



·粒子束及加速器技术·

单次通过型束流位置探测器的束流位置测量方法

刘佳阳^{1,2}, 麻惠洲¹, 杜垚垚¹, 叶强¹, 刘智¹, 曹建社¹, 岳军会¹,
高国栋^{1,2}, 唐旭辉^{1,2}, 随艳峰^{1,2}, 魏书军^{1,2}

(1. 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 针对当前单次通过型数字束流位置探测器(BPM)有效采样点数少、数据信噪比低、测量分辨率差的问题, 提出了一种基于“束流单次通过”的数字 BPM 测量改进算法。该算法通过模拟信号的功分-延迟-合成, 增加了有效采样数据, 并通过采样数据的截取与数据拼接、数字滤波等数据处理方式, 提高了采样数据的信噪比, 并最终实现了 BPM 测量分辨率的提高。实验结果表明, 该算法在不改变模数转换器(ADC)采样率的情况下, 将单次通过型 BPM 的测量分辨率提高了约 2 倍。该测量方法为提高单次通过型 BPM 的测量分辨率提供了一种新的解决方案, 已成功应用于北京正负电子对撞机(BEPCII)和高能同步辐射光源(HEPS)直线加速器项目中。

关键词: 单次通过型束流位置探测器; 模拟信号延迟; 有效采样数据; 数字带通滤波; 分辨率

中图分类号: TL506

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.230264

Measurement method for beam position of single pass beam position monitor

Liu Jiayang^{1,2}, Ma Huizhou¹, Du Yaoyao¹, Ye Qiang¹, Liu Zhi¹, Cao Jianshe¹, Yue Junhui¹,
Gao Guodong^{1,2}, Tang Xuhui^{1,2}, Sui Yanfeng^{1,2}, Wei Shujun^{1,2}

(1. Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Due to the low effective sampling points, low data signal-to-noise ratio (SNR), and lower measurement resolution in the current single-pass digital Beam Position Monitor (BPM), a digital BPM measurement improvement algorithm for “beam single-pass” case is proposed. This algorithm enhances the effective sampling points by employing the “power division-delay-synthesis” technique for the analog signal. It improves the SNR of the sampling data through various data processing techniques, including data truncation, data concatenation, and digital bandpass filtering (BPF). Consequently, the resolution of the BPM is significantly enhanced. Experimental results demonstrate that this algorithm improves the measurement accuracy of the single-pass BPM by approximately two times without increasing the Analog-to-Digital Converter (ADC) sampling rate. The measurement method studied in this paper presents a novel solution for enhancing the measurement resolution of the single-pass BPM and has been successfully implemented in the Beijing Electron Position Collider II (BEPCII) and High Energy Photon Source (HEPS) linear accelerator projects.

Key words: single pass beam position monitor, analog signal delay, effective sampling data, digital bandpass filtering, resolution

在粒子加速器中, 需要精确测量束流在真空室中的位置信息^[1]。束流测量系统可以提供束流位置、流强、轨道、束团截面尺寸以及束流不稳定性增长时间等束流参数, 是加速器束流测控和日常运维不可或缺的重要组成部分^[2]。其中, 数字束流位置测量探测器(BPM)是进行束流位置测量的关键设备, 可以实现束流位置测量和束流轨道测量的功能。单次通过型数字 BPM 系统能够提供直线、输运线束流精确位置信息, 确保直线、输运线束流轨道

* 收稿日期: 2023-08-12; 修订日期: 2023-10-19

联系方式: 刘佳阳, liujiayang@ihep.ac.cn。

通信作者: 随艳峰, syf@ihep.ac.cn;

魏书军, weisj@ihep.ac.cn。

稳定性。由于直线加速器的束流为单次通过类型,当采用条带或纽扣型 BPM 探测器时,数字 BPM 电子学仅能采样到有限点数的数据信号,从而导致很难获得高精度测量结果^[3]。

目前直线加速器使用的单次通过型 BPM^[4],如果采用纯时域信号处理方式,想提高测量精度,就只能通过提高 ADC 有效采样点数的方法来实现^[5-6]。通常是通过提高 ADC 采样频率的方式来实现的。即使这样,也很难提高 BPM 的测量分辨率。鉴于现有技术上的限制,本文考虑在不提高 ADC 采样频率的基础上,利用模拟延迟线,信号再次合成的方式,提高 ADC 对 BPM 信号有效采样点数;在算法中利用频域处理方法处理数据^[7],以期获取较好的数据信噪比,有效提高单次通过束流的位置测量分辨率^[8]。

1 单次通过型数字 BPM 系统

单次通过数字 BPM 系统的结构如图 1 所示^[9],主要包括 BPM 束流位置探头、BPM 信号处理电子学以及位于数据服务器上的数据获取软件等 3 部分。其中 BPM 信号处理电子学部分又包括“射频信号调理模块”和“数字采样与信号处理模块”两部分。

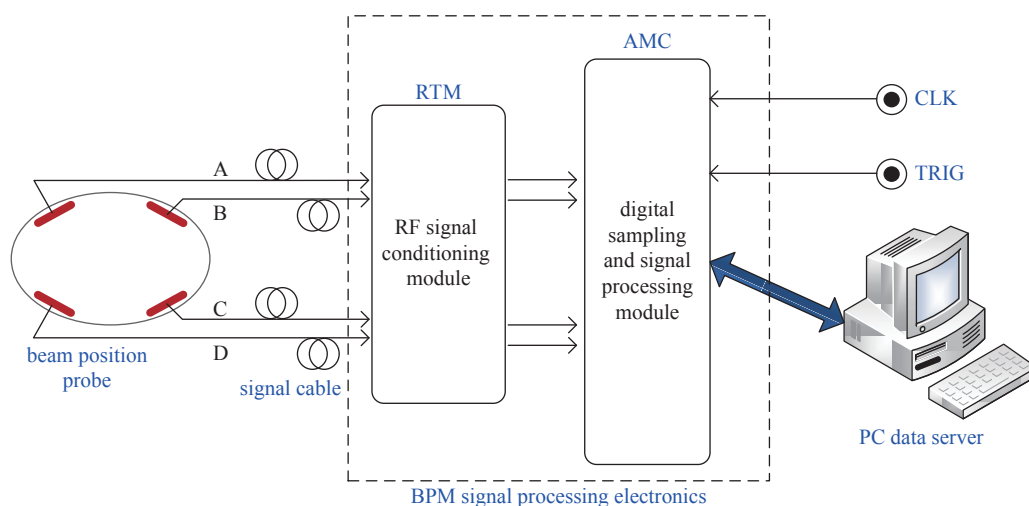


Fig. 1 Structure of digital beam position monitor system

图 1 数字束流位置测量系统结构

单次通过数字 BPM 系统的功能框图如图 2 所示^[10],主要包括模拟信号处理和数字信号处理两部分。模拟信号处理部分包括模拟信号的功分、延迟与合成,模拟信号的带通滤波与信号幅度调整等逻辑。ADC 之后是数字信号处理逻辑,数字信号处理部分主要包括三部分:有效数据的截取与数据拼接、通道数据的数字滤波与幅度求取和重心法求取 X/Y 位置信息。

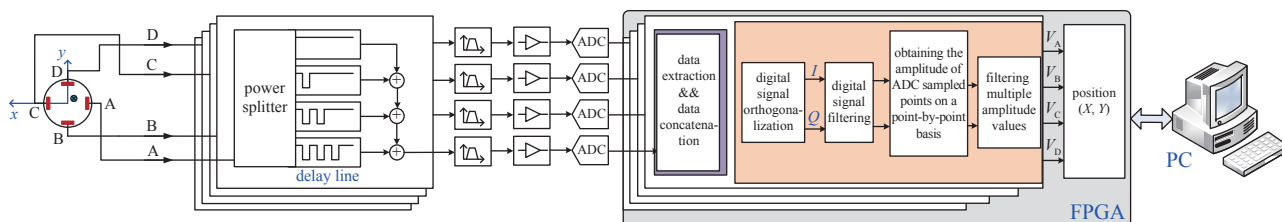


Fig. 2 Single pass digital BPM system function block

图 2 单次通过数字 BPM 功能框图

2 单次通过型数字 BPM 束流位置测量方法

单次通过数字 BPM 束流测量主要包括两部分内容:一部分为增加 ADC 有效采样点数在模拟电路前端的信号功分,信号延迟与信号合成逻辑。另一部分为 ADC 采样后,在数字信号处理中对 ADC 采样数据的“数据复制拼接”,“数据正交化处理”,“数据滤波处理”,“通道信号幅度求取”,然后根据通道幅度信息,并利用重心法求取束流信号的位置信息 (X, Y) 。信号处理流程示意如图 3 所示。

2.1 模拟信号的“功分延迟与合成”

电子束团在经过 BPM 探测器时, BPM 探测器探头的四个电极能够感应出四路幅度不同的脉冲信号,为增加

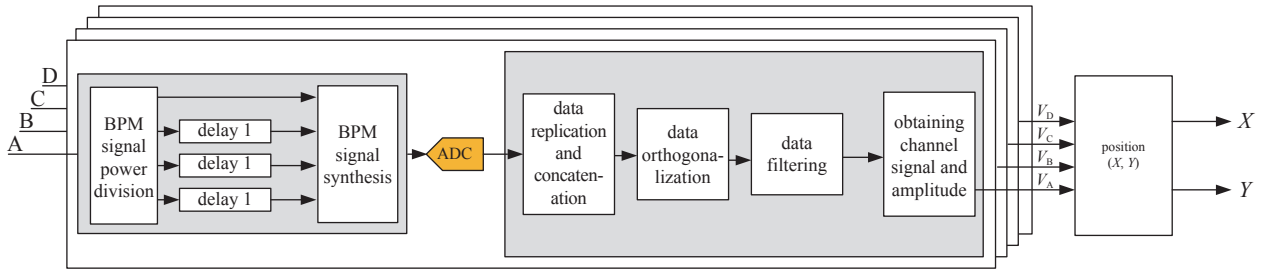


Fig. 3 Single pass BPM signal processing process

图 3 单次通过型 BPM 信号处理流程

模拟信号的有效采样点数, 在模拟信号处理部分, 首先对 BPM 探测器输出的信号进行功分, 形成 4 路信号; 然后对 4 路信号分别做 $0, \Delta T, 2\Delta T, 3\Delta T$ 等时间差延迟处理; 最后, 将延迟后的 4 路信号合功成一路信号, 示意如图 4 所示。

设计中, ΔT 取 8 ns, 或 8 ns 的整数倍, 一方面, 可有效提高 499.8 MHz 频率分量的幅度值, 另一方面, 能够加大该信号经带通滤波器 (499.8 ± 10) MHz 后, 信号中 499.8 MHz 分量在时间轴上的长度, 进而有效提高 ADC 的采样点数。

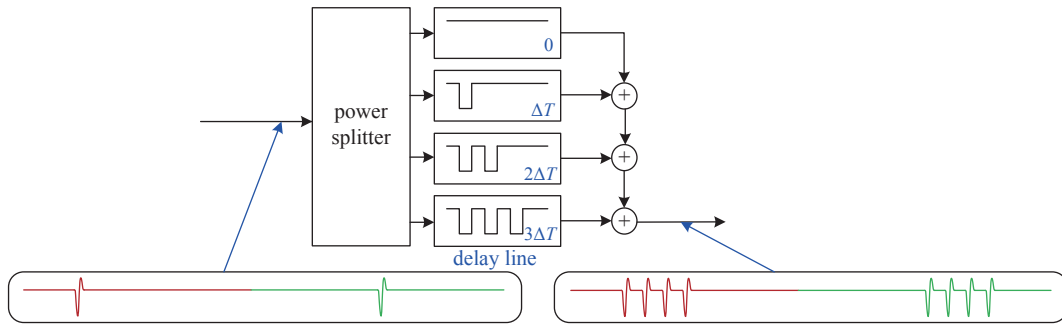


Fig. 4 Power division/delay/synthesis of analog signals

图 4 模拟信号的功分/延迟/合成

2.2 有效数据的截取与数据拼接

经过 ADC 采样后所获取的数字信号被传输至 FPGA 进行数字信号处理。首先, 根据触发信号进行开窗并截取有效的 ADC 采样数据, 主要目的为摒弃窗口外噪声数据, 以降低窗口外噪声对测量的影响; 然后对截取获得的有效 ADC 数据进行复制和拼接, 以提高有效数据对应频率的功率。原理示意如图 5 所示。

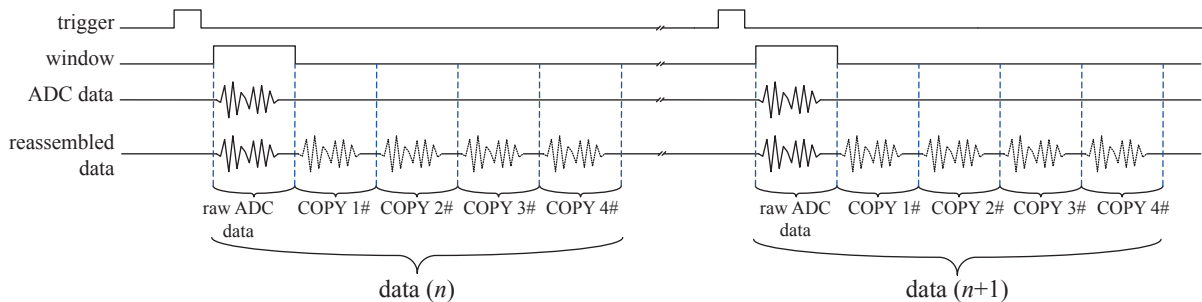


Fig. 5 Copy and splice of ADC sampling data

图 5 ADC 采样数据的复制与拼接

有效数据截取时, 原则上截取位于窗口内、且大于噪声的数据为有效数据; 模拟和实验表明, 当 BPM 探测器输出信号经过中心频率为 499.8 MHz、带宽为 20 MHz 的带通滤波器处理后, 其 499.8 MHz 频率分量的宽度约为 150 ns, 在利用 116.1152 MHz 时钟对该信号进行 ADC 采样时, 其有效采样点数约为 18 个。实验中, 为确保能够取到全部的 ADC 有效采样点, 我们开窗取 32 个有效采样点进行后续数据处理。

2.3 通道数据的数字滤波与幅度求取

对拼接后的数据进行带通滤波处理, 留下有效数据, 并去除信号复制和拼接过程中引入的复制重复频率, 减少因复制产生的重复频率对测量结果的干扰, 保证 BPM 的测量准确性。滤波处理可以采用如图 6 所示的带通滤波

器,其中,滤波器 3 dB 带宽设计为 5 MHz(f_H-f_L , 其中 f_H 为高通滤波器的截止频率, f_L 为低通滤波器的截止频率),有效数据位于频率 f_0 处,复制拼接频率位于 f_1 处。

BPM 四通道束流信号的幅度值求取过程,如图 7(a)~(f)所示,数字信号(RAW ADC DATA)为 BPM 四个通道中的某一个通道,该信号经过开窗、复制、拼接后,获得目标频率结构的数字信号;该信号经过带通滤波处理后,有效抑制带外噪声、并提高数据信噪比;对滤波后的信号做希尔伯特变换,获得与原信号相位相差 90° 的新的数字信号;

图 7(e)为相位相差 90° 的两路数字信号放在一起时的情况(绿色曲线为希尔伯特变换前,红色为变换后);把原信号和经过希尔伯特变换后的信号,做平方加和后再求其平方根,即获得该通道信号幅度信息。其他 3 路的幅度信息求取过程与此相同。

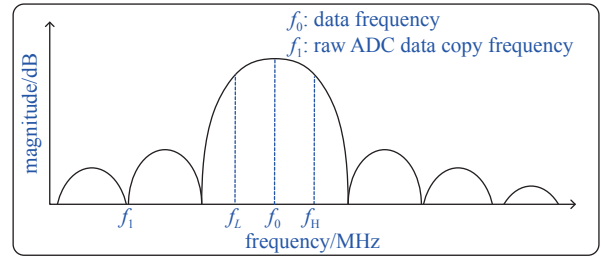


Fig. 6 Band pass filter design

图 6 带通滤波器设计

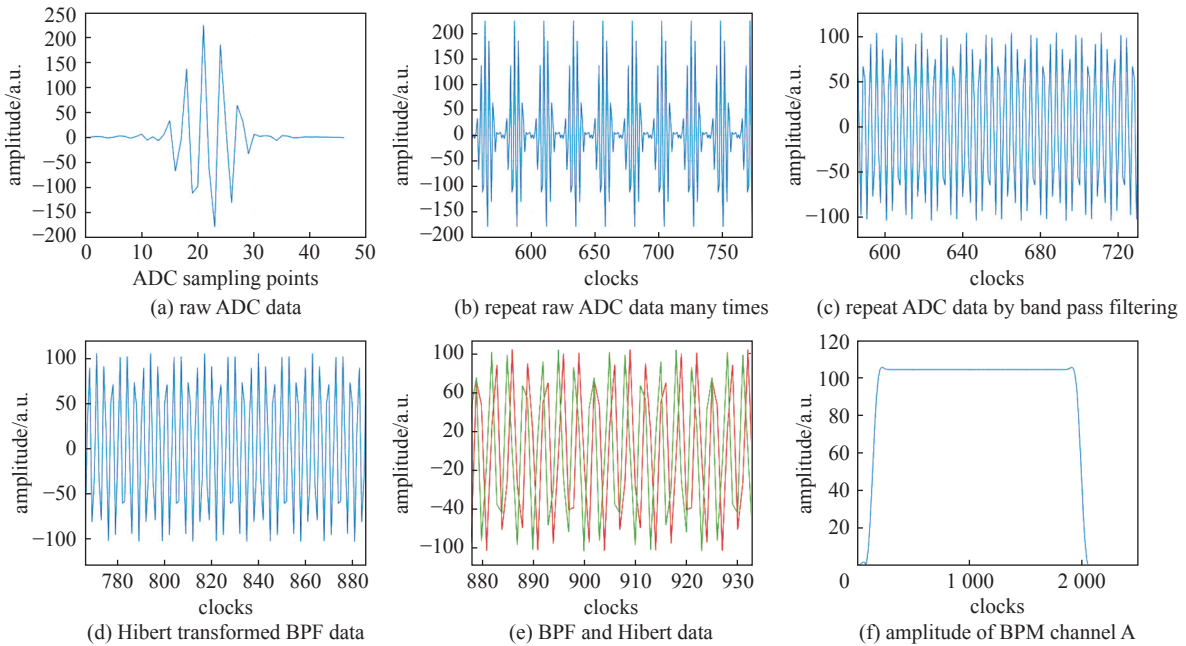


Fig. 7 Schematic diagram for calculating the amplitude of a certain path

图 7 一路幅度的求取示意

2.4 束流信号位置信息获取

单次通过型 BPM 探头的安装方式为垂直安装方式,采用重心法计算束流的位置^[11],如图 8 所示。

其中,重心法束流位置测量计算公式为:

$$X_m = K_x \times \frac{V_A - V_C}{V_A + V_C} + X_o \quad (1)$$

$$Y_m = K_y \times \frac{V_B - V_D}{V_B + V_D} + Y_o \quad (2)$$

式中: X_m, Y_m 为测量位置中的横纵坐标; V_A, V_B, V_C, V_D 为 4 路信号的幅度信息; K_x, K_y 分别为 BPM 探测器横纵方向的归一化常数; X_o 和 Y_o 为 BPM 探测器电中心与机械中心不完全一致所引起的偏置。

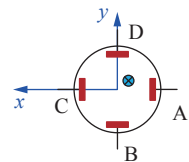


Fig. 8 Calculation of beam position using the center of gravity method

图 8 重心法束流位置计算

3 实验测试

3.1 模拟数据实验

实验是通过 MATLAB 来模拟生成 BPM 数据的。生成过程为:(1)首先,模拟生成一个带有一定噪声的 BPM 信号,如图 9(a)所示;(2)然后,利用一个中心频率为 499.8 MHz、带宽为 20 MHz 的带通滤波器对生成的 BPM 信号

进行处理, 处理后的数据如图 9(b)所示; 最后, 通过模拟采样, 获取模拟 ADC 数据, 如图 9(c)所示。我们利用上述方法产生实验用 BPM 模拟数据, 完成本文实验。

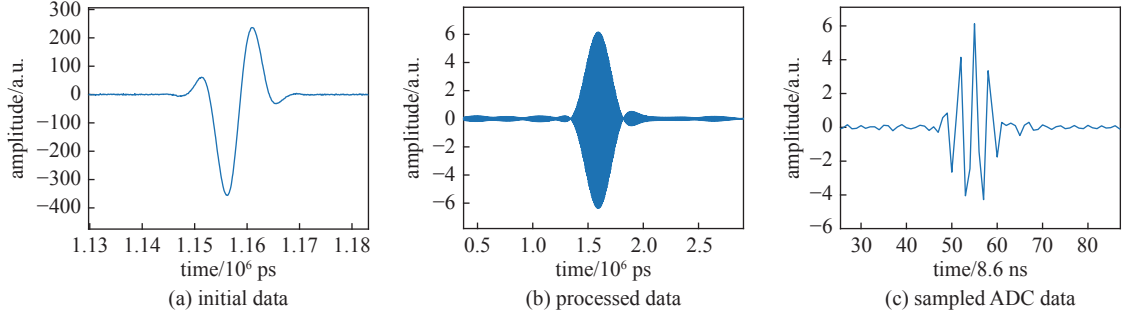


Fig. 9 Schematic diagram of BPM analog signal and ADC data generation process

图 9 BPM 模拟信号及 ADC 数据产生过程示意图

我们利用同一组模拟数据, 通过纯时域求绝对值积分方法求取束流位置信息, 将其与本文所设计的求取束流位置的方法进行了对比测试。利用“纯时域求绝对值积分法”求取 512 个位置 X/Y 位置结果如图 10 所示。图 10 结果显示, X 方向的位置分辨标准值为“0.0048 mm”, Y 方向的位置分辨标准值为“0.0049 mm”。

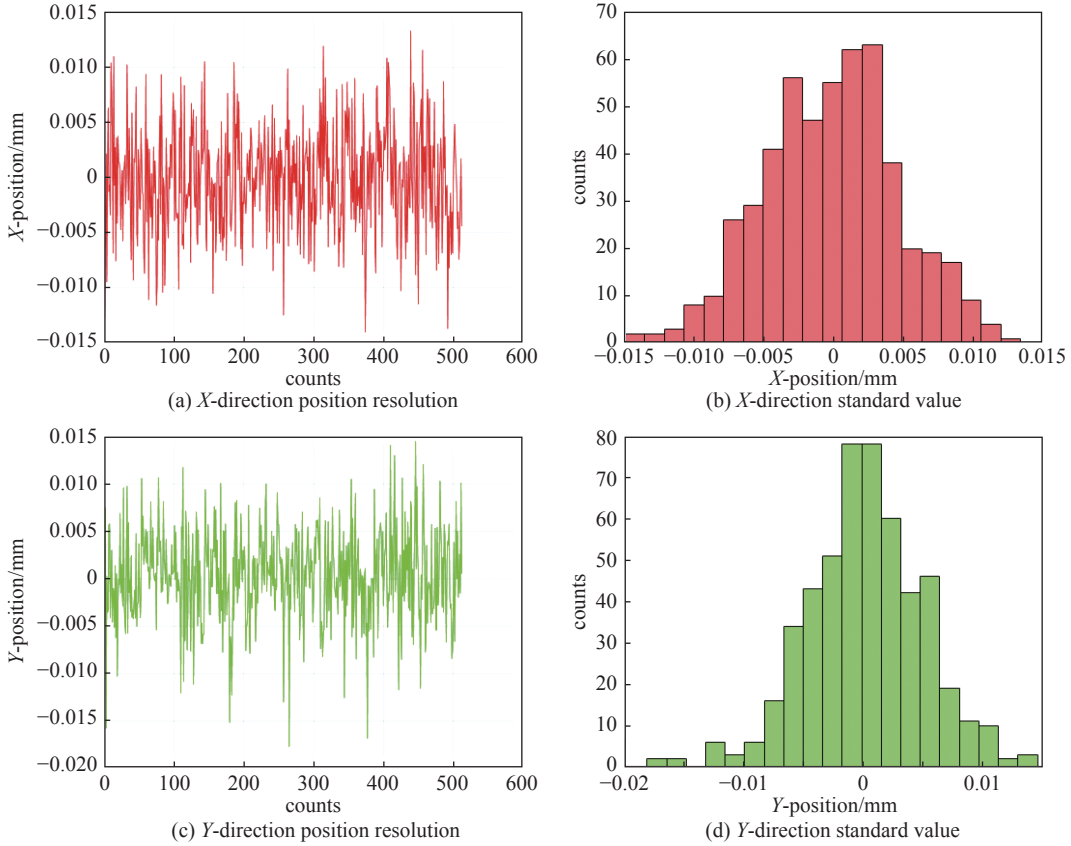


Fig. 10 X/Y -direction position resolution and its standard value

图 10 X/Y 方向位置分辨及其标准值

利用本文所设计束流位置方法求取 512 个位置 X/Y 位置结果如图 11 所示。图 11 结果显示: X 方向的位置分辨标准值为“0.0018 mm”, Y 方向的位置分辨标准值为“0.0018 mm”。

3.2 HEPS 实际束流实验

实际束流实验中, 我们在 HEPS 装置上利用自研数字 BPM 电子学获取了一组原始 ADC 数据, 利用同一组 ADC 数据对原有的纯时域求绝对值积分法与本文设计方法两种算法进行检验。其中采用纯时域求绝对值积分法所求得的结果如图 12 所示, 测得 X 方向位置分辨率为 0.02863 mm, Y 方向位置分辨率为 0.039816 mm。

采用本文所设计束流位置方法进行数据处理后, 其结果如图 13 所示。测得 X 方向位置分辨率为 0.021211 mm,

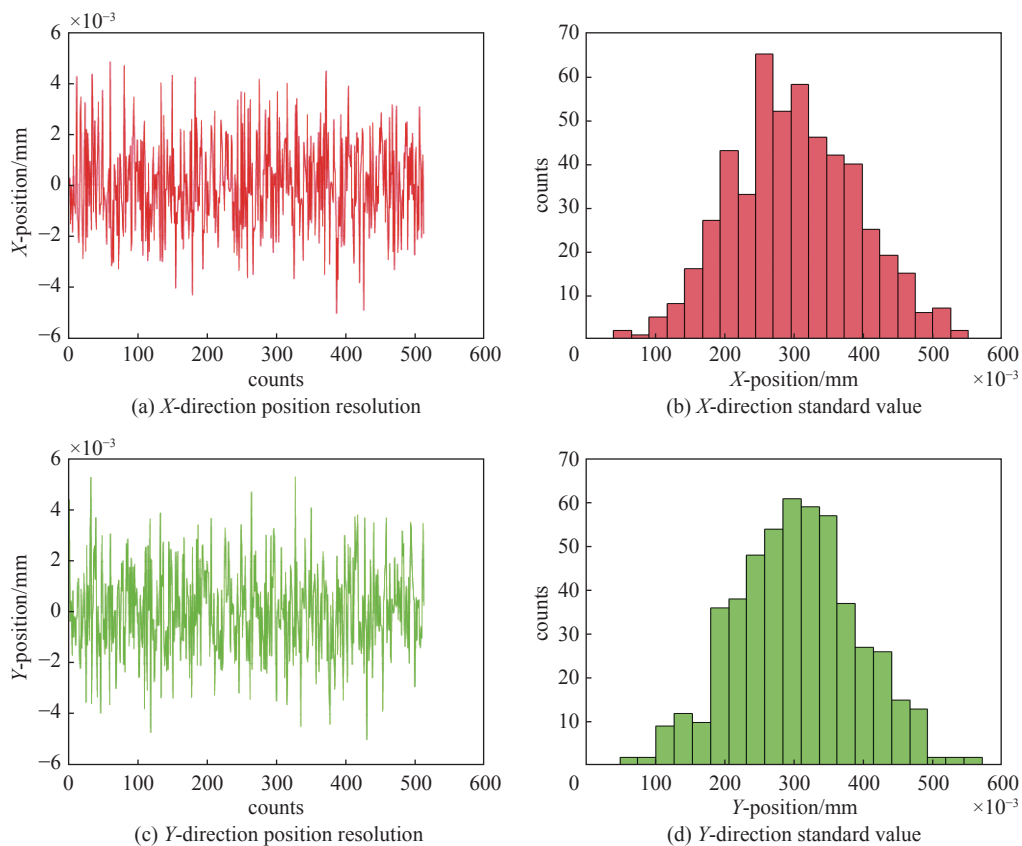


Fig. 11 X/Y-direction position resolution and its STD value

图 11 X/Y 方向位置分辨及其 STD 值

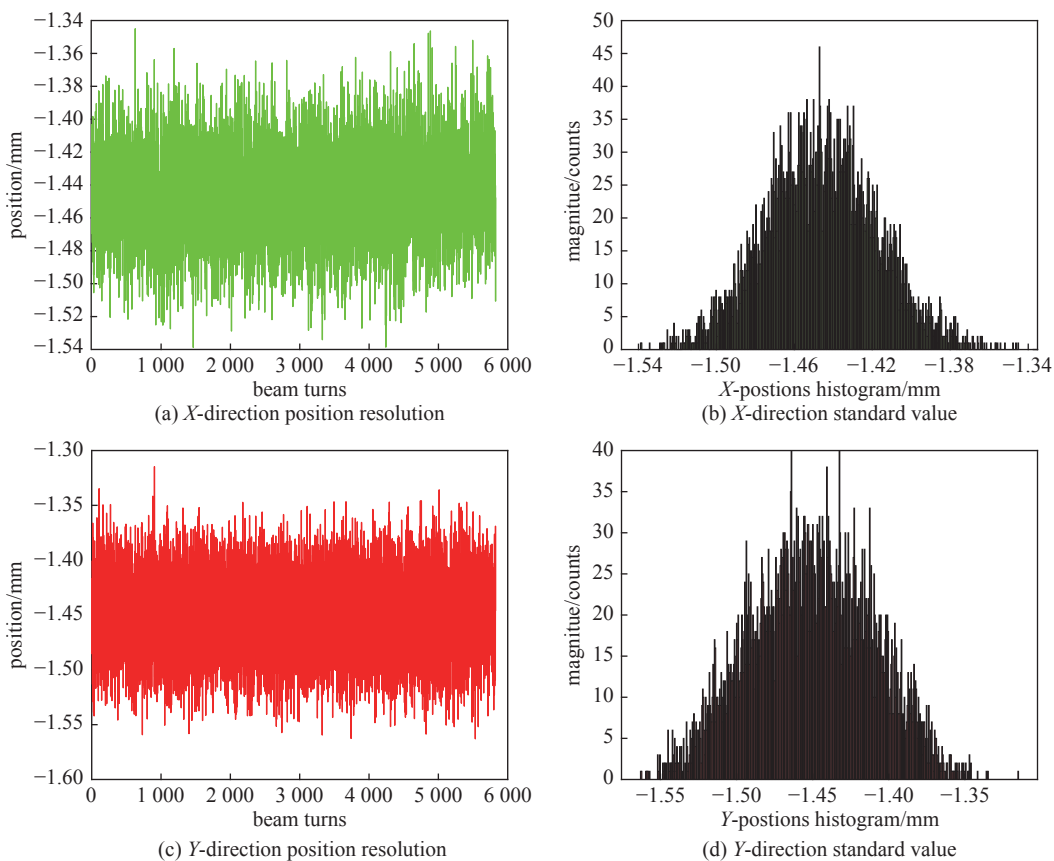


Fig. 12 Test results of the "pure time domain absolute value integration method" for actual beam flow

图 12 实际束流“纯时域求绝对值积分法”测试结果

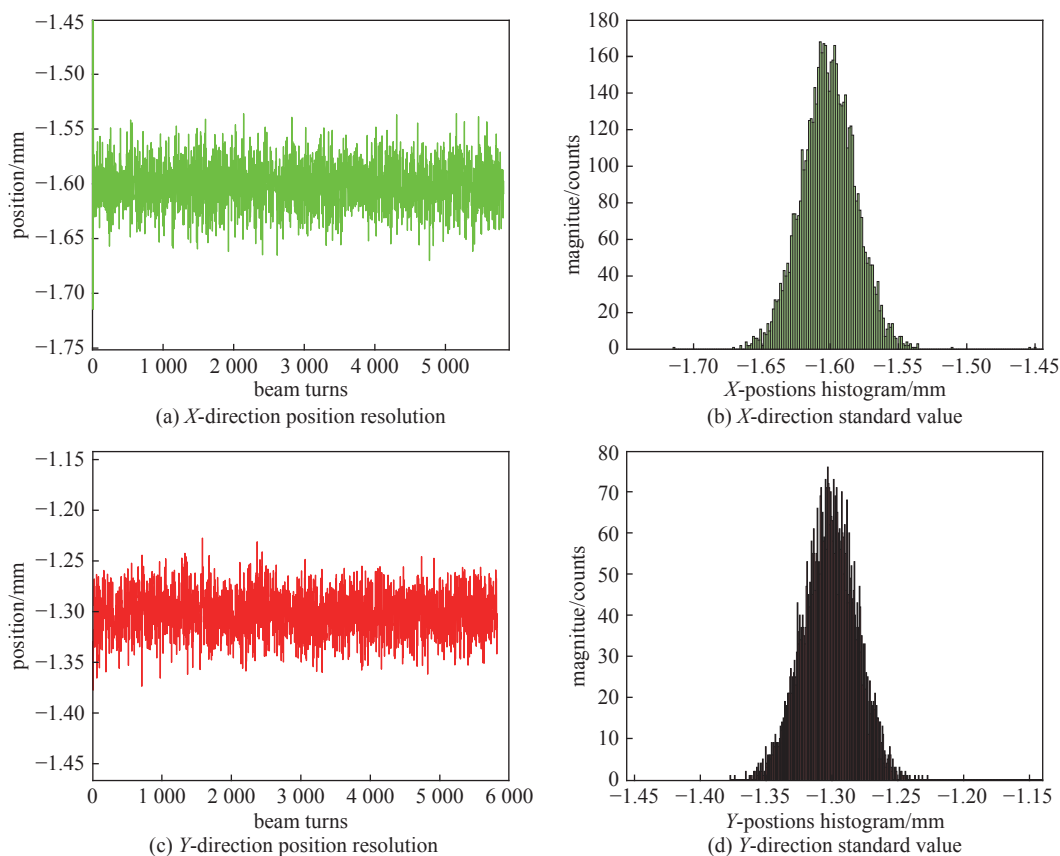


Fig. 13 Test results of the method in this article

图 13 本文所设计方法测试结果

Y 方向位置分辨率为 0.020236 mm 。

模拟实验结果与实际测试结果均显示,相比于与原有的纯时域求绝对值积分法,本文所设计束流位置测量方法是可行的,并且应用此方法所测得的束流位置分辨率相较于原有算法有着较大提升。

4 结论

本文根据单次通过型 BPM 的测量原理,利用模拟延迟线的方法,在不提高 ADC 采样频率的基础上,成功提高了 ADC 的有效采样点数。同时,在算法实现中,通过数据重组技术,有提升了信号中目标频率的功率。此外,我们还利用了频域数据处理方法,以获得较好的数据信噪比,并因此得到了更高的测量分辨率结果。本文所涉及算法部分已经成功应用于 BEPCII 和 HEPS 的直线和输运线部分,这为提高单次通过型数字 BPM 测量分辨率提供了一种思路,证明了通过引入模拟延迟线和数据优化处理算法,可以在不改变硬件设备的情况下,显著提升 BPM 测量的精度。

参考文献:

- [1] 高国栋, 唐旭辉, 曹建社, 等. 数字束流位置探测器系统的信噪比需求分析[J]. 强激光与粒子束, 2022, 34: 064001. (Gao Guodong, Tang Xuhui, Cao Jianshe, et al. Signal-to-noise ratio requirement analysis for digital beam position monitor system[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2022, 34: 064001)
- [2] 马宇飞, 周嘉申, 曹建社, 等. 基于 BEPC II 的数字束流位置探测器信号处理算法的 FPGA 实现[J]. 原子能科学技术, 2018, 52(10): 1874-1878. (Ma Yufei, Zhou Jiashen, Cao Jianshe, et al. Implementation of digital beam position monitor signal processing algorithm in FPGA based on BEPC II[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2018, 52(10): 1874-1878)
- [3] 何俊, 赵晓岩, 汪林, 等. BEPC II 束损系统研究[J]. 核技术, 2015, 38(10): 15-21. (He Jun, Zhao Xiaoyan, Wang Lin, et al. Study on beam loss system of BEPC II [J]. Nuclear Techniques, 2015, 38(10): 15-21)
- [4] 曹建社, 马力, 麻惠州, 等. Libera BPM 在 BEPC II 调束中的应用[J]. 中国物理 C, 2008, 32(S1): 102-104. (Cao Jianshe, Ma Li, Ma Huizhou, et al. Application of Libera BPM at BEPCII for the early commissioning[J]. Chinese Physics C, 2008, 32(S1): 102-104)
- [5] Wu Jiangfeng. System and method for spread spectrum ADC noise reduction: 9455733B1 [P]. 2016-09-27.
- [6] Valković V. Low energy particle accelerator-based technologies and their applications[M]. Boca Raton: CRC Press, 2022.

- [7] 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)
- [8] 魏晓娟. 重离子同步加速器 BPM 数字信号处理算法的研究[D]. 兰州: 中国科学院大学 (中国科学院近代物理研究所), 2021. (Wei Xiaojuan. Research on BPM digital signal processing algorithm for heavy-ion synchrotron[D]. Lanzhou: Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, 2021)
- [9] 叶强, 张醒儿, 随艳峰, 等. 数字 BPM 数字采样电子学研制[J]. 核电子学与探测技术, 2020, 40(6): 855-860. (Ye Qiang, Zhang Xinger, Sui Yanfeng, et al. The development of digital BPM digital acquisition electronics[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2020, 40(6): 855-860)
- [10] 随艳峰, 杜焱焱, 叶强, 等. 基于 BEPC II 数字束流位置测量系统电子学系统的设计与实现[J]. 原子能科学技术, 2020, 54(1): 172-178. (Sui Yanfeng, Du Yaoyao, Ye Qiang, et al. Development of digital beam position monitor electronics system based on BEPC II [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2020, 54(1): 172-178)
- [11] 魏书军, 徐韬光, 叶强, 等. 数字 BPM 电子学在束流位置测量中流强依赖性研究[J]. 原子能科学技术, 2022, 56(9): 1966-1974. (Wei Shujun, Xu Taoguang, Ye Qiang, et al. Study of beam current dependence of digital BPM's electronics[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2022, 56(9): 1966-1974)