



·粒子束及加速器技术·

基于导频技术的数字束流位置测量系统的研制*

杨 静^{1,2}, 杜垚垚^{1,2}, 叶 强¹, 麻惠洲¹, 汪 林¹, 高国栋^{1,2},
唐旭辉^{1,2}, 魏书军¹, 岳军会¹, 随艳峰^{1,2}, 曹建社^{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: 为改善传统的束流位置测量电子学系统受电子学通道非线性、温度漂移和系统噪声等因素对位置测量精度带来的影响, 介绍了一种新型的基于导频技术的数字束流位置测量电子学系统。该系统硬件包括模拟信号采集电子学、数字信号处理电子学和 PTC(导频信号耦合) 模块; 软件包括顶层应用软件和底层驱动, 束流信号与导频信号在耦合电路中耦合后, 经电子学处理, 在 FPGA 中计算得到归一化后的束流位置信息。实验室测试结果分析, 经导频信号归一化处理后能够有效改善各通道随温度变化的现象, 束流位置漂移从 4.5 μm 改善至 0.5 μm , 分辨率从 57.25 nm 提升到 13.37 nm, 并且进行导频信号开关实验更加直观观测导频信号对束流位置测量的在线校正效果。设计的基于导频信号的数字束流位置测量(DBPM) 电子学可以高效、实时地实现对加速器束流位置的在线校正, 提升电子学系统的实时分辨率性能。

关键词: 导频技术; 数字束流位置测量; 射频电路; 数字下变频; 温度漂移; 在线校正

中图分类号: TL506

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.220044

Development of digital beam position monitor system based on pilot tone technology

Yang Jing^{1,2}, Du Yaoyao^{1,2}, Ye Qiang¹, Ma Huizhou¹, Wang Lin¹, Gao Guodong^{1,2},
Tang Xuhui^{1,2}, Wei Shujun¹, Yue Junhui¹, Sui Yanfeng^{1,2}, Cao Jianshe^{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: A new DBPM electronics system based on pilot tone is introduced in this paper to improve the traditional DBPM electronics system which is affected by the non-linearity of electronic channel, temperature drift and system noise. The hardware of the electronics consists of analog signal acquisition electronics, digital signal processing electronics and pilot tone combiner electronics. The software consists of application software and firmware. The beam signal and pilot tone signal are coupled in the pilot tone combiner, and then the combined signal processed by electronic hardware board, and finally calculated by FPGA(Field Programmable Gate Array) to obtain the normalized beam position information. The electronics was tested in the laboratory and it is shown that the normalized pilot tone can effectively reduce the measurement variation with temperature of each channel. After normalization, the accuracy the channel changing with temperature is effectively improved. The beam position drift is improved from 4.5 μm to 0.5 μm , and the resolution is improved from 57.25 nm to 13.37 nm. And the pilot tone switching experiment can show intuitively the effect of the pilot signal on the beam position measurement of online correction. The design of DBPM electronics based on pilot tone can realize online correction of beam position measurement efficiently and in real time, and improve the real-time resolution performance of the electronics system.

Key words: pilot tone, Digital beam position monitor, RF circuit, Direct digital controller, temperature drift, online correction

* 收稿日期: 2022-02-12; 修订日期: 2022-05-16

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(11805221)

联系方式: 杨 静, yangjing2018@ihep.ac.cn.

通信作者: 曹建社, caojs@ihep.ac.cn.

北京正负电子对撞机重大改造工程(BEPC II)是一台聚物理能区国际领先的对撞机和高性能的兼用同步辐射装置^[1]。束流位置测量系统是束流诊断系统中最关键的子系统之一,束流位置的精确测量是轨道反馈控制的基础和束流轨道稳定性的保障;对于储存环加速器而言,由束流位置测量系统提供的束流位置信息,还可以计算出如工作点和动力学孔径等重要的束流参数^[2-3]。束流位置测量电子学由于温漂效应和通道非线性等影响位置测量精度,现有的解决方案如在束流位置测量电子学中引入交联开关或者采用恒温机箱控制等方法都有一定的局限性。近年来,意大利的ELETTRA、美国的NSLS II和ALS以及中国科学院高能物理研究所等单位开展了利用数字导频技术校正束流位置测量精度的初步研究,本文以BEPC II储存环加速器为研究对象,对数字导频技术在束流位置测量中的应用展开研究,研发了一套内嵌数字导频技术的数字束流位置测量电子学系统。

1 系统原理

对于储存环加速器常用的纽扣型BPM探测器,建立如图1所示的束流位置测量坐标系,通过差和比方法将电极信号归一化并得到束流位置,如式(1),其中 x 和 y 表示束流位置, V_A 、 V_B 、 V_C 、 V_D 为BPM探头感应到的四路信号幅度, k_x 、 k_y 为BPM探头的灵敏度系数, x_{offset} 和 y_{offset} 代表位置偏移,这种方法在束流位置测量中常用^[4-5]。本文利用数字导频技术,将温度漂移和通道非线性等因素对束流位置测量分辨率带来的影响进行高效、实时在线校正。束流信号频率为499.8 MHz,在频带处理范围内(± 10 MHz)载入频率约为497 MHz的导频信号,如图2所示,以A通道为例, $A(s)$ 为A通道束流信号的振幅、 $P_A(s)$ 为A通道导频信号的振幅, $H_A(s)$ 为电子学系统A通道的传递函数、 $V_A(s)$ 和 $V_{PA}(s)$ 分别为束流信号和导频信号经过电子学A通道后的响应,表达式如式(2),将式(2)带入式(1)即可得到经导频信号实时校正后的归一化束流位置,其表达式如式(3),其中 x_{nor} 和 y_{nor} 表示束流位置, V_{PA} 、 V_{PB} 、 V_{PC} 、 V_{PD} 为导频信号的四路信号幅度。

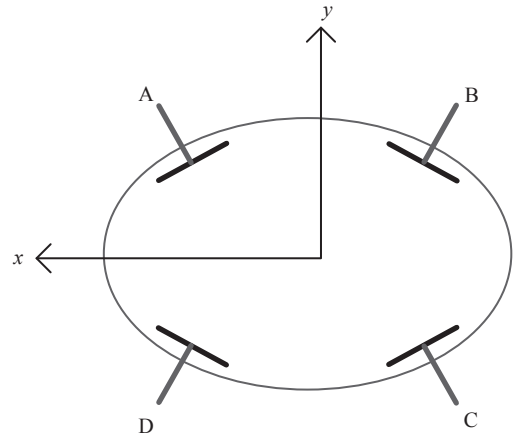


Fig. 1 Coordinate system of BPM probe

图1 BPM 探头坐标系

$$\begin{aligned} x &= k_x \frac{(V_A + V_D) - (V_B + V_C)}{V_A + V_B + V_C + V_D} + x_{\text{offset}} \\ y &= k_y \frac{(V_A + V_D) + (V_B + V_C)}{V_A + V_B + V_C + V_D} + y_{\text{offset}} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} V_A(s) &= H_A(s) \cdot A(s) \\ V_{PA}(s) &= H_A(s) \cdot P_A(s) \\ A(s) &= \frac{V_A(s)}{V_{PA}(s)} \cdot P_A(s) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} x_{\text{nor}} &= k_x \frac{(V_A/V_{PA} + V_D/V_{PD}) - (V_B/V_{PB} - V_C/V_{PC})}{V_A/V_{PA} + V_B/V_{PB} + V_C/V_{PC} + V_D/V_{PD}} + x_{\text{offset}} \\ y_{\text{nor}} &= k_y \frac{(V_A/V_{PA} + V_D/V_{PD}) + (V_B/V_{PB} - V_C/V_{PC})}{V_A/V_{PA} + V_B/V_{PB} + V_C/V_{PC} + V_D/V_{PD}} + y_{\text{offset}} \end{aligned} \quad (3)$$

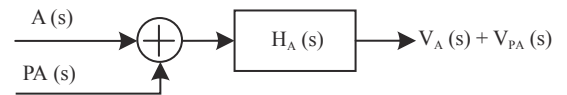


Fig. 2 Principle diagram of pilot tone

图2 导频信号原理框图

2 系统架构

基于数字导频信号的数字BPM电子学系统架构,如图3所示。软件部分由底层驱动和顶层应用软件组成,采用Xilinx ZYNQ FPGA作为控制单元,可通过32 Gbyte micro SD-Card进行程序启动,在Linux环境下运行自定义Debian系统,并且嵌入EPICS IOC,采用2 Gbyte DDR3 Memory进行数据缓存,通过千兆网络进行数据传输;硬件部分由AFE(Analog Front End)板、DFE(Digital Front End)板和PTC板构成,来自储存环BPM探头的射频信号与AFE板产生的导频信号在PTC板中耦合后经由AFE板进行增益调节与信号提取,在ADC芯片带通采样下将模拟信号数字化;经过ADF接口在DFE板的FPGA芯片中解调出导频信号和束流信号,通过数字下变频算法计算出对应各路信号的幅度信息,得到不同模式下的束流位置信息;在底层设计了带有导频信号归一化的驱动程序,并通过顶层应用软件调用接口并实时显示束流位置经导频信号归一化前后的校正结果^[6]。

3 硬件设计

3.1 导频信号产生电路

导频信号产生电路位于AFE板上,主要由“时钟分配芯片+超低噪声频率合成器+ALC电路”三部分组成,时钟

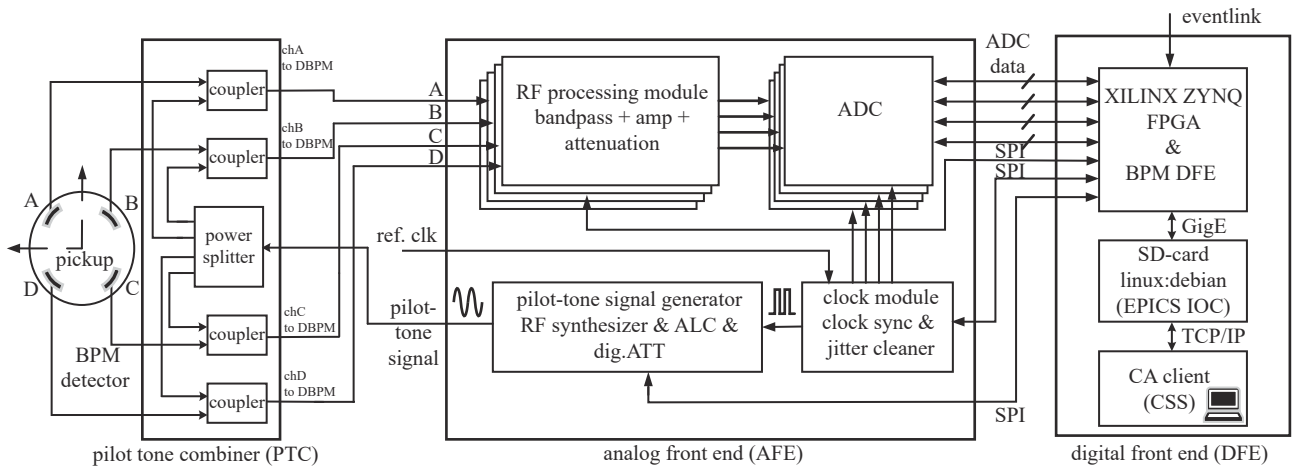


Fig. 3 Architecture diagram of DBPM electronics system based on pilot tone

图 3 基于导频信号的 DBPM 电子学系统架构图

分配芯片负责产生与回旋频率锁相的多路低抖动时钟信号，分别提供时钟给四路 ADC 芯片和超低噪声频率合成器芯片，该低抖动时钟信号在超低噪声频率合成器中通过 PLL(锁相环)进行小数倍频得到约 497 MHz 的方波信号，而后通过 ALC 电路进行滤波调理、信号提取并实现导频信号的负反馈稳幅控制环路，最终得到输出功率稳定的正弦波导频信号，其原理如图 4 所示。

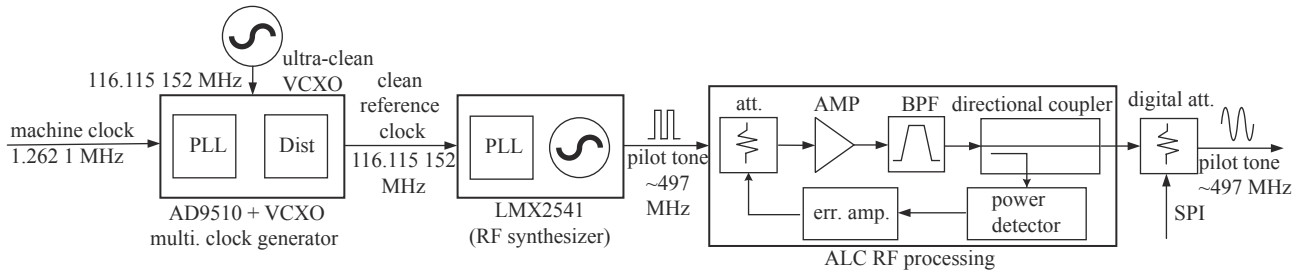


Fig. 4 Block diagram of pilot tone generation circuit

图 4 导频信号产生电路设计框图

3.2 耦合电路

如图 5 所示，PTC 电路实现 BPM 探测器通过线缆得到的四路束流信号与 AFE 板产生的导频信号的叠加。导频信号产生电路通过一分四的功分器将该导频信号等分为四路导频信号，BPM 探测器电极拾取的四路束流信号与功分后的四路导频信号通过四个定向耦合器耦合，PTC 电路输出四路耦合过后的束流信号与导频信号；基于信号完整性考虑，PTC 电路板进行了阻抗匹配与各个信号通道的空间隔离以及金属屏蔽罩的设计以防止空间串扰，至此实现导频信号与束流信号的叠加并接到束流位置测量电子学系统中。

3.3 射频信号处理电路

位于 AFE 板上的 RF Processing Module 对 PTC 电路输出的叠加信号进行目标带宽内的频率提取和增益调节，由四路完全相同的射频信号处理通道组成，如图 6 所示，采用低通滤波器和带通滤波器级联使用实现目标束流信号和导频信号的提取，滤除通带范围外的噪声信号；采用三阶交调点更高的射频低噪声放大器改善电子学通道非线性；同时与数控步进衰减器级联使用实现束流信号和导频信号的幅度调节，使得 ADC 芯片的模拟输入与其参考电压相匹配，保证 ADC 芯片的分辨率；巴伦将单端叠加信号转为差分对信号输出，增强四路信号的抗干扰能力，经 ADF 高速接口送至 ADC 芯片进行带通采样^[7-9]。

4 固件算法设计

数字信号处理部分主要由位于 DFE 板上的 FPGA 芯片完成，主要包括自定义功能的模块和数字下变频算法的模块。自定义功能的模块主要包括时钟分配模块、ADC 欠采样模块、数字衰减器模块和导频信号模块，实现各模块时钟信号的产生、ADC 带通采样、信号的增益调节和导频信号产生控制等功能，自定义模块内部采用 Verilog 硬件描述语言编写，由对外接口定义、逻辑功能实现和寄存器配置等部分组成^[10]；数字下变频算法模块包括 DDS

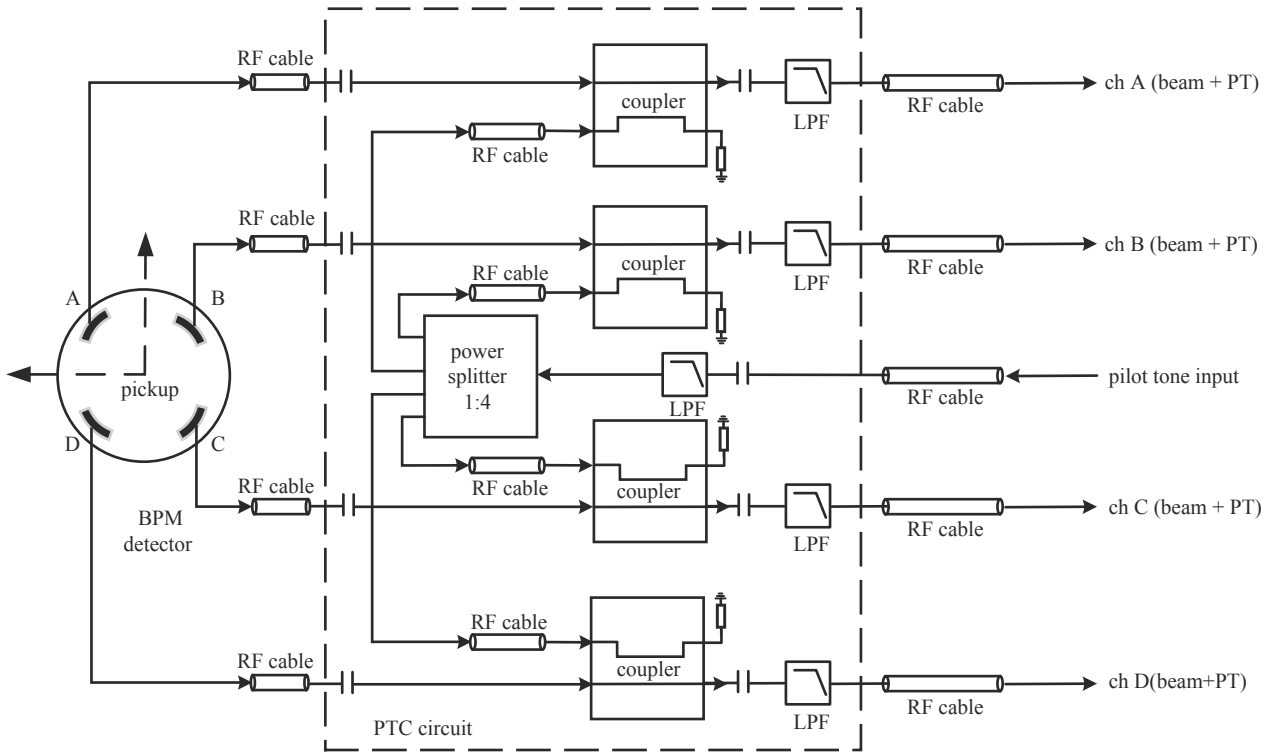


Fig. 5 Block diagram of PTC circuit

图 5 PTC 电路设计框图

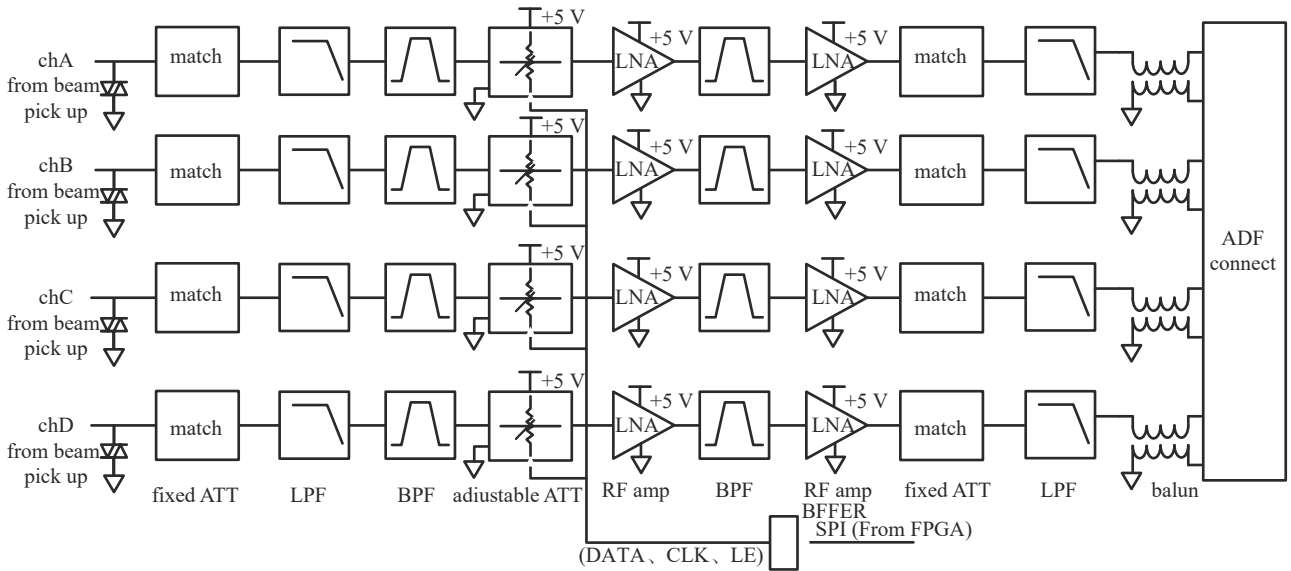


Fig. 6 Block diagram of RF signal processing

图 6 射频信号处理框图

Compiler、Complex Multiplier、Cordic、CIC Compiler、FIR Compiler 等部分,该算法处理经高精度 ADC 带通采样得到的中频带宽数字信号,将该数字信号第二次下变频到基带,得到直流的 IQ 信号,以此计算 ADC 输入混频信号的幅度,利用数字滤波器对该信号进行抽取滤波,得到不同速率和带宽的束流位置信息^[11-15]。

数字信号处理流程如图 7 所示,载波信号分别经过两个输出频率为 35.3394 MHz 和 32.5535 MHz 的数字振荡器,将束流信号和导频信号分别混频到基频,此时数据频率仍为 116.1152 MHz;该信号经 CIC Filter 实现 92 倍抽取滤波将数据速率下降到回旋频率 1.2621 MHz,其对应逐圈(TBT)模式的数据速率;利用 Cordic 算法计算束流信号和导频信号各通道信号幅度;将速率为 1.2621 MHz 的数据经过 64 倍的分 C IC Filter 和 2 倍的分 FIR Filter 抽取滤波得到数据速率约为 9.8 kHz,其对应快轨道反馈(FA)模式的数据速率;将速率 9.86 kHz 的数据经过 64 倍的分 C IC Filter 和 16 倍的分 FIR Filter 抽取滤波得到数据速率约为 10 Hz,其对应闭轨(SA)模式的数据速率;利用式(3)计算得到归一

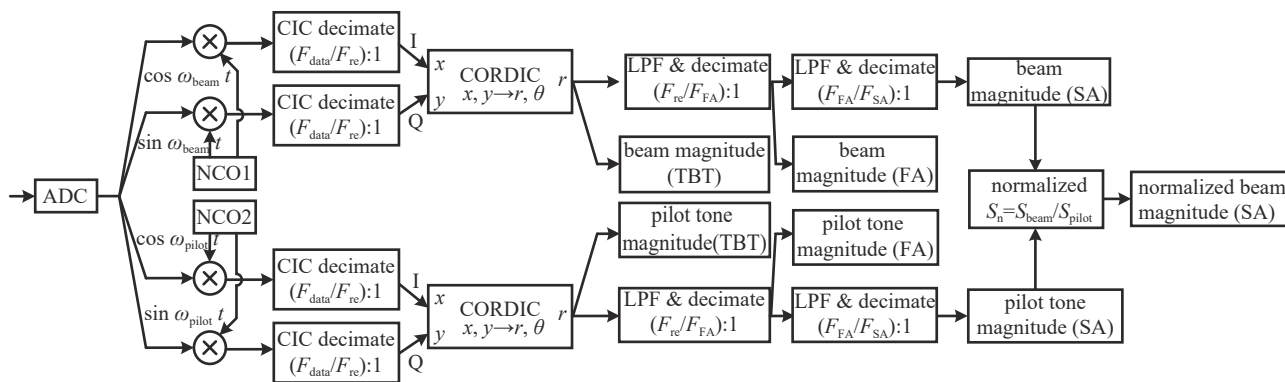


Fig. 7 Algorithm block diagram of pilot tone

图 7 导频信号算法结构框图

化后的束流位置信息。

5 电子学测试

5.1 导频信号耦合电路功能测试

PTC 耦合电路中集成了束流信号和导频信号的传输网络和叠加网络,工作频率高、幅度指标要求高,由于微带传输线的电磁场分布特性,会有部分射频信号泄露到其他网络出现相互串扰,影响 DBPM 电子学的正常工作^[16]。如图 8 所示,为了避免射频网络传输中的电磁能量向其他网络和空间泄露,在电路设计上增加双排金属化屏蔽孔对带状线进行隔离,并且按照 $50\ \Omega$ 进行特性阻抗匹配,在板上进行空间隔离带设置并且后期制作金属屏蔽盒进一步加强空间屏蔽。如表 1 和表 2 所示,利用矢量网络分析仪测得四通道一致性较高,各个通道之间的隔离度都在 68 dB 以上,与 BPM 探测器的隔离度相当,保证了耦合电路的正常使用。如图 9 所示,高精度信号源模拟输出束流信号,电子学产生导频信号,两者在耦合电路中叠加并通过频谱仪直接观察耦合电路输出信号频谱,可以清晰地分辨出束流信号和导频信号两种信号频率,故耦合电路性能符合设计要求。

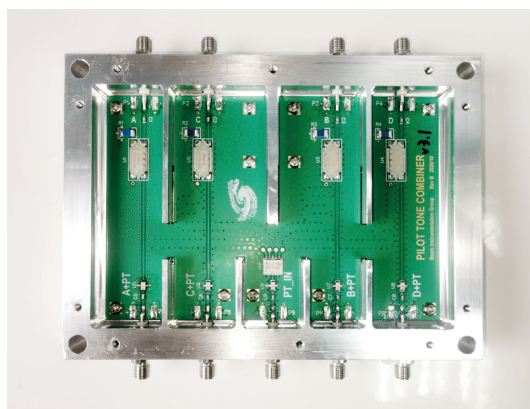


Fig. 8 Picture of PTC circuit

图 8 导频信号耦合电路实物图

表 1 导频信号耦合电路一致性测试

Table 1 Conformance test of PTC circuit

Channel	Δ/dB
Ch A	20.50
Ch B	20.20
Ch C	20.10
Ch D	20.30

表 2 导频信号耦合电路隔离度测试

Table 2 Isolation test of PTC circuit

input	output/dBm			
	Ch A+PT	Ch B+PT	Ch C+PT	Ch D+PT
0 dBm				
Ch A	-2.02	-85.04	-68.54	-75.45
Ch B	-88.73	-1.88	-82.52	-82.92
Ch C	-70.07	-80.18	-2.03	-87.42
Ch D	-91.33	-82.98	-88.26	-1.87

5.2 射频信号处理电路功能测试

使用矢量网络分析仪对射频模拟电路进行频率响应测试,由图 10 可知,射频模拟电路频谱响应为带通滤波器。设计中分别对声表面滤波器和陶瓷滤波器进行性能测试,从结果可以看出,在工作频带范围内(499.8 MHz,带宽 $\pm 10\ \text{MHz}$)陶瓷滤波器的平坦度明显优于声表面滤波器,将通带内平坦度从声表面滤波器的 $\pm 0.5\ \text{dB}$ 左右优化至陶瓷滤波器的 $\pm 0.1\ \text{dB}$,对于保证导频信号与束流信号幅度一致性具有决定性作用。

利用高精度信号源模拟输出束流信号,衰减器设置值不变,改变电子学输入信号幅度,获取 ADC 原始数据测量前端电子学的线性度进行 FFT 分析,由图 11 可知,在 ADC 满量程范围内,射频链路呈线性。如图 12 所示,系统的 SFDR(无杂散动态范围)约为 63 dB;射频模拟前端产生导频信号。图 13 为经 ALC 电路输出导频信号的稳定性

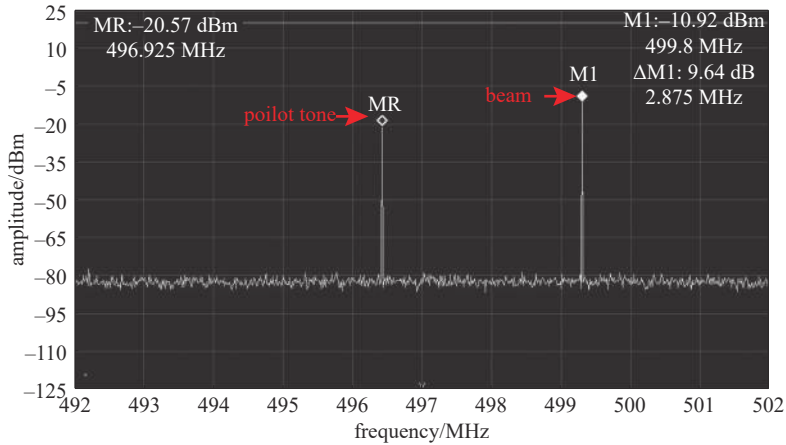


Fig. 9 Spectrum diagram of PTC circuit

图 9 PTC 耦合电路频谱图

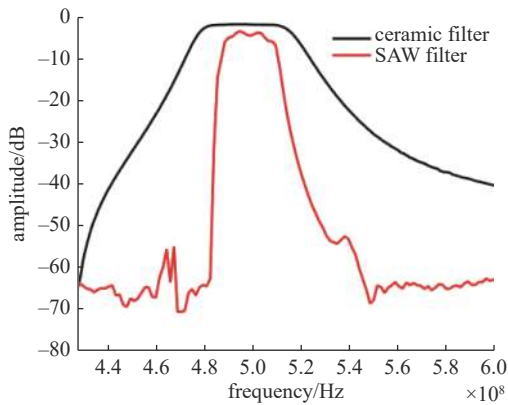


Fig. 10 Frequency response test result of RF circuit

图 10 射频电路频率响应测试

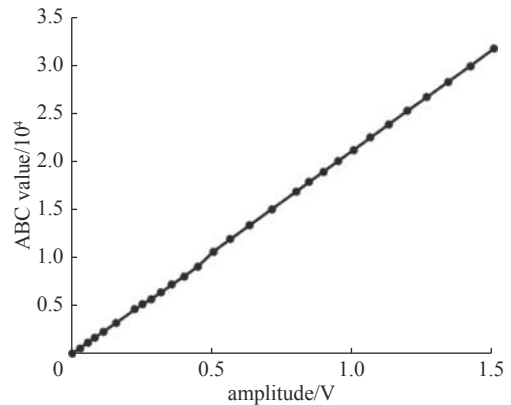


Fig. 11 Linearity test result of RF circuit

图 11 射频电路线性度测试

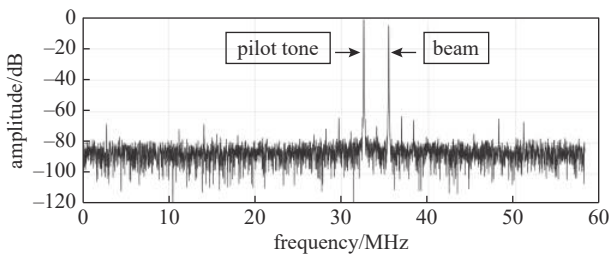


Fig. 12 Test result of PTC circuit

图 12 导频信号耦合电路测试结果

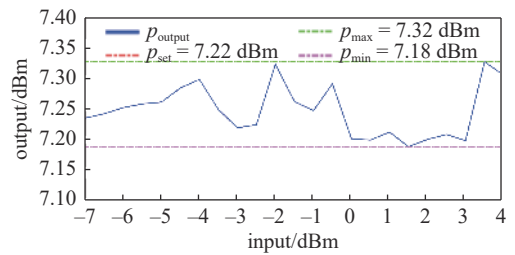


Fig. 13 Test result of ALC circuit

图 13 ALC 电路测试结果

测试结果, 可知导频信号在约 10 dBm 的范围内波动时, ALC 电路能够将其稳定在 ± 0.1 dB 范围内, 保证导频信号不受外界影响稳定输出。图 14 为相噪仪对导频信号的测试结果, 导频信号相位噪声在 250 fs 左右, 表现出良好的相位噪声特性。

5.3 样机性能测试

基于以上各部分功能测试, 将该套电子学在实验室环境中进行整体性能评估。图 15 为束流信号四通道 SA 数据随四通道温度变化的 7 h 测试结果, 可见各通道 SA 数据与温度变化呈反向相关关系。图 16 为导频信号补偿后的四通道 SA 数据随四通道温度变化的 7 h 测试结果, 对比可知导频信号归一化后通道测试随温度变化有明显改善。从图 17 可以看出, 导频信号对于改善温度漂移带来的束流位置漂移效果明显, 7 h 内束流位置由温漂带来的位置漂移约为 $4.5 \mu\text{m}$, 导频信号开启后束流位置由温漂引起的位置漂移约为 $0.5 \mu\text{m}$ 。并且利用导频信号能够有效提升束流位置测量的实时分辨率性能, 如图 18 所示, 经计算, 实时分辨率从 57.25 nm 提升到 13.37 nm 。图 19 为 2 h 的导频信号开关实验测试结果, 可直观看到导频信号开启时对束流位置的校正效果。

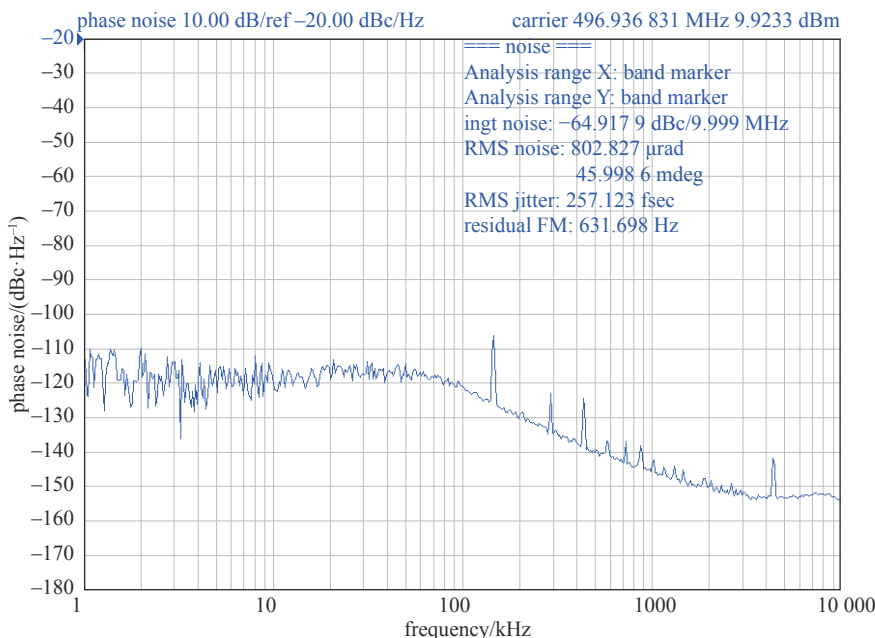


Fig. 14 Clock jitter measurement result of pilot tone

图 14 导频信号时钟抖动测量结果

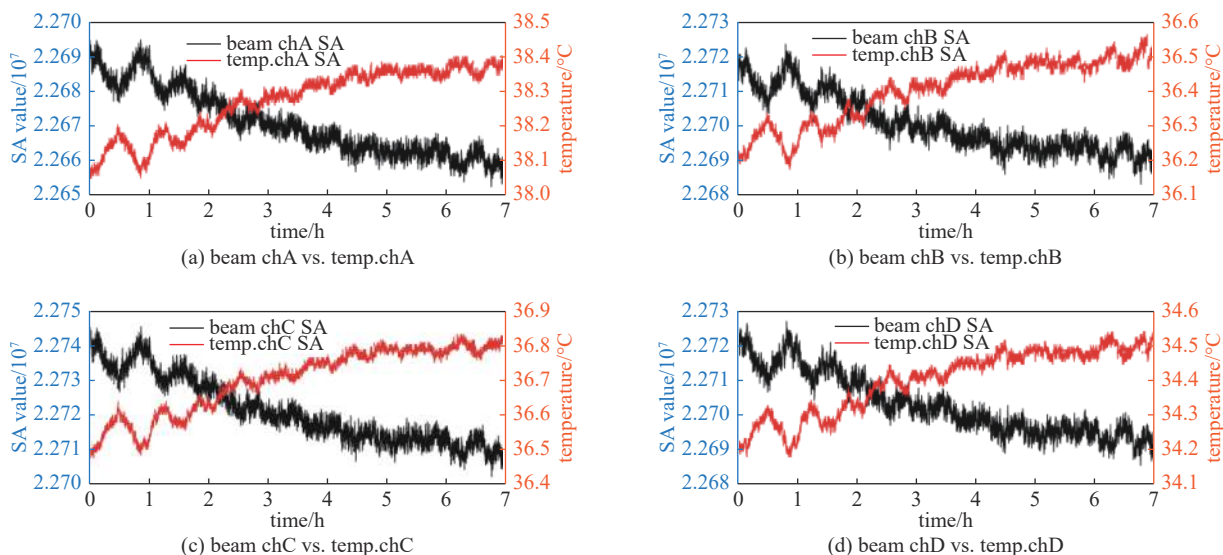
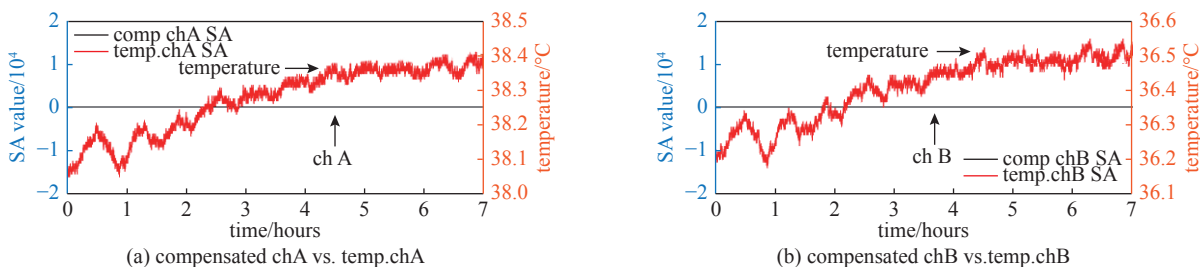


Fig. 15 Test results of beam channels with temperature

图 15 束流通道随温度变化测试结果

6 结 论

本文介绍了基于导频信号的 DBPM 电子学系统, 基于导频信号的数字束流位置测量电子学的整体架构、导频信号的归一化计算原理、导频信号的产生、电子学硬件构成以及固件算法等方面内容, 着重介绍了导频信号产生电路及相关测试结果。本文研制的新型基于导频信号的 DBPM 电子学系统可以实时、高效地对束流位置测量进行归一化校正, 明显改善了长时间位置漂移现象, 并将电子学系统的分辨率提升 3 倍左右。目前该电子学



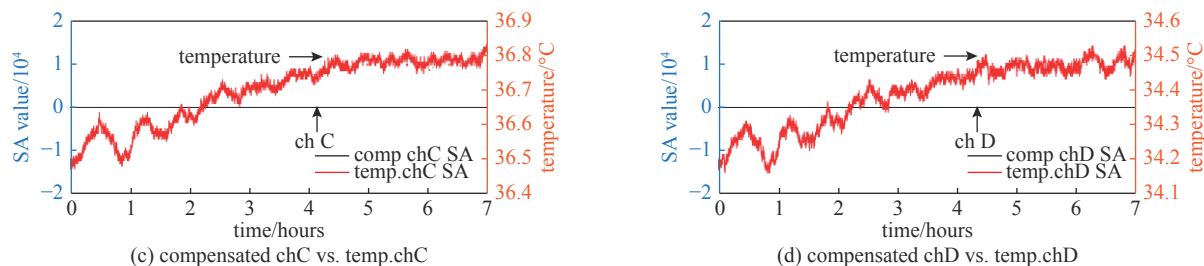


Fig. 16 Test results of normalized channels with temperature

图 16 归一化通道随温度变化测试结果

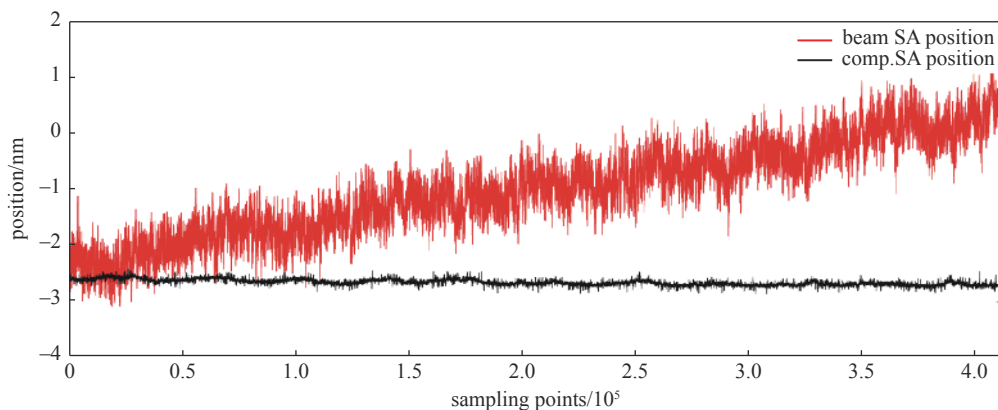


Fig. 17 Test results of long-term stability

图 17 长期稳定性测试结果

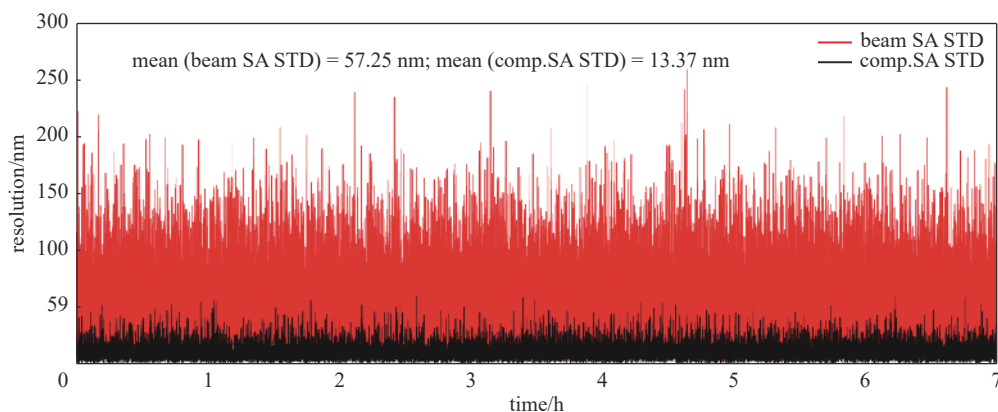


Fig. 18 Test results of real-time resolution

图 18 实时分辨率测试结果

已经通过实验室测试,计划在 BEPC II 储存环中进行在线束流测试。

参考文献:

- [1] 张闯, 马力. 北京正负电子对撞机重大改造工程加速器的设计与研制[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2015. (Zhang Chuang, Ma Li. Design and development of accelerator for Beijing Electron Positron Collider[M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 2015)
- [2] 中国科学院高能物理研究所. HEPS-TF束测系统初步设计报告[R]. 北京: 中国科学院高能物理研究所, 2015. (The Institute of High Energy Physics of the Chinese Academy of Sciences. HEPS-TF beam measurement system preliminary design report[R]. Beijing: The Institute of High Energy Physics of the Chinese Academy of Sciences, 2015)
- [3] 中国科学院高能物理研究所. 北京正负电子对撞机重大改造工程初步设计—直线加速器[R]. IHEP-BEPCII-SB-03-02. (The Institute of High Energy Physics of the Chinese Academy of Sciences. Preliminary design of Beijing Electron-Positron Collider Renovation Project—Linear accelerator[R]. IHEP-

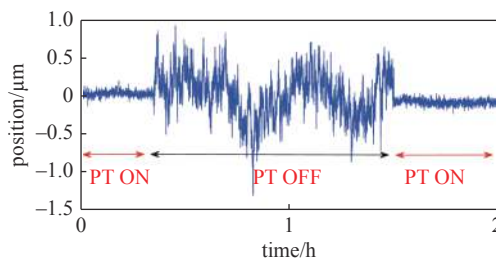


Fig. 19 Test result of pilot tone switch

图 19 导频信号开关测试

BEPCII-SB-03-02)

- [4] 邓庆勇, 曹建社, 叶强, 等. BEPC II 储存环束团流强测量[J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26: 075101. (Deng Qingyong, Cao Jianshe, Ye Qiang, et al. Bunch current measurement system for BEPC II storage ring[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26: 075101)
- [5] Brajnik G, Carrato S, Bassanese S, et al. Pilot tone as a key to improving the spatial resolution of eBPMs[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2016, 1741: 020013.
- [6] 杨静, 杜焱焱, 汪林, 等. BEPC II 直线加速器数字BPM前端调理电路的研制[J]. *强激光与粒子束*, 2021, 33: 054005. (Yang Jing, Du Yaoyao, Wang Lin, et al. Development of digital BPM front-end conditioning circuit for BEPC II linac[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2021, 33: 054005)
- [7] 易星. 加速器束流信号调理及高速采集技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2012. (Yi Xing. Research on accelerator beam signal conditioning and high-speed acquisition technology[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2012)
- [8] Du Yaoyao, Yang Jing, Wang Lin, et al. Design of RF front end of digital BPM for BEPCII[J]. *Radiation Detection Technology and Methods*, 2019, 3: 38.
- [9] Maesaka H, Dewa H. Development status of a stable BPM system for the Spring-8 upgrade[C]//Proceedings of the 5th International Beam Instrumentation Conference. 2016: 322-325.
- [10] 张醒儿, 张琪, 曹建社, 等. 高能同步辐射光源逐束团束流位置测量电子学研制[J]. *原子能科学技术*, 2020, 54(9): 1709-1714. (Zhang Xing'er, Zhang Qi, Cao Jianshe, et al. Development of bunch-by-bunch beam position measurement electronics for high energy photon source[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2020, 54(9): 1709-1714)
- [11] 张鹏. HEPS数字BPM处理器研制[D]. 北京: 中国科学院高能物理研究所, 2016. (Zhang Peng. HEPS digital BPM processor development[D]. Beijing: The Institute of High Energy Physics of the Chinese Academy of Sciences, 2016)
- [12] 张醒儿, 杜焱焱, 张琪, 等. 基于BEPC II数据的数字束流位置测量器算法离线分析[J]. *强激光与粒子束*, 2018, 30: 105103. (Zhang Xing'er, Du Yaoyao, Zhang Qi, et al. Offline research of digital beam position monitor algorithm based on BEPC II [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2018, 30: 105103)
- [13] 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)
- [14] 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)
- [15] 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)
- [16] 刘堇, 张成浩. 机载雷达综合网络射频通道隔离度改进研究[J]. *现代雷达*, 2021, 43(5): 85-89. (Liu Long, Zhang Chenghao. Improvement of RF channel isolation in synthetic network for airborne radar application[J]. *Modern Radar*, 2021, 43(5): 85-89)