac{\theta(s)}{V} = \frac{K_t}{(R + Ls)(Js^2 + cs + K_f) \cdot s + K_t^2 s} \quad (12)$$

两边积分, 得:

$$\frac{\theta}{V} = \frac{K_t}{(R + Ls)(Js^2 + cs + K_f) \cdot s + K_t^2 s} \quad (13)$$

此即电机的初始推导传函,代入电机参数及负载计算参数,利用MATLAB可做出其频响曲线(如图7所示)。

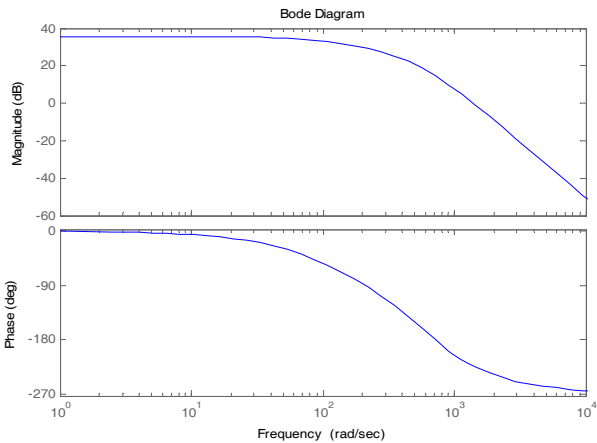


图7 电机系统传函波特图

Fig.7 Bode plot of motor transfer function

再利用扫频仪测出电机实际频率响应曲线(如图8所示)。实线为幅频响应曲线,虚线为相频响应曲线。

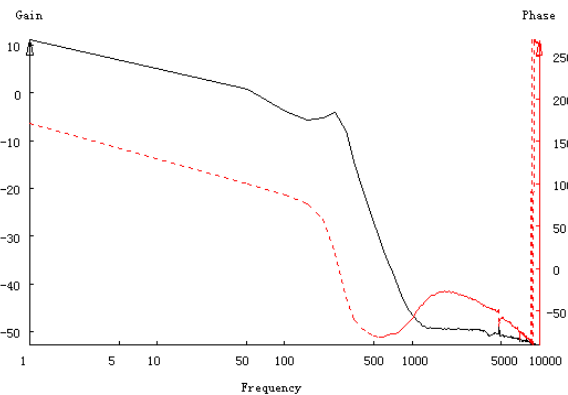


图8 扫描电机扫频响应图

Fig.8 Curves of scanner frequency response

两相对照,不断修正参数,最终确定电机数学模型。

### 4.3 校正器设计和系统仿真

得出数学模型后,再利用 MATLAB 工具箱 SISOTOOL 设计校正器,如图9所示,重复迭代作参数修正,确定校正器参数后,采用双线性变换法将其映射到数字域,发现其可归结为 IIR (无限脉冲响应) 数字滤波器设计,又在对 IIR 滤波器的基本组成模块二阶节的研究中发现:将递归型滤波器差分方程的阶数取为2,得到二阶节:

$$Y(n) = \sum_{k=0}^2 a_k x(n-k) + \sum_{k=1}^2 b_k y(n-k) \quad (14)$$

对上式作  $z$  变换,得:

$$Y(z) = \sum_{k=0}^2 a_k z^{-k} X(z) + \sum_{k=1}^2 b_k z^{-k} Y(z) \quad (15)$$

由此得:

$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{a_0 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}}{1 - b_1 z^{-1} - b_2 z^{-2}} \quad (16)$$

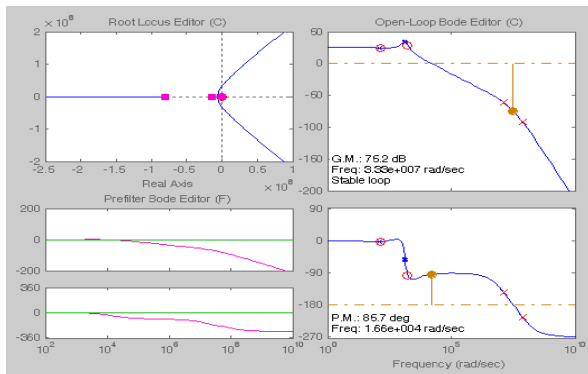


图9 SISO 仿真设计图

Fig.9 Plot of SISO simulation design

由于所得校正器中  $b_1$ 、 $b_2$  两系数值非常小,可忽略不计,则 IIR 滤波器简化为 FIR,系数确定。

再用 SIMULINK 仿真验证其正确性,并校核控制裕量,保证系统稳定性,如图10所示。

再调用滤波器设计工具,设计滤波器参数,写入控制器,实现控制功能。

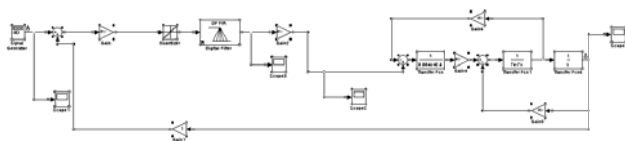


图10 扫描电机系统仿真图

Fig.10 System simulation block diagram of scanner

### 5 结语

从扫描热像形成过程看,扫描镜扫描速度不均匀;探测器采样延迟误差等很多因素均会造成图像失真,要获得完全没有失真的图像几乎是不可能的<sup>[8-9]</sup>。但通过实现对扫描镜运动的精确控制,可以获得较好的画质。图11所示为试制的高线性大摆角扫描器原理样配合  $480 \times 6$  探测器得到的热图像。



图11 采用高线性大摆角扫描器获得的热图像

Fig.11 Thermal image got by high linearity and large swing angle scanner

### 参考文献:

- [1] 白廷柱, 金伟其. 光电成像原理与技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2006.
- [2] 隋修宝, 陈钱, 顾国华. 扫描型热像仪扫描匹配技术[J]. 南京理工大学学报, 2008, 32(4): 492-495.
- [3] 庞新良. 机载光电稳定平台数字控制关键技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2007.
- [4] 简献忠, 张会林, 王朝立, 等. 等角度与等时间采样控制技术在扫描成像系统中的应用研究[J]. 量子电子学报, 2005, 22(3): 468-472.
- [5] Danial Joseph Kluk. An advanced fast steering mirror for optical communication[D]. Massachusetts Institute of Technology: 2009.
- [6] Francisc M Tapos, Derek J Edinger, Timothy R Hilby, et al. High bandwidth fast steering mirror[C]//SPIE, 2008, 5877: 1-14.
- [7] Zheng Yu, Zhang Guoyu, Xu Bing, et al. Bandwidth Improvement of Fast Steering Mirror by FEDA[C]//Proceeding of the 1st IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems, 2006: 52-55.
- [8] 杨磊. 高精度摆动扫描技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2007.
- [9] 邱民朴. 大视场红外扫描成像光学系统设计[J]. 红外技术, 2012, 34(11): 648-651.