

数字 BPM 信号处理器的研制进展

赖龙伟,冷用斌*,阎映炳,周伟民

(中国科学院上海应用物理研究所,上海 201800)

摘要:介绍了上海光源束测组自行研制的基于 FPGA 和 ARM 的一体化数字 BPM 信号处理器的进展,包括系统结构、关键技术创新、性能评估和下一步研究计划。该处理器是国内首台研制成功的 BPM 信号处理器,在研制过程中取得多项关键技术的突破,逐圈位置分辨率达到亚微米,与国际同类产品处于相同水平。目前,该处理器已完成第 2 版样机的研制,正在进行进一步系统优化。

关键词:上海光源;BPM 信号处理器;FPGA;ARM;亚微米

中图分类号:TL506;TL503.6 文献标志码:A 文章编号:1000-6931(2015)S1-0607-04

doi:10.7538/yzk.2015.49.S1.0607

Progress of Digital BPM Signal Processor

LAI Long-wei, LENG Yong-bin*, YAN Ying-bing, ZHOU Wei-min

(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract: A digital BPM signal processor prototype has been developed in Shanghai Synchrotron Radiation Facility (SSRF), which is based on FPGA and ARM. In this paper, the processor progress was introduced, including the processor structure, key innovation, performance evaluation and future plan. It is the first BPM signal processor developed in China. Some essential technical breakthroughs were made during the development, and it can reach sub-micrometer position resolution, which is the same level of international product. The second version processor prototype was developed, and further system optimization is in progress.

Key words: SSRF; BPM signal processor; FPGA; ARM; sub-micrometer

粒子加速器向着高亮度、低发射度不断发展,对束流诊断设备的要求也不断提高。其中,BPM 信号处理器是束流诊断中核心的仪器设备,它不仅能直接提供束流在加速器真空轨道中的运行位置等重要参数,还能导出加速器运行的束流频谱、工作点、响应矩阵、色散函数、自

由振荡频率、同步振荡频率、横向阻尼振荡时间、Beta 振荡相差、束团不稳定性、耦合度、束流阻抗等参数。因此,BPM 处理器的性能对先进加速器装置至关重要。

BPM 信号处理器的发展经历了 3 个主要阶段,实现了从模拟到数字化、智能化和一体化

收稿日期:2015-06-03;修回日期:2015-07-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11305253,11105211,11375255)

作者简介:赖龙伟(1985—),男,江西宁都人,助理研究员,博士,核技术及应用专业

*通信作者:冷用斌,E-mail: lengyongbin@sinap.ac.cn

的发展,分辨率逐步提高,逐圈分辨率达到亚微米水平。目前,此类信号处理器仅有国外唯一的一家公司(IT)出售成熟产品^[1],几乎所有的新同步辐射光源(包括英国 DLS、法国 Soleil、西班牙 ALBA)均采用了该公司产品。另外,美国布鲁克海文国家实验室的 NSLS-II^[2]、巴西的 Sirius^[3]等正在开发相应的处理器。上海光源束测组于 2007 年开始与中国科技大学快电子实验室合作研发 BPM 处理器,于 2011 年研制成功第 1 版样机^[4]。之后,对处理器提出了新的功能需求,在第 1 版技术的基础上对软硬件进行了重新设计,于 2012 年独立完成了第 2 版样机的研制^[5-6]。另外,中国科学院高能物理研究所于 2013 年下半年启动了针对北方光源的 BPM 处理器研制工作。

上海光源的数字 BPM 处理器逐圈位置分辨率达到亚微米,与国际同类先进产品相当。当前,正在进行进一步的优化调试,准备下一步的量产,可应用于国内已建成装置设备的维护和更新,同时建设中或正在规划的其他装置对此亦有巨大需求。本文将对上海光源束测组自行研制的基于 FPGA 和 ARM 的一体化数字 BPM 信号处理器的进展进行介绍。

1 处理器结构

BPM 信号处理器采用子母板的一体化结构,子板实现射频信号调理和数字化采样,母板基于 FPGA 和 ARM 实现数字信号处理、逻辑接口、系统控制和通信。处理器结构如图 1 所示。

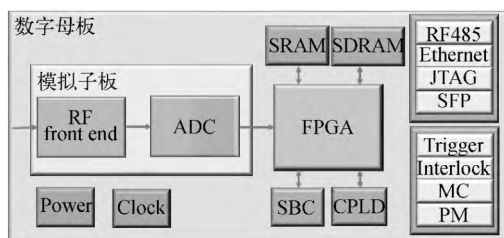


图 1 处理器结构

Fig. 1 Processor structure

模拟子板上的射频前端采用级联结构,1 dB 动态压缩 16.5 dBm,动态范围大于 65 dBm,最大增益 61 dB。ADC 采用 Analog Device 公司的 AD9461,16 位,采样率 117.279 9 MHz,信

噪比 60.67 dB,有效位达到 9.8。

数字母板基于 Xilinx 公司 Virtex5 系列 FPGA 芯片,实现处理器的主要功能:数字信号处理,能提供各类应用需求和不同速率的束流位置信号,包括逐圈、快反馈(10 kHz、50 kHz)、闭轨数据,同时实现各类外围器件接口逻辑。数字母板利用基于 ARM 的单板机(SBC)实现系统控制与外部通信功能。另外,基于 EPICS 架构开发了相关的 IOC 控制软件,方便嵌入控制网络进行数据交互。

2 技术创新^[7-11]

在处理器研制过程中,通过总结实际使用经验和研究新技术,取得了多项技术创新成果,部分相关成果取得授权发明专利。

2.1 基于 169 点实时 FFT 的信号处理算法

该算法的数字化采样速率等于 169 倍回旋频率,通过对一圈内的 169 点 ADC 采样原始数据进行 FFT 计算并提取中心频率信号频谱幅度,可提取束流 RF 信号回旋频率带宽范围内的束流信息,经后续处理可获得完整的束流信息。相较于传统的下变频算法,本算法不需正交本振信号,可从频域提取信号中降低噪声的影响,仿真结果表明,该算法能提高系统分辨率。该算法的难点在于 FPGA 需实现 169 点实时 FFT 算法,通过研究并行算法,采用 Cooley-Tukey 算法可成功将 169 点算法分解实现,测试结果表明,该算法能实现束流位置信号处理,且分辨率高于下变频算法。

2.2 四通道自校准功能模块

四通道由于器件和电路之间的差异性存在增益的不一致,表现为系统的非线性和零漂,影响处理器性能。解决方法是采用交联开关,但交联开关会引入切换噪声,影响逐圈数据的使用。通过在模拟子板上放置可调信号源,记录不同输出信号强度下四通道 ADC 的采样数据,并利用 FPGA 进行标定,在实际测量时,根据标定对输入信号进行修正,消除不一致性影响,本校准方案基于信号处理算法实现,对结果无干扰。

2.3 束流异常检测功能模块

光源在运行过程中可能发生不明原因部分丢束、轨道异常、工作点异常等,而现有的 BPM 处理器仅在发生彻底掉束时才会保存数据,因

此没有有效手段进行运行异常原因的分析。而自行研制的 BPM 处理器可根据需要开发相关功能模块,提供一种有效工具。目前已开发相关功能模块,能实时检测 top-up 期间的工作点变化和异常丢束。

2.4 巨量 50 kHz 数据

自行研制的 BPM 处理器能提供 52 万点 50 kHz 速率的数据,如此大量的数据可对束流频谱进行精细的分析,这是商业化 BPM 系统所不具备的功能。

3 性能测试及应用

本工作对第 2 套样机进行性能测试,图 2 为 ADC 的原始数据,其对比了 IT 公司的两款同类产品。图 3 为逐圈数据频谱,可看出,自行研制的 BPM 处理器能正确检测束流位置。利用巨量的 50 kHz 数据进行精确的频谱分析,分析结果如图 4 所示,从图 4 中可观察到 1.163 kHz 的噪声,分析其可能来源于高频低电平,同时还能看到工频信号噪声及其 2 倍频 100 Hz 信号 Δf 。图 5 为处理器实验室分辨率测试结果,可看出,逐圈分辨率能达到亚微米。

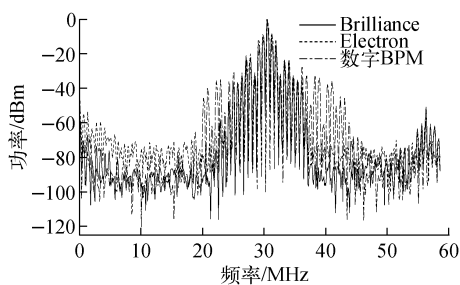


图 2 ADC 采样数据频谱
Fig. 2 Sampled ADC data spectrum

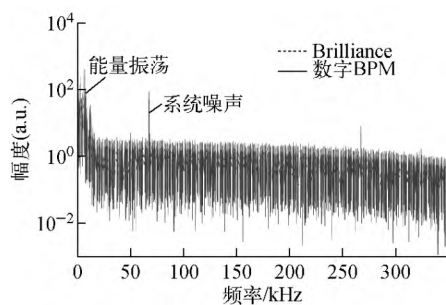


图 3 逐圈数据频谱
Fig. 3 Turn-by-turn data spectrum

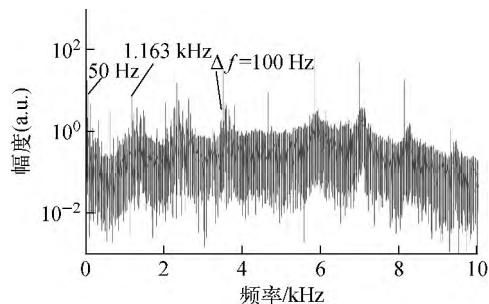


图 4 50 kHz 数据频谱
Fig. 4 50 kHz data spectrum

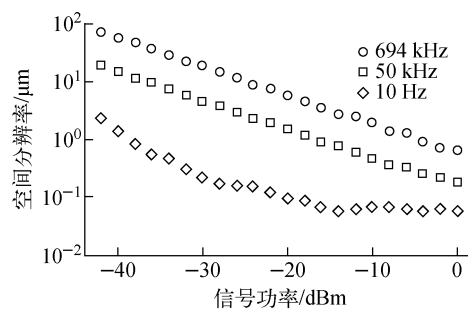


图 5 实验室分辨率测试结果
Fig. 5 Resolution of laboratory test

束流位置检测器的 SA 输出信号除了包含束流运行位置信息外,还包含了束团的电荷量信息,经过一定处理后能实现束流流强的测量和束流寿命的测量。上海光源束测组利用在线束流位置检测器进行了储存环流强和束流寿命方面的研究。研究表明,BPM 与 DCCT 系统相比,对流强测量具有更高的带宽,弱流强下具有更好的流强分辨率;对于束流寿命测量则具有更高的带宽,有利于进行不同时间尺度的束流寿命评估。本文利用数字 BPM 输出的 SA 和信号进行了束流流强和束流寿命的测量。

对 SA 的和信号和 DCCT 测量的流强信号进行线性拟合,获得拟合后的流强信号,相对误差在 $\pm 0.2\%$ 之内。

束流寿命 τ 在较短的时间(如几 min)内可认为是固定不变的,假定在间隔较小的 t_1 和 t_2 时刻,束流的寿命分别为 I_1 和 I_2 ,根据束流寿命计算公式:

$$I_2 = I_1 e^{-(t_2-t_1)/\tau}$$

可得到:

$$\tau = \frac{t_2 - t_1}{\ln(I_1/I_2)}$$

利用上述公式,根据拟合后的 SA 和信号,计算注入完成后衰减期间的束流寿命,并与 DCCT 计算的束流寿命进行比较(图 6)。可看出,数字 BPM 能有效测量束流寿命,但精度略差。

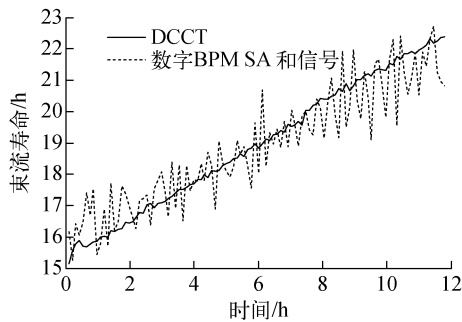


图 6 DBPM 束流寿命测量

Fig. 6 DBPM beam life measurement

以上测试结果表明,数字 BPM 处理器能正确获取束流的位置信号,达到了设计要求。在未进行各通道增益归一化和固定增益的情况下,其在线测量 TBT 位置信号(347 kHz 带宽)的分辨率可达亚微米量级,50 kHz(25 kHz 带宽)FA 位置信号分辨率达 $0.44 \mu\text{m}$, 10 Hz (5 Hz 带宽)SA 信号位置分辨率达 $0.23 \mu\text{m}$ 。因此,可利用 SA 数据进行束流流强测量和寿命测量。

4 结论

数字 BPM 信号处理器样机已达到设计目标,性能达到国际同类产品先进水平,但在量产前还有许多工作,如算法优化、上层应用软件的开发和优化、用户界面开发、系统优化、长期稳定性测试等,以上工作正在逐步开展。

参考文献:

- [1] Libera brilliance specification[M]. Slovenia: Instrumentation Technologies Company, 2008.
- [2] SINGH O M, BACHA B, BLEDNYKH A, et al. NLS-II BPM and fast orbit feedback system [C]//International Beam Instrumentation Conference. Oxford: IBIC, 2013; 316-322.

- [3] TAVARES D O, BARON R A, CARDOSO F H, et al. Development of the Sirius RF BPM electronics[C]//International Beam Instrumentation Conference. Oxford: IBIC, 2013; 63-66.
- [4] 冷用斌,易星,赖龙伟,等. 新型数字 BPM 信号处理器研制进展[J]. 核技术, 2011, 34(5): 326-330.
LENG Yongbin, YI Xing, LAI Longwei, et al. The development of a new digital BPM processor [J]. Nuclear Techniques, 2011, 34(5): 326-330 (in Chinese).
- [5] 赖龙伟. FPGA 在数字 BPM 信号处理器中的应用[D]. 北京:中国科学院研究生院, 2012.
- [6] 易星. 加速器束流信号调理及高速采集技术研究[D]. 北京:中国科学院研究生院, 2012.
- [7] 赖龙伟,冷用斌,阎映炳,等. 数字 BPM 信号处理算法研究[J]. 核技术, 2010, 33(10): 734-739.
LAI Longwei, LENG Yongbin, YAN Yinbing, et al. The algorithm for digital BPM signal processing [J]. Nuclear Techniques, 2010, 33(10): 734-739 (in Chinese).
- [8] LAI Longwei, LENG Yongbin, YI Xing, et al. DBPM signal processing with field programmable gate arrays[J]. Nuclear Science and Techniques, 2011, 22(3): 129-133.
- [9] YI X, LENG Y B, LAI L W, et al. A calibration method for the RF front-end asymmetry of the DBPM processor[C]//Proceedings of DIPAC. Hamburg: [s. n.], 2011; 56-58.
- [10] LAI L W, LENG Y B, YI X, et al. The study and implementation of signal processing algorithm for digital beam position monitor[C]//Proceedings of 2011 Particle Accelerator Conference. New York: [s. n.], 2011; 414-416.
- [11] 赖龙伟,冷用斌,易星,等. 数字束流位置信号处理算法优化[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(1): 109-113.
LAI Longwei, LENG Yongbin, YI Xing, et al. Optimization of signal processing algorithm for digital beam position monitor [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(1): 109-113 (in Chinese).