文章编号:1007-2780(2014)05-0777-08

遥感 TDICCD 相机侧摆成像及定位精度优化

石俊霞[1*],李佩玥[2],李洪法[1],郭永飞[1]
(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 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室,吉林 长春 130033;)

摘要:为了满足空间遥感 TDICCD 相机侧摆成像时对图像定位精度的要求,提出了一种侧摆成像时图像定位精度优化方法。首先,根据遥感 TDICCD 相机的工作原理计算了星下点成像和侧摆成像 2 种模式下的行周期值。然后,在分析了侧摆成像会导致一段时间内出现定位误差太大的原因的基础上,介绍了利用记录 3 种信息:行周期信号上升沿时刻、行同步信号上升沿时刻和二者之间时间差来对图像进行定位的方法。最后,计算了提出方案的定位误差。实验结果表明,在一次成像过程中,产生的定位误差小于地面像元分辨率大小,能满足系统对于图像定位精度的要求。

关 键 词:遥感相机;TDICCD;侧摆成像;图像定位;精度
中图分类号:V445.8 **文献标识码**:A **doi**:10.3788/YJYXS20142905.0777

Scroll imaging of space TDI CCD remote sensing camera and optimazation of image location accuracy

SHI Jun-xia[1*], LI Pei-yue[2], LI Hong-fa[1], GUO Yong-fei[1]

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*;
2. *State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*)

Abstract: In order to satisfy the requirerment of image location accuracy for space TDICCD remote sensing camera at scroll imaging, a method of improving image location for scroll imaging is proposed. First, based on the principle of TDICCD remote sensing camera, the line period in normal imaging mode and scroll imaging mode is calculated respectively. Then, the reason is analyzed that image location error would be too large in scroll imaging mode after working a period of time, and the method of calculating the image location error is introduced by record three kinds of data: ringing edge time of line cycle signal, ringing edge time of line synchronous signal and the time difference between the above two signals. Finally, image location error is calculated. Experimental results indicate that the image location error is less than ground sample distance in an imaging process. It can satisfy the system requirement on image location accuracy.

Key words: remote sensing camera; TDI CCD; scroll imaging; image location; accuracy

收稿日期:2014-02-15;**修订日期**:2014-02-26.
基金项目:国防重大科研项目
* 通信联系人,E-mail:19031121@163.com

1 引 言

随着空间遥感技术的发展，遥感相机不仅分辨率不断提高，成像范围也在不断扩大。现有的CCD器件尺寸已经不能满足大焦面遥感相机的要求。目前都是采用多片TDICCD拼接技术来实现高分辨率和大视场的要求[1-4]。航天遥感相机的视场主要受限于光学系统大小，在光学系统一定的条件下，为了进一步扩大视场，要求遥感相机在侧摆模式下进行工作[5-6]。侧摆时，由于相机和地面有一定的倾斜角，使得相机可以观测的范围增大。在侧摆成像模式下，相机曝光期间CCD电荷转移和地面景物存在相对运动，调制传递函数会下降，导致图像模糊[7]。为了解决这一问题，通常采用分段异速的方式，即各片CCD在各自的行频下独立工作[8]。由于各片CCD的行周期之间存在误差，这样，在一段时间内，累积的误差就会导致由相机输出的图像中的时间信息和卫星时间产生较大的差异。此时会导致图像定位产生较大的误差。这里所谓的图像定位是指由TDICCD相机输出的图像来确定对应地面的实际地理位置，而由图像估算的目标点与实际地面位置的偏差称为图像定位误差[9]。图像定位误差与卫星姿态、轨道及相机对卫星时间的跟踪精度即相机守时均有关系[10]。目前对于图像定位的研究多是针对卫星姿态及轨道所引入的定位误差[11-12]，而对于相机守时引起图像定位误差研究的较少，本文针对相机守时引入的图像误差，结合实际工程研究，介绍了遥感TDICCD相机的组成及工作原理，着重分析了侧摆成像模式下图像定位存在的问题，提出一种提高图像定位精度的方法，计算结果表明，提出的方案能满足系统对于相机图像定位精度的要求。

2 遥感TDICCD相机成像系统组成及工作原理

2.1 TDICCD相机工作模式

遥感TDICCD相机工作模式可分为星下点工作模式和侧摆工作模式。侧摆工作模式是指相机在星下点工作模式的基础上倾斜一定的角度，该角度称为侧摆角。侧摆工作时相机可获得更大的视场。但是，在侧摆工作模式下，为了保证拍摄图像的清晰，各片CCD需采用不同的行周期。下面对星下点成像模式及侧摆成像模式下的行周期进行计算。

记CCD像元尺寸为 a，地面像元分辨率为GSD，相机焦距为 f，轨道高度为 H。

F 为光学系统焦点，φ 代表焦面任意一点 P 面任于视场中心点相对于焦点 F 所成的角度，像面速度 v_s，地面速度 v_g，则

$$v_g = \bar{v} \times \frac{R}{R+H}, \tag{1}$$

式中：$\bar{v} = \sqrt{\frac{GM}{R+H}}$ 为卫星平均速度，R 为地球平均半径，G 为万有引力常数，M 为地球质量。可见，在卫星轨道高度一定的情况下，v_g 不变。

星下点成像时成像几何关系如图1所示，CCD像面上的点 $ABCD$ 对应地面景物 $A'B'C'D'$，像面上任意一点 P 对应地面景物 P'。

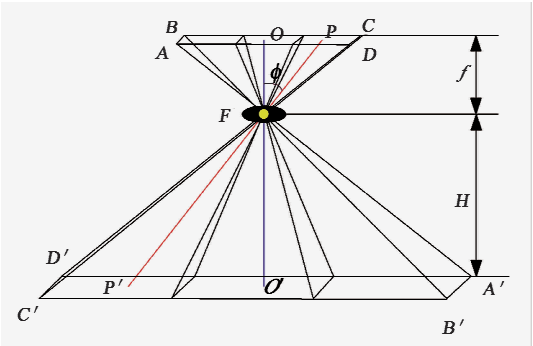


图1 星下点成像几何关系图

Fig. 1 Geometry relation of normal imaging

星下点成像时，像面上各点像移速度一致，

$$v_s = v_g \times \frac{f}{H}. \tag{2}$$

$$T = \frac{a}{v_s}. \tag{3}$$

设像面任意一点 P 对应地面 P'，则 P、P' 满足关系：

$$\frac{PF}{P'F} = \frac{a}{GSD} = \frac{f}{H}. \tag{4}$$

因此，星下点成像时

$$T = \frac{a}{v_s} = \frac{a}{f} \times \frac{H}{v_g}. \tag{5}$$

TDICCD相机侧摆成像时，以向右侧摆角度 θ 为例，成像几何关系如图2所示。同样，CCD像

面上的点 $ABCD$ 对应地面景物 $A'B'C'D'$，像面上任意一点 P 对应地面景物 P'。

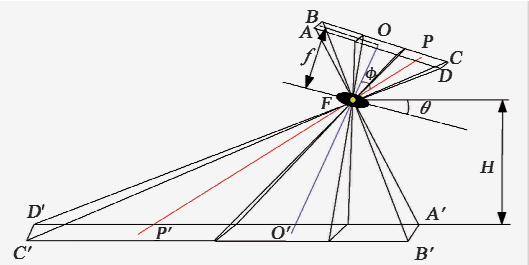


图 2　侧摆成像几何关系图

Fig. 2　Geometry relation of scolling imaging

侧摆成像时，像面上各点的像移速度各不相同，根据三角关系有：

$$PF = \frac{f}{\cos\varphi}, P'F = \frac{H}{\cos(\varphi+\theta)}. \tag{6}$$

因此，

$$\frac{PF}{P'F} = \left(\frac{f}{\cos\varphi}\right) / \frac{H}{\cos(\varphi+\theta)} = \frac{f}{H} \times \frac{\cos(\varphi+\theta)}{\cos\varphi}. \tag{7}$$

故

$$v_s = v_g \times \frac{PF}{P'F} = v_g \times \frac{f}{H} \times \frac{\cos(\varphi+\theta)}{\cos\varphi}. \tag{8}$$

$$T = \frac{a}{v_s} = \frac{a}{f} \times \frac{H}{v_g} \times \frac{\cos\varphi}{\cos(\varphi+\theta)}. \tag{9}$$

由式(9)可知，侧摆成像时，行周期值既与侧摆角度有关，也与焦面上像元位置有关。行周期值设置越精细，相机成像质量也越高，但同时相机设计也越复杂。在实际工程中，每个像元采用不同的行周期是不可实现的，对于拼接相机一般每片 CCD 采用单独的行周期即可满足系统对调制传递函数的要求[8]。

2.2　遥感 TDICCD 相机工作原理

本文以实际工程中 TDICCD 相机为例进行说明。该相机侧摆工作时侧摆角为 $-40°\sim+40°$。图 3 所示为 TDICCD 相机组成框图，TDICCD 相机由相机本体和相机控制器组成，相机本体是 TDICCD 相机的核心部件，它由 10 个成像单元组成，10 个成像单元组成完全一样，每个成像单元包含一片 TDICCD，10 片 TDICCD 在焦平面进行首尾拼接。相机本体的工作由相机控制器进行控制的，相机控制器为相机本体提供复位信号、摄像控制信号，行同步信号以及相机的工作参数，而相机控制器产生的行同步信号由星务控制系统的秒脉冲进行校正，校正周期为 500 ms。TDICCD 相机是以行为单位成像，相机工作时，成像单元 1-成像单元 10 在行周期信号的控制

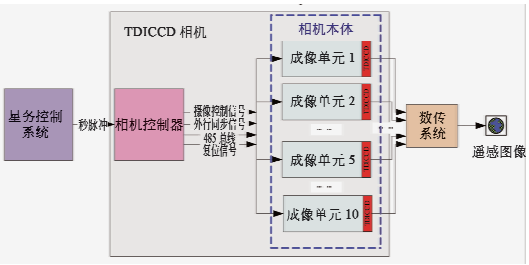


图 3　遥感 TDICCD 相机组成框图

Fig. 3　Structure of TDICCD remote sensing camera

下进行 CCD 的积分以及图像的输出，TDICCD 相机输出的图像经由数传系统传回地面。为了方便判读每一行图像的起始以及该行图像成像时刻的工作参数，在输出图像数据的时候，同时输出一些额外的数据，这些数据称为图像辅助数据，包括帧头、成像单元通道号、图像行号、卫星辅助数据、主控辅助数据以及工作参数(行周期参数、积分级数以及增益偏置参数等)等。卫星辅助数据主要用来标识当前工作过程的卫星工作状态，主控辅助数据描述的开始摄像后，每个秒脉冲到来时相机控制器发出的行同步信号的个数，以及秒脉冲上升沿到来后的第 1 个行同步信号上升沿的时刻。其中行同步信号的个数对应辅助数据中的“秒脉冲时刻对应行计数”，秒脉冲上升沿到来后的第 1 个行同步信号上升沿的时刻对应“秒脉冲整秒时刻”以及“行同步相对秒脉冲延时计数”。数传数据中的帧头、成像单元通道号以及图像行号是由成像单元生成，帧头用于标识一行数据的开始，通道号用于识别不同的成像单元，图像行号是用于标识当前输出的图像时开始摄像之后的第几行。而卫星辅助数据、主控辅助数据和工作参数是由相机控制器经由 485 总线发送给成像单元的。在成像单元输出数据时，由于工作参数更新频率比较低，为了减少图像辅助数据占用的字节数，将卫星辅助数据、主控辅助数据以及工作参数以 16 行为一个循环插入到图像数据中。在获得图像数据后，可根据摄像时刻卫星时间和 TDICCD 相机输出的辅助数据中的时间信息(主控辅助数据)来定位图像所在的地理位置。因此，TDICCD 相机的时间信息和卫星时间信息之间的差异至关重要，二者相差越小，图像定位误差越小。卫星时间与相机控制器时间的时间关联就是卫星发送给相机的秒脉冲信号，相机控制器与成像单元之间的时

间关联是外行同步信号，相机控制器的外行同步信号的上升沿由秒脉冲进行校正。因此，成像单元的时间信息可由外行同步信号的上升沿作为参考。

3 TDICCD 相机图像定位的实现

由 2.1 的分析可知，各成像单元实际使用的行周期信号与工作模式相关。在星下点工作模式时，各成像单元的行周期均相同，直接采用控制器发出的行同步信号作为实际使用的行周期信号。当成像单元在侧摆工作模式时，成像单元的行周期信号各不相同，此时，各成像单元采用自己产生的内部行同步信号作为实际使用的行周期信号。内部行同步信号由成像单元根据 RS-485 总线接收的行周期参数值生成。侧摆工作模式下，每片 CCD 行周期并不相同，因此实际使用的行周期信号与控制器发出的外行同步信号之间是异步的。

3.1 星下点模式图像定位的实现

在星下点工作模式下，相机实际使用的行周期信号就是控制器发出的行同步信号，因此每片 CCD 的行周期信号的上升沿时刻就是相机控制器发出的行同步信号上升沿时刻。

相机工作过程中，相机控制器发出的行同步信号上升沿时刻每隔 500 ms 由卫星的秒脉冲校正一次。在相机控制器中采用 1M 时钟进行守时和校时。假设时钟的稳定度为 1×10^{-4}，那么在 500 ms 内任一行同步信号的上升沿时刻误差不会超过 $\Delta t_{\mathrm{xxd}}=500\ \mathrm{ms}\times1\times10^{-4}=50\ \mu\mathrm{s}$。

星下点工作模式下的最小行周期为 80 μs。可以看出，在这种模式下，系统的时间误差已经小于最小行周期，因此由其造成的地面定位误差小于地面像元分辨率，可忽略不计。

此时，相机控制器发出的行同步信号上升沿时刻，可由数传辅助数据中主控辅助数据以及行周期计算得出，计算方法如下：

假设相邻两包主控辅助数据第 n 包和第 $n+1$ 包主控辅助数据之间的行同步信号共有 $N=A_{n+1}-A_n$ 个。第 A_n 行后任一行同步信号的上升沿时刻 t_{xxd} 计算公式为

$$t_{\mathrm{xxd}}=B_{\mathrm{n}}+T*i(i=0,1,2\cdots N). \quad (10)$$

式(10)中参数含义如表 1 所示。

表 1 星下点模式行同步信号上升沿的时刻计算方法

Tab. 1 Calculation method for timing of line rising edge in normal mode

	第 n 包	第 $n+1$ 包
相机控制器发出的行同步信号的个数 A	A_n	A_{n+1}
秒脉冲上升沿到来后的第 1 个行同步信号上升沿的时刻 B	B_n	B_{n+1}
行周期	T	

3.2 侧摆成像模式下图像定位的实现方案

侧摆工作模式下各成像单元采用自己产生的内部行同步信号作为实际使用的行周期信号。内部行周期的产生受相机控制器发送的复位信号控制，因此复位时刻的行周期信号上升沿时刻是确定的，但各成像单元的行周期信号都是异步的，如图 4 所示。

因此，在侧摆工作模式下，根据开始摄像时刻

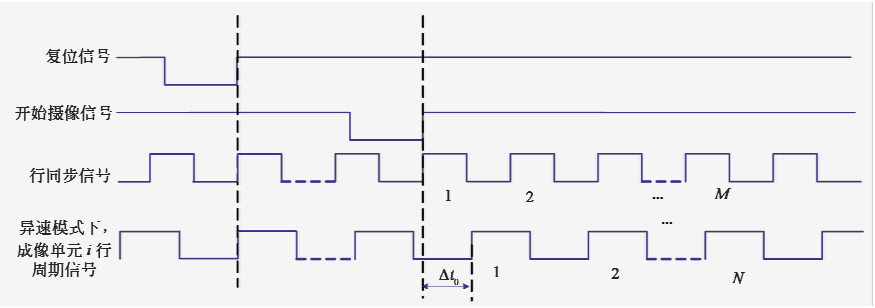


图 4 侧摆成像模式各片 CCD 行周期信号

Fig. 4 Line signal for every CCD in scolling mode

和数传接口中记录的实际执行周期值累加，计算可得每个行周期信号上升沿时刻。假设开始摄像时刻为 t_0，行周期为 T，则开始摄像后第 N 个行周期上升沿时刻 t 可以表示为：

$$t = t_0 + \Delta t_0 + (N-1) \times T. \qquad (11)$$

这种设计的缺点在于，由于只有复位时刻的行周期上升沿时刻是被卫星校正过；其余每个行周期信号上升沿时刻存在累积误差。假设时钟的稳定度为 1×10^{-4}，成像时间为 10 min，成像 10 min 后的时钟累积误差 Δt 为：

$$\Delta t = 10 \times 60\ \text{s} \times 10^{-4} = 60\ \text{ms}.$$

如果当前行周期为 80 μs，上述时钟累积误差会造成的地面误差 ΔL 为：

$$\Delta L = (\frac{\Delta t}{80}) \times GSD = 750GSD.$$

从上面的分析中可以看出，同速工作模式下，行周期信号上升沿时刻每 500 ms 被卫星校正一次，其所产生的误差在满足系统对 TDICCD 相机图像定位的要求。在侧摆工作模式下，采用这种方法计算行周期上升沿时刻，在成像时间较长时误差较大，已经不宜采用，应对其进行修改。因此下面重点讲述改进后的计算方法。

在侧摆工作模式时，成像单元 1～10 的行周期信号各不相同，为了建立他们之间的相互关系，成像单元 5 仍然采用相机控制器发出的行同步信号作为实际使用的行周期信号，因此它的行周期信号上升沿时刻也由相机控制器发出的行同步信号时刻决定。而其他成像单元通过 485 总线接收来自相机控制器的行周期参数并生产各自的行周期信号，同时，除成像单元 5 以外的其他成像单元（成像单元 1，2，3，4，6，7，8，9，10）仍然接收来自相机控制器发出的行同步信号。

成像单元对于第 1、2、3、4、6、7、8、9 和 10 通道，从开始摄像信号上升沿开始，对相机控制器发出的行同步信号和当前通道的行周期信号的行号分别进行计数。同时，每隔 16 行，利用计数器计数从 16 行循环中最后一行的行周期信号（假设其行号为第 $N=16n$ 行）上升沿，到在它之前与其紧相邻的第 1 个行同步信号（假设其行号为第 M 行）的上升沿的时间差 ΔT，将其称为相位差，如图 5 所示。这里的 $n=1,2,3,\cdots\cdots$

采用这种方法需要记录 3 种信息，行同步信号的行号 M，行周期信号的行号 N，以及行周期信号（假设其行号为第 N 行）上升沿到在它之前的第 1 个行同步信号的上升沿的时间差 ΔT。

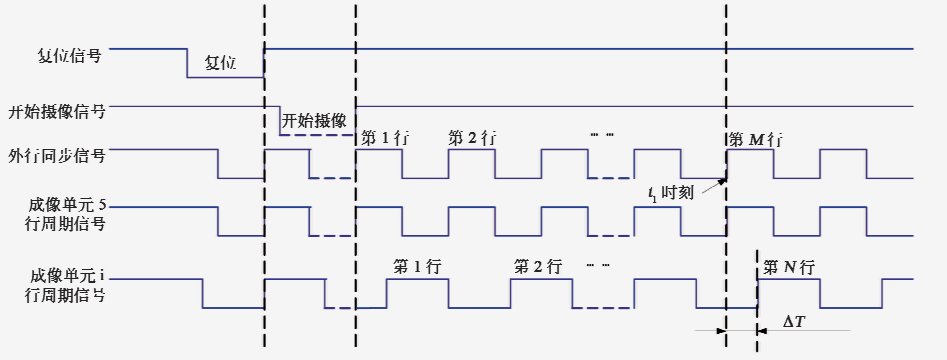


图 5　改进后成像单元行周期上升沿时刻产生方法

Fig. 5　Improved line rising edge timing generate method for imaging unit

在成像 FPGA 的程序中，每隔 16 行将 16 行循环中最后一行的行周期信号上升沿时刻添加到数传辅助数据包中，并且其更新速度与 485 总线上的行周期设置指令帧同步。由于行周期设置指令帧每 500 ms 由主控给成像单元更新一次，因此行周期信号上升沿时刻的更新速度也是 500 ms 一次。采用这种办法形成的新辅助数据包格式如所示。

从上面的设计说明中可以看出，每个 16 行循环中第 16 行的行周期信号上升沿时刻，可根据辅助数据计算得出；而其余 15 行的行周期信号上升沿时刻，则可根据第 16 行的行周期信号上升沿时刻和行周期计数进行推算获得。

对于该定位方法的计算，下面举例说明。首先做如下假设：

（a）开始摄像后，第 $N=16n$（$n=1,2,3,\cdots\cdots$）个行周期信号上升沿时刻为 t；

(b)开始摄像后,行周期信号的行号为 N,其周期为 T;

(c)开始摄像后,第 N 个行周期信号上升沿时刻所对应的由相机控制器发出的行同步信号的行号为 M,该行同步信号上升沿对应的时刻为 t_1;

(d)相机控制器发出的行同步信号上升沿与第 N 个行周期信号上升沿的间隔为 ΔT。

那么,开始摄像后第 N 个行周期信号上升沿时刻计算公式为:

$$t = t_1 + \Delta T. \tag{12}$$

开始摄像后第$(N - i)(i=1,2,3,\cdots,15)$个行周期信号上升沿时刻计算公式为:

$$t = t_1 + \Delta T - i \times T. \tag{13}$$

采用上述方案后,相机本体的行信号时间信息每间隔 500 ms 被相机控制器输入的行同步信号校正一次。因此,行信号时间信息误差取决于相机本体造成的时间误差和相机控制器造成的时间误差中的最大值。

$$\Delta t_1 = 500\ \text{ms 内 110M 时钟个数} \times (\text{时钟稳定度} \times \text{时钟周期}) =$$
$$500\ \text{ms} \times 10^{-3} \times 110 \times 10^6 \times 100 \times 10^{-6} \times 1/110 \times 10^6 = 50\ \mu\text{s}$$
$$\Delta t_2 = 500\ \text{ms 内 12 M 时钟个数} \times (\text{时钟稳定度} \times \text{时钟周期}) =$$
$$500\ \text{ms} \times 10^{-3} \times 12 \times 10^6 \times 100 \times 10^{-6} \times 1/12 \times 10^6 = 50\ \mu\text{s}$$

相机本体的时间误差由式计算为 50 μs,相机控制器造成的时间误差由式计算也为 50 μs。因此,在最小行周期 80 μs 下,一次成像 10 min 时间内造成的地面误差为

$$\Delta L = \Delta t / T \times GSD = 50/80 \times GSD = 0.625GSD$$

因此,采用改进的图像定位方法,在侧摆成像模式下,一次成像图像定位误差小于地面像元分辨率,满足系统对 TDICCD 相机的要求。

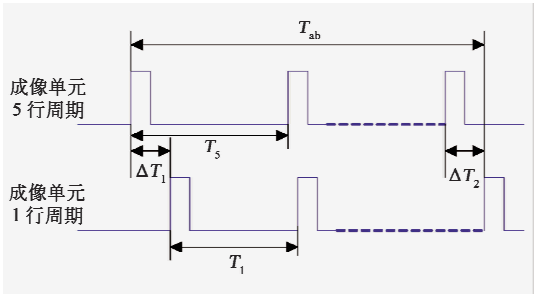


图 6 改进方案验证方法

Fig. 6 Validate method for the improved scheme

4 实验及结果

为了验证定位实现的正确性,在相机系统进行实验验证。验证方法如下(以成像单元 1 为例):记成像单元 1 的行周期值为 T_1,成像单元 5 的行周期值为 T_5,成像单元 5 的行周期也就是成像单元 1 接收的外行同步信号。如图 6 所示,成像单元 1 连续两次输出的定位辅助数据中外行同步计数,行周期计数,时间差分别是 N_{51}、N_{11}、ΔT_1 和 N_{52}、N_{12}、ΔT_2,连续两次输出定位辅助数据的间隔为 T_{ab},那么式成立。

$$T_{ab} = (N_{52} - N_{51}) \times T_5 + \Delta T_2 = (N_{12} - N_{11}) \times T_1 + \Delta T_1. \tag{14}$$

实验结果如表 2 所示,其中外行周期表示相机控制器发送的外行同步信号一个周期内 110M

表 2 侧摆成像图像定位精度结果

Tab. 2 Result of image location accuracy in scolling imaging mode

外行周期	内行周期	外行号	内行号	差	外行时间/s	内行时间/s	差值时间/μs
1b12	4 000	4d7	2e0	2f2	0.524 356 5	0.524 356 5	0
1b12	4 000	817	440	872	0.212 117	0.212 117	0
1b12	4 000	153d	09d0	19c6	0.162 113	0.162 113	0
1b12	4 000	1f4a	E10	05dc	0.579 114	0.579 114	0
1b12	4 000	4332	1d40	078c	0.788 833	0.788 833	——

时钟个数，内行周期表示异速成像时相机本体实际执行的行周期一个周期内 110M 时钟的个数，外行号和内行号分别为开始摄像后外行周期的个数和内行周期的个数，差代表成像单元实际执行行周期和该行周期前最近的外行同步信号之间的时间，用 110M 时钟个数表示。由实验结果可以看出，计算的差值时间为 0，可以验证采用的方案是正确的，即提出的改进方案在一次成像时间内定位误差不超过地面像元分辨率，满足系统对相机定位的要求。此外，这种方案与侧摆角度无关，同时也适用于星下点成像模式。

5　结　　论

针对空间遥感 TDICCD 相机在侧摆成像模式下工作一段时间后累积定位误差大的问题，提出了一种通过记录 3 种信息：行周期信号上升沿时刻、行同步信号上升沿时刻和二者之间时间差来对图像进行定位的方法。采用该方法后，在一次成像过程中，图像定位误差小于地面像元分辨率，满足系统对 TDICCD 相机定位精度的要求。

参　考　文　献：

[1] 史磊，金光，安源，等. 一种遥感相机的 CCD 交错拼接方法研究[J]. 红外，2009，30(1)：12-15.
Shi L，Jin G，An Y，*et al*. Research on a mechanical interleaving stitching method of CCDs for remote sensing camera [J]. *Infrared*，2009，30(1)：12-15. (in Chinese)

[2] 岳俊华，李岩，武学颖，等. 多 TDI-CCD 拼接相机成像非均匀性的校正[J]. 光学精密工程，2009，17(12)：3084-3088.
Yue J H，Li Y，Wu X Y，*et al*. Correctio of imaging no-uniformity for multi-TDICCD mosaic camera [J]. *Opt. Precision Eng.*，2009，8(3)：3084-3088. (in Chinese)

[3] 李朝辉，王肇勋，武克用. 空间相机 CCD 焦平面的光学拼接[J]. 光学精密工程，2000，8(3)：213-216.
Li Z，Wang Z Y，Wu K Y. Optical assembly of CCD focal plane for space camera [J]. *Opt. Precision Eng.*，2000，8(3)：213-216. (in Chinese)

[4] 李云飞，赵运隆. TDICCD 相机成像系统地面检测设备设计[J]. 液晶与显示，2012，27(6)：842-846.
Li Y F，Zhao Y L. Design of ground test equipment for TDICCD camera imaging system [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*，2012，27(6)：842-846. (in Chinese)

[5] 曲洪丰，王晓东，徐抒岩，等. 多 TDICCD 拼接遥感相机异速成像抗干扰设计[J]. 红外与激光工程，2013，42(4)：1026-1032.
Qu H F，Wang X D，Xu S Y，*et al*. Anti-jamming design for multi-velocity imaging mode of multiple TDI CCDs mosaic remote camera [J]. *Infrared and Laser Engineering*，2013，42(4)：1026-1032. (in Chinese)

[6] 马天波，郭永飞，李云飞. 科学级 TDICCCD 的行频精度[J]. 光学精密工程，2010，18(9)：2028-2035.
Ma T B，Guo Y F，Li Y F. Precion of row frequency of scientific grade TDICCD camera [J]. *Opt. Precision Eng.*，2010，18(9)：2028-2035. (in Chinese)

[7] 薛旭成，石俊霞，吕恒毅，等. 空间遥感相机 TDICCD 积分级数与增益的优化设置[J]. 光学精密工程，2011，19(4)：855-861.
Xue X C，Shi J X，Lv H Y，*et al*. Optimal set of TDICCD integration stages and gains of space remote sensing camerars [J]. *Opt. Precision Eng.*，2011，19(4)：855-861. (in Chinese)

[8] 郭永飞. 侧摆成像下多片 TDICCD 拼接相机分段侧摆研究[J]. 光机电信息，2010，27(10)：32-38.
Guo Y F. Research on subsection image motion mismatching for multi-TDICCD mosaic camera of scroll imaging [J]. *OME Information*，2010，27(10)：32-38.

[9] 张伍，陆春玲. 推扫成像遥感卫星图像定位精度分析与设计[J]. 航天器工程，2007，16(2)：6-11.
Zhang W，Lu C L. Design and analysis of determining the image position error of push-broom remote sensing satellite [J]. *Spacecraft Engineering*，2007，16(2)：6-11. (in Chinese)

[10] 郭晓敏，张洪群，韩家玮，等. 侧摆条件下卫星观察区域计算研究[J]. 微计算机信息，2011，27(11)：71-73.
Guo X M，Zhang H Q，Han J W，*et al*. The research on computing the satellite observation area on swinging mode

[J]. *Microcomputer Information*, 2011, 27(11): 71-73. (in Chinese)

[11] 明洋, 陈楚江, 余绍淮, 等. 多条带 WorldView 卫星图像几何定位精度分析[J]. 测绘科学, 2013, 38(1): 160-162.
Ming Y, Chen C J, Yu S H, *et al*. Geolocation accuracy analysis of multi-strip WorldView satellite imagery [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2013, 38(1): 160-162. (in Chinese)

[12] 李立钢, 吴一戎, 刘波, 等. 基于卫星参数预测的星载 SAR 图像定位方法研究[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(7): 1691-1694.
Li L G, Wu Y R, Liu B, *et al*. The study of satellite sar imagery eo-referencing based on satellite parameters prediction [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2007, 29(7): 1691-1694. (in Chinese)

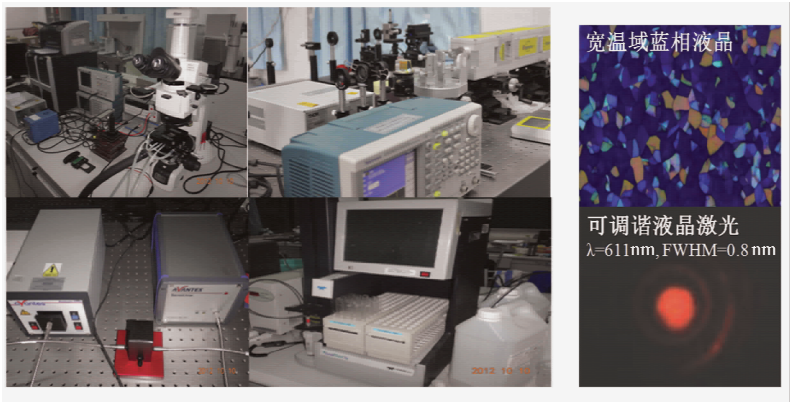
作者简介: 石俊霞(1984—), 女, 内蒙古乌兰察布人, 博士, 助理研究员, 主要从事光电成像及图像处理方面的研究。
E-mail: 19031121@163.com

华东理工大学液晶光子学材料研究小组

华东理工大学具有四十余年液晶材料研究的历史, 是国内较早开展液晶材料研究的单位之一。液晶光子学材料研究组继承了几十年的研究基础, 由沈冬教授于 2008 年建立, 综合考虑研究组的知识结构、背景, 结合长远发展的需要, 经过几年的努力逐步形成了从材料分子设计材料合成、混配、功能化材料性质测试、分析与性能优化简单元器件制备的集材料制备、表征、器件化于一体, 具有鲜明特色的研究小组。该课题组目前有教授 1 人, 副教授(特别研究员)1 人, 在读研究生 9 人。以蓝相液晶材料的合成与性能、结构可控功能材料的合成与性能、可调控液晶微结构材料、液晶光激射材料和有机发光材料的合成为研究重点。

近五年来在国家自然科学基金委、教育部、上海市、华东理工大学以及各企业单位的共同资助下, 研究工作稳步推进, 取得了一系列成果。利用弯曲形分子诱导获得了稳定的蓝相液晶, 提出了获得稳定蓝相液晶的新思想和新方法; 开发了在极端低温条件下稳定工作的聚合物稳定蓝相液晶; 发现了存在于聚合物稳定蓝相体系内的双稳态现象; 实现了液晶自组装体系的微结构多外场调控; 制备了不同类型的高性能可调谐液晶激光材料; 合成了具备高量子效率的有机发光染料; 并且依托"结构可控先进功能材料教育部重点实验室"和"超细材料制备与应用教育部重点实验室"正在进行可控液晶微结构与纳米/液晶复合材料的光学新应用研究。

研究组在过去五年内发表期刊论文 18 篇, 其中 SCI 一区、二区 9 篇; 受邀进行综述性论文撰稿或评论 2 次; 在蓝相液晶方面获美国发明专利和中国发明专利授权各一项, 美国发明专利公开 4 项, 台湾专利公开 2 项; 此外, 与国际、国内液晶学术团体保持紧密的联系与合作, 受邀做大会邀请报告 4 次, 获得来自各学术团体奖项 5 次。



地址: 上海市徐汇区梅陇路 130 号 邮编: 200237
电话: 021-64253514(沈冬) 邮箱: shen@ecust.edu.cn