

紫外临边成像光谱仪时间同步系统的优化

代霜,王槐,于涛,宋克非

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033)

摘要: 为了提高紫外临边成像光谱仪的系统在轨时间同步精度,提出了采用参考时钟源计算时钟漂移率的方法。对光谱仪的时间系统工作原理进行了分析,利用光谱仪系统中的 1553 B 接口芯片的时标单元作为参考时钟源,获得连续的样本数据,确定了线性拟合计算时钟漂移率,实现对时钟漂移进行动态补偿和光谱仪时间系统优化。给出了基于 GPS 时钟源的实时检测方法,采用高速 FPGA 芯片设计了时间同步系统;应用仿真测试设备,记录光谱仪时间同步误差的动态变化,实现了动态测量优化后的光谱仪时间同步误差的目的。实验结果表明:优化后的系统实际测量开始时间误差 <13 ms,不同测量持续时间下的测量结束误差 <466.8 ms,不同积分时间下的测量结束误差 <362.5 ms,满足光谱仪数据反演精度时间系统误差 <512 ms 的要求。

关键词: 紫外临边成像光谱仪; 时间系统; 时间同步精度; 数据反演

中图分类号: V447.3 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2014)07-2270-07

Optimization design of time synchronization system in ultraviolet limb imaging spectrometer

Dai Shuang, Wang Huai, Yu Tao, Song Kefei

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun 130033, China)

Abstract: To improve the time synchronization precision of ultraviolet limb imaging spectrometer, the algorithm of clock drift rate calculation which was based on reference clock source was put forward. Firstly, the principle of limb time system was analyzed, then by using time tag unit of 1553B interface chip as clock reference source, the continual sample data was obtained and clock drift rate based on linear fit was calculated. Lastly, dynamic compensation of clock drift rate and optimization of limb system were realized. With using GPS time synchronization system, time synchronization system of high speed FPGA chip was designed, therefore dynamic changes of limb time synchronization errors were recorded by simulation and test equipment, furthermore limb time synchronization errors were measured dynamically. Time synchronization precision was measured. Experimental results indicate that time synchronization errors are no more than 13 ms for imaging beginning time error, the imaging finish time errors no more than 466.8 ms in different imaging time and no more than 362.5 ms in different integration time, which meets the demand of no more than 512 ms of qualification.

Key words: ultraviolet limb imaging spectrometer; time system; time synchronization precision; data retrieval

收稿日期: 2013-11-08; 修订日期: 2013-12-03

基金项目: 国家自然科学基金(41105014)

作者简介: 代霜(1982-),女,助理研究员,硕士,主要从事空间光学遥感器的通讯及控制方面的研究。Email:dai-dai123@163.com

0 引言

紫外临边成像光谱仪(以下简称光谱仪)对沿地球某高度切线方向上的大气进行测量,通过上下改变仪器的视轴高度,可获得整层大气的垂直结构。由于其具有高垂直分辨率的特点,是目前国际上研究的热点^[1]。

光谱仪工作时将探测得到的临边光谱数据与包含当前测量时间等参数的图像辅助数据一起下行,临边光谱数据结合切高定位、气溶胶、地表反射率和云等因素进行数据反演获取大气层臭氧、二氧化氮等气体的含量,同时获得紫外背景辐射场,为目标识别与跟踪定位等应用提供基础。

地面数据反演系统通过对下行的图像辅助数据中的当前测量时间和平台参数中表明轨道位置的时间,可以计算出临边探测时的精确位置,进而得出探测时的地表反射率。而研究表明,不准确的地表反射率引起的反演误差最大可达 2%^[2-3]。因此测量时间误差和表明轨道位置的时间误差影响了反演误差,由于表明轨道位置的时间误差与整个飞行器系统有关,此文暂不考虑。针对数据反演的精度要求,提出了光谱仪的测量开始时间误差和测量结束时间误差均不超过 512 ms 的指标要求。

传统的时钟同步算法以时钟偏移补偿为主,如应用于无线传感器网络(WSN)中的 RBS,DMST,FTSP 和 AD 算法等,优点是同步周期短的情况下能获得高精度,但同步精度依赖于本地时钟,同步时间间隔越大,同步误差也越大^[4-5]。也有人提出利用参考时钟计算本地时钟的相对时钟漂移量,然后通过一定算法估计出漂移补偿量,优点是同步误差不在与同步周期紧密相连,如 Mini-Sync,但参考时钟源会增添硬件且算法复杂度较大^[6-7]。

文中提出适用于光谱仪的时钟漂移补偿算法,利用光谱仪系统的 1553B 接口芯片的时标单元作为参考时钟源,得出连续的样本数据,通过线性拟合计算时钟漂移率,然后对时钟漂移进行动态补偿,此算法没有增加额外的复杂电路,复杂度较小,系统实现时只增加了用于存储参考时钟的少许存储单元,具有不与同步周期紧密相关的优点,在同步周期大的情况下能够满足指标要求。

光谱仪时间同步误差会随着探测过程中光谱仪的时序变化而变化,示波器等常规仪器无法长期检测。如何实时检测光谱仪的时间同步精度,真实反映光谱仪的时间同步误差是判断光谱仪时间同步精度是否满足要求的前提和依据。

采用精确时钟源作为统一时间参考,实现时间同步检测是星上有效载荷普遍采用的检测方法。当前,国内外精确时钟源主要有美国全球定位系统 GPS 卫星时钟、欧空局的 GALILLE 卫星时钟以及我国自主研发的北斗系统卫星时钟,其中 GPS 由于精度高、覆盖范围广被广泛应用^[8-9]。

文中采用一种基于 GPS 卫星时钟的实时检测策略,其中使用 FPGA 实现时间同步,采用此方法,地面测试设备能够记录光谱仪时间同步误差的动态变化,实现了对优化后的光谱仪时间系统的时间同步精度进行检测。

1 光谱仪及时间系统工作原理

光谱仪主要由 CCD 探测器、定标轮组件、定标灯、DSP 控制单元等组成,具体如图 1 所示。其中大气散射或太阳辐射通过光学狭缝进入光学系统,控制器通过 1553B 总线接收到地面注入的带时间码的测量指令后,在测量开始时间到时,通过 RS-422 总线发送测量命令,控制 CCD 探测器进行光电信号的转换并输出数字图像信号。定标灯用于光谱仪的自检,光谱仪的不同工作模式对应定标轮的不同位置。

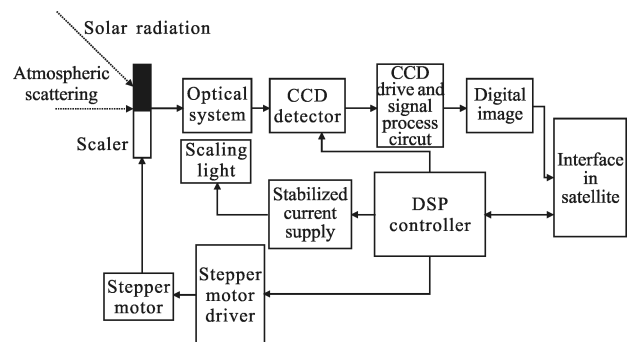


图 1 系统功能图

Fig.1 Figure of system function

光谱仪的时间系统工作原理如图 2 所示。星上数管系统通过 1553B 总线广播时间码给光谱仪控制器,广播时间码由数管计算机基于内部时钟产生。光谱仪 DSP 主控单元外接高稳定度晶振为工作时钟,

并为内部定时器提供时钟源。

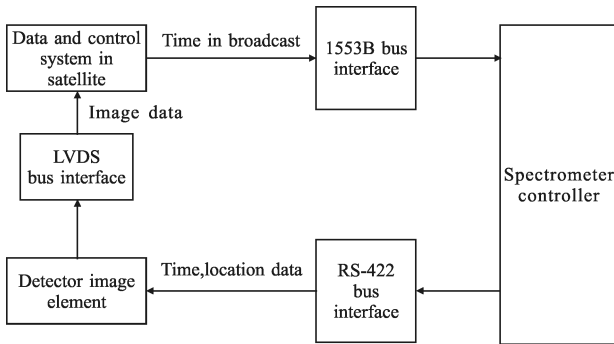


图 2 光谱仪的时间系统的工作原理

Fig.2 Work principle of time synchronization system of spectrometer

光谱仪时间系统分为守时和校时两部分。校时过程为接收到系统广播的时间码后产生中断,光谱仪主控系统在中断过程中将系统当前时间重置为接收到的广播时间码。校时后进行指令处理,对地面注入的数据是否注入进行判断,如果时间到,进行系统自守时,通过 RS-422 总线接口发送测量命令及时间、平台参数等参数给探测器单元,探测器接收到测量命令后复位 CCD 进行成像曝光并输出图像及辅助数据,最终,把图像及辅助数据包通过 LVDS 总线下行给数管系统。为避免接收到的广播时间码有错误跳变而导致测量时间错误的情况发生,光谱仪在探测期间均为自守时。

2 系统时间误差分析及优化

光谱仪主要通过校时、守时实现与星上的系统时间同步并控制测量过程。校时为星上系统的定期校时,假定系统通过校时获得的时间为 $\{J1_T, J2_T, \dots, Ji_T\}$ (i 为第 i 个校时中断) Ji_T 为第 i 个校时的实际时间,则第 i 个校时的误差可以表示为:

$$\sigma_{i,T} = Ji_T - J_i T \quad (1)$$

在探测期间通过守时获取的时间计数器值为 $\{S_1, S_2, \dots, S_i\}$ (i 为第 i 个系统定时中断), ΔS_i 为通过守时取得的系统时间计数器值之差:

$$\Delta S_i = S_i - S_1 \quad (2)$$

设守时获取的时钟频率为 λ ,则通过守时获取的后续时间 T_i 与初始时间 T 的关系为:

$$T_i = T + \Delta S_i * \lambda \quad (3)$$

为了表示守时误差,使用参考时钟构造软件时钟如下:

$$c(t) = c(t_0) + a\{h(t) - h(t_0)\} \quad (4)$$

式中: $h(t)$ 为参考时钟;函数 $a(\cdot)$ 用来将计数器读数的差值转化为时间间隔,构造时钟 $c(t)$ 。则守时误差可以表示为:

$$\sigma_n = c(t_i) - T_i \quad (5)$$

经分析,校时误差主要由星上通讯时间延迟误差和中断处理时间误差组成。守时误差是由中断处理误差和 DSP 晶振误差引起的。

而光谱仪时间同步精度还与指令处理误差、内部通讯延迟误差、图像输出延迟误差等有关。下面将各误差产生的机理及特点进行分析。

2.1 星上通讯时间延迟误差

光谱仪与星上数管系统通过 1553B 总线进行通讯,根据总线通讯速率可以得出,时间码的传输时延 t_c 最大为 1.56 ms。

2.2 DSP 晶振引入误差

如系统采用晶振为 λ_0 ,设其输出的实际频率为 W_1 ,两者关系可由公式(6)表示:

$$(W_1 \pm \lambda_0) / \lambda_0 \times 1 = u_1 \quad (6)$$

式中: u_1 为选用的晶振精度。

当选用精度为 $\pm 1 \times 10^{-5}$ 的 48 MHz 晶振时,1 s 内晶振的最大误差 t_j 为 10 μ s。

2.3 中断处理时间误差

中断处理时间包括中断响应时间和中断处理时间,其中中断响应由硬件实现,误差与具体 DSP 型号的机器周期有关,以 DSPTMS320VC5416 为例,硬件中断响应最大时间延迟为 12 个机器周期,如采用 48 MHz 晶振,则约为 0.5 μ s。而中断处理时间与中断处理函数有关。

2.4 指令处理误差

指令处理对地面注入的测量开始时间和结束时间进行判断,因此指令处理误差包括指令开始时间误差和指令结束时间误差。由于指令开始时间仅通过接收到的校时时间码来进行判断,与中断处理时间相关,而测量开始后光谱仪采用内部定时器作为时钟源进行自守时,因守及时及系统本身处理带来的时间误差会影响指令结束时间。

考虑软件延时造成的误差影响。指令处理误差 t_x 如下式所示:

$$t_x = t_b + t_p \quad (7)$$

式中: t_p 为指令结束误差; t_b 为指令开始误差; t_p =测量

持续时间/ $\Delta t \times t_s$, t_s 为软件处理延迟, Δt 为定时周期。

2.5 内部通讯延迟误差

光谱仪的主控制器通过内部 RS-422 总线控制光谱仪进行测量, RS-422 总线通讯速率为 62.5 kbps, 则由传输带来的时间延迟为固定误差。

当设定发送的字节数为 8 字节, 返回字节数为 12 字节时, 系统最大响应时间为 5.2 ms, 最小响应时间为 1 ms, 则传输延迟时间范围为 4.2~8.4 ms。

2.6 图像输出延迟

光谱仪的图像输出过程为 CCD 模块首先对 CCD 进行复位操作, 然后曝光拍摄图像, 曝光结束后读出图像(每读出一行后即刻打包发送), 具体如图 3 所示, 最后打包发送图像辅助数据。

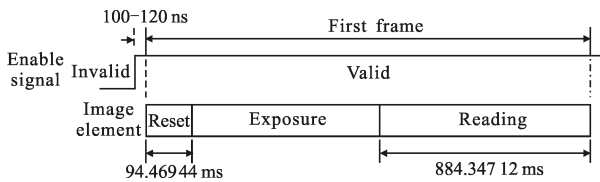


图 3 光谱仪成像过程图

Fig.3 Procedure of imaging spectrometer

光谱仪成像通过一定的曝光时间进行图像输出, 帧周期 T 与曝光时间 T_{Exp} 的关系, 如公式(8)所示。

$$T = \begin{cases} T_{Exp} + 978.81656, & T_{Exp} \leq 873 \text{ ms} \\ T_{Exp} + 011.30688, & T_{Exp} \geq 874 \text{ ms} \end{cases} \quad (8)$$

当光谱仪的曝光时间范围为 (80~2 000 ms) 时, 帧周期范围为 (885,306 88~2 011.306 88 ms)。

经过上述分析, 各误差来源见表 1。

表 1 时间同步误差值表

Tab.1 Error value of time synchronization

Error source	Result	Error source	Result
t_c	$\leq 1.56 \text{ ms}$	t_i	$\geq 0.5 \mu\text{s}$
t_j	$\leq 1 \mu\text{s}$	t_p	$\leq 1 \text{ s}$
t_n	4.2~8.4 ms	t_b	$\leq 512 \text{ ms}$
t_t	885.3~2 011.3 ms		

校时、守时误差见公式(9)和公式(10):

$$t_u = t_c + t_i \quad (9)$$

$$t_s = t_i + t_j \quad (10)$$

考虑指令处理及图像输出延迟等因素, 得出系

统时间误差为:

$$T = t_c + t_i + t_j + t_p + t_n + t_t \quad (11)$$

式中: t_u 为校时误差; t_s 为守时误差; t_c 为星上通讯时间延迟误差; t_i 为中断处理误差; t_j 为 DSP 晶振引入的误差; t_x 为指令处理误差; t_n 为内部通讯延迟误差; t_t 为图像输出延迟误差。

根据误差公式(11)可知, 测量开始和结束时间误差见公式(12)和(13)。

测量开始时间误差为:

$$T_1 = t_c + t_j + t_n + t_b \quad (12)$$

测量结束时间误差为

$$T_2 = t_c + t_j + t_n + t_p + t_t \quad (13)$$

其中星上通讯时间延迟误差 t_c 为外部误差因素, 内部通讯延迟误差 t_n 和传输的字节数有关, 相应的通讯协议确定后, 其误差即为固定时延, 且综合看来, 两者误差综合最大值为 9.66 ms, 远远小于指标要求, DSP 晶振引入误差 t_j 为随机误差, 由此可以带来时钟漂移, 将同下文守时中断延迟带来的时钟漂移一同解决, 暂不论述。而图像输出延迟 t_t 主要受曝光时间影响, 范围在 885,30 688~2 011.306 88 ms, 由于光谱仪系统接收到指令结束时, 需将最后一帧图像输出, 影响测量结束误差, 在实际计算测量结束误差时需考虑最后一帧图像的影响。中断处理误差包括中断响应时间和中断函数处理时间, 其中中断响应时间与 CPU 器件类型有关, 为确定数值 $0.5 \mu\text{s}$, 而中断响应误差 t_i 与中断函数长度有关, 可以减少中断中的处理来进行进一步优化, 优化后的中断处理时间在 2 ms 以内。指令开始时间误差主要由校时引起的, 最大为校时周期 512 ms。要减少这部分的误差, 系统需要进行精确定时, 通过分析采用 DSP 内部定时器复用的方式, 指令开始时间误差仅为中断处理时间误差。指令结束误差是由于守时误差及软件处理延迟随着时间的累积成线性增加造成的, 当长时间测量时, 最多可造成秒级的误差, 严重影响了系统时间精度, 会导致测量结束时间误差不满足 512 ms 的指标要求。

由于指令结束误差主要由守时及软件处理延迟、定时器的时钟漂移等因素引起。参考文献[10-11]指出, 可以采用短期稳定度好、老化率低的时钟振荡器如恒温晶振, 实现参考时钟源进行时钟动态补偿, 因此参考时钟源的选用至关重要。由公式(2)可以构

造时钟 $c(t)$ 。以光谱仪系统外部通讯 1553B 接口芯片 BU65170 的时标定时为例,晶振频率为 16 MHz,如果设定 $a(\cdot)$ 的最小值为 $2\ \mu\text{s}$,这意味着该时钟频率为 500 kHz,其最高精度为 $2\ \mu\text{s}$,其作为参考时钟能够满足光谱仪探测期间的时间精度指标要求。文中在不增加外部苛刻时钟源的前提下,采用光谱仪系统通讯总线 1553B 接口芯片 BU65170 作为参考时钟源。

考虑到长时间测量的问题,不适合采用以偏移补偿为主的算法,考虑使用时钟漂移补偿。为了获取时钟漂移率,从而估计出时钟频率偏差,采用在一定时间内获得连续时间数据来进行线性拟合,其算法描述如下。

设 n 组偏差样本值为 $(t_1, \theta_1), (t_2, \theta_2), \dots, (t_n, \theta_n)$, 其中 t_i 代表守时得到的第 i 个系统当前时刻, θ_i 代表即时偏差值,根据这组值列出线性趋势方程:

$$Y=c_0+c_1 \times X \quad (14)$$

式中: c_0 为截距; c_1 为漂移率,采用最小二乘法可求的 c_0, c_1

$$c_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (t_i - X)(\theta_i - Y)}{\sum_{i=1}^n (t_i - X)^2}$$

$$c_0 = Y - c_1 \times X \quad (15)$$

其中, $X = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i$, $Y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \theta_i$ 。

在得到时钟漂移率的基础上,设定门限值,当时间漂移率大于门限值时,重新调整时钟频率,然后重新获取时钟漂移率,重复计算调整,直到时钟漂移率满足门限值要求。

下面介绍光谱仪动态调整系统时钟频率的具体方法和步骤:

(1) 设时钟频率为 $Z_0 = \frac{1}{M}$;

(2) 利用光谱仪连续的自守时时刻和参考时钟源的时标数据,根据公式(13)计算 X, Y ;

(3) 根据公式(13)计算时钟漂移率 β_0 ;

(4) 如果时钟漂移率小于门限值则不调整,否则得出新的时钟频率 $Z_1 = Z_0 - \beta_0$;

(5) 根据得到的时钟频率 Z_1 调整本地时钟定时;

(6) 重复(2)~(5)直到时钟漂移率满足门限值要求。

采用此算法,光谱仪设定定时周期为 64 ms,下行周期为 512 ms 的时间数据,采集 30 s 作为样本数据,则漂移率门限值为 4.3%,且最多经过两次调整

即能保证最长工作时间为 90 min 时,指令结束误差在一个自守时周期(64 ms)内,调整前后误差对比如图 4 所示。从图 4 可以看出,如果系统测量在 5 min 内,则无须使用该算法进行调整,即能满足系统指标要求;而长时间测量时,通过此算法,大大降低了指令结束时间误差的增长速率,保证了系统的时间精度要求。由于此算法中的漂移量估计需要一定的观测数据,在光谱仪探测器单元测量过程中,主控单元同时完成漂移补偿算法是一种既节省开销又能提高同步精度的策略。

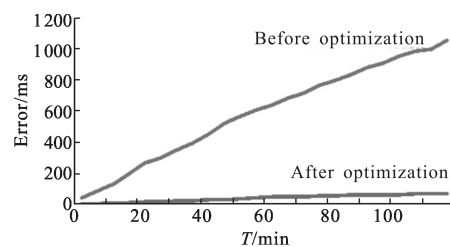


图 4 指令结束时间误差优化前后对比图

Fig.4 Optimization results of command finish error

光谱仪时间系统优化后的误差值见表 2。

表 2 优化后误差表

Tab.2 Error after optimization

Error source	After optimization result	Error source	After optimization result
t_c	$\leq 1.56\ \text{ms}$	t_i	$0.5\ \mu\text{s} - 2\ \text{ms}$
t_j	$\leq 1\ \mu\text{s}$	t_p	$\leq 64\ \text{ms}$
t_n	$4.2 - 8.4\ \text{ms}$	t_b	$0.5\ \mu\text{s} - 2\ \text{ms}$
t_i	$885.3 - 2\ 011.3\ \text{ms}$		

根据误差模型公式(10)和(11)可知,测量开始时间误差为 5.76~13.96 ms,测量结束时间误差,不考虑图像输出延迟引起的最后一帧图像误差,经过计算为 5.76~75.96 ms,而实际的测量结束时间误差会受图像曝光时间的影响而有所增加。

3 实验分析

3.1 实验原理

由于光谱仪时间同步误差会随着探测过程中光谱仪的时序变化而变化,示波器等常规仪器由于存储深度不足而无法长期检测,光谱仪使用时钟同步

系统(GPS 卫星同步时钟、时统卡)、1553B 地面仿真测试系统、图像快视设备等组成了地面仿真测试系统进行实时检测。设备实物连接图如图 5 所示。其中上列为光谱仪系统,下列为地面测试系统。

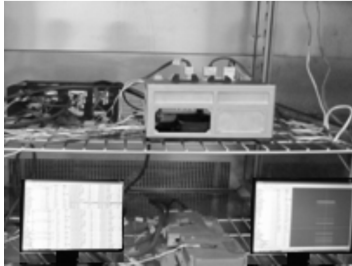


图 5 地面测试设备连接图

Fig.5 Connection graph of background test device

时钟同步系统选用的卫星同步时钟以美国全球定位系统(GPS)为时间基准,定时精度达微秒级。安装在各地面测试设备上的时统卡以现场可编程门阵列(FPGA)为核心元件,选用的 FPGA 芯片是 Xilinx 公司的 XQ2V3000。

时钟同步系统的工作过程为:首先由时统卡上的 FPGA 接收卫星同步时钟输出的串行时间报文(年月日时分秒),将此数据赋给年月日时分秒计数器作初始值,并以秒脉冲信号为基准校准秒及以上的计数器,同时由时统卡上的晶体振荡器分频得到 0.1 ms 计数脉冲;然后将所有的时间信息存储到 FPGA 片内 RAM 中,0.1 ms 更新一次,最后,1553B 地面仿真测试设备和图像快视设备通 PCI 总线将 RAM 中的时间信息读出。

1553B 地面仿真测试设备从 RAM 中读出时间同步系统时间,按照 512 ms 的周期广播给光谱仪,需要测量时,1553B 地面仿真测试设备发送数据注入指令给光谱仪控制器,光谱仪控制器控制测量过程,测量器成像单元通过 LVDS 总线,将图像数据及图像辅助数据发送给图像快视设备。图像快视设备将收到的每帧图像前加入收到的时间同步系统的时间戳,通过对比地面注入的测量时间,可以计算出测量开始时间误差,而测量持续时间的误差可以通过图像理论数据量与实际数据量的差值计算出。

3.2 数据分析

实验一:通过地检 1553B 设备发送数据注入,对测量开始时间的误差进行测试,通过与地面时间同步系统的时间标记比对得出的测量结果如图 6 所

示,测量开始时间误差最大值为 13 ms;

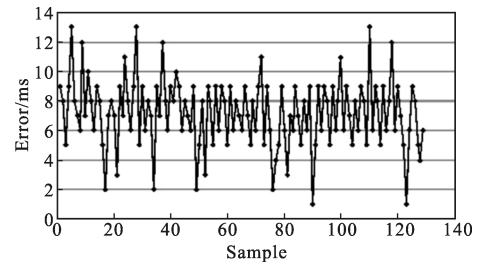


图 6 测量开始时间误差

Fig.6 Imaging beginning time error

实验二:通过地检 1553 B 设备发送数据注入,注入同一积分时间的情况下,取不同测量持续时间下的测量结束时间误差如图 7 所示。不同测量持续时间下的测量结束误差最大值为 466.8 ms;

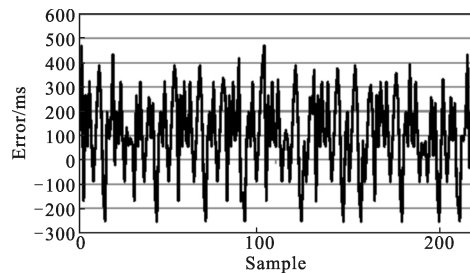


图 7 不同测量持续时间下的测量结束误差

Fig.7 Imaging finish time error in different imaging time

实验三:测试由于不同积分时间的图像输出时间不同,而引起测量结束时间误差。通过地检1553B 设备发送数据注入,多次测量时取实测图像数据总量取平均值与理论数据总量进行比对,根据数据总量的差值与时间的关系计算出测量结束误差。当一帧数据为 1 847 436 字节时,积分时间范围为 80~2 000 ms 时根据公式(6),得出对应数据率范围为 7.348 2~16.694 2 Mbps。由于图像输出的固定时延的影响,因此不计算最后一帧图像数据,如图 8 所示,不同积分时间下的测量结束误差最大值为 362.5 ms。

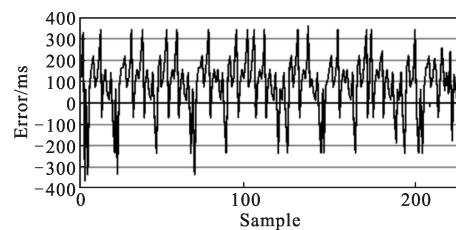


图 8 不同积分时间下的测量结束误差

Fig.8 Imaging finish time error in different integration time

4 结 论

保证紫外临边成像光谱仪的时间同步精度是保证光谱数据反演精度的基础,文中通过对光谱仪时间系统的分析,得出了影响光谱仪时间系统的主要误差,采用参考时钟源来计算时间漂移率的方法,进行了时间精度优化方案的设计,对优化后的系统时间采用基于 GPS 时钟源的时间同步系统进行了实时检测。经测试,优化后的系统实际测量开始误差小于 13 ms,不同测量持续时间下的测量结束误差 < 466.8 ms,不同积分时间下的测量结束误差 < 362.5 ms,满足测量开始时间误差和测量结束误差均不大于 512 ms 的指标要求。采用参考时钟源,通过线性拟合计算时间漂移率的方法在时间同步周期长的情况下能够保证高精度,且算法实现占用空间小,此方法可以应用于其他对时间敏感的空间有效载荷中,具有普遍意义。

参考文献:

- [1] Xue Qingsheng. The study on limb imaging spectrometer for space-based atmospheric remote sensing [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, 2010: 9-10. (in Chinese)
薛庆生. 用于空间大气遥感的临边成像光谱仪研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2010: 9-10.
- [2] Wang Zijun. Study on retrieval of atmospheric trace gas concentrations from satellite based limb radiance [D]. Changchun: Jilin University, 2011: 132-133. (in Chinese)
汪自军. 基于卫星临边辐射的大气痕量气体含量反演研究[D]. 长春: 吉林大学, 2011: 132-133.
- [3] Chen Shengbo. A new technique for atmospheric chemistry observation[C]//SPIE, 2006, 6031: 6031OR.
- [4] Sundararaman B, Buy U, Kshemkalyani A D. Clock synchronization for wireless sensor networks: A survey [J]. *Elsevier Ad Hoc Network*, 2005, 3(3): 281-323.
- [5] Xue Qingsheng. Design of wild field of view off-axis three mirror system for hyperspectral imager[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(4): 942-946. (in Chinese)
薛庆生. 用于高光谱成像仪的大视场离轴三反系统设计[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(4): 942-946.
- [6] Mao Yingtai. The Theory of Error and Analysis of Accuracy [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1982: 27-28. (in Chinese)
毛英泰. 误差理论与精度分析 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1982: 27-28.
- [7] Wu Xingxing, Liu Jinguo. Optimization and real-time measurement of time system in three-line stereo mapping camera [J]. *Opt Precision Eng*, 2012, 20(5): 1022-1028. (in Chinese)
武星星, 刘金国. 三线阵立体测绘相机时间系统优化与实时检测[J]. 光学精密工程, 2012, 20(5): 1022-1028.
- [8] Mu Xing, Hu Jun, Song Qichang, et al. Time synchronization of integrated testing system of space camera [J]. *Opt Precision Eng*, 2010, 18(6): 1436-1443. (in Chinese)
穆欣, 胡君, 宋启昌, 等. 空间相机集成测试系统的时钟同步[J]. 光学精密工程, 2010, 18(6): 1436-1443.
- [9] Thomas S Z, Charbiwala J, Friedman Y H, et al. Exploiting manufacturing variations for compensating environment-induced clock drift in time synchronization [J]. *Performance Evaluation Review*, 2008, 36(1): 428-431.
- [10] Wang Gang, Huang Fei, Qiao Chunjie, et al. Research of clock synchronization in distributed network [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2008, 29(11): 2399-2403. (in Chinese)
王刚, 黄飞, 乔纯捷, 等. 分布式网络时钟同步研究[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(11): 2399-2403.
- [11] Chen Chong, Li Hao. The influence of crystal stability on time synchronization accuracy of IEEE1588[J]. *Communications Technology*, 2011, 44(2): 67-69. (in Chinese)
陈重, 李浩. 晶振稳定度对 IEEE1588 的影响研究[J]. 通信技术, 2011, 44(2): 67-69.