

文章编号: 1001-4322(2006)07-1178-05

改进的合肥光源逐束团流强测量方案*

郑 凯, 王筠华, 刘祖平, 李为民, 周泽然, 杨永良, 黄龙君, 陈园博

(中国科学技术大学 国家同步辐射实验室, 合肥 230029)

摘 要: 对于多束团运行的储存环, 逐束团流强的测量是研究注入填充和束流不稳定性阈值等的重要内容。介绍了加速器常用的一些逐束团监测手段, 在此基础上, 利用 HLS(Hefei Light Source) 现有的逐束团测量设备, 并配合相应前端信号处理电路, 进行了 HLS 储存环逐束团流强测量。实验线路方面, 在传统的高频频率倍频信号检波的基础上, 尝试了新的与同步方波信号检波的方法。分别多束团和单束团情况下对 HLS 的束团流强进行了连续检测实验, 对实验结果进行线性拟合, 得到了定标结果, 结果表明系统的 1 阶线性拟合标准偏差均在 1% 左右, 最后对其中非线性部分的物理本质进行了解释。

关键词: 逐束团测量系统; 束流流强; 束团流强; 方波检波

中图分类号: TL506 文献标识码: A

逐束团流强测量是储存环束流监测的重要手段, 特别对于采取 Top-Up 注入方式的加速器来说更是一项不可或缺的技术。我们在 HLS 的 Bunch-by-Bunch(BXB) 测量系统平台上^[1], 对 HLS 的逐束团流强进行了合理的设计和标定。并在该实验的基础上进行了服务于数字 BXB 系统的同步脉冲信号检波的测试。HLS 的基本参数如下: 谐波数为 45, 高频频率为 204.035 MHz, 常规运行方式为满束团填充, 注入流强 250~300 mA。

1 方案调研

在进行 HLS 的逐束团流强测量系统的设计之前, 我们对现有的测量方法进行了调研和分析。

1.1 流强监测器串

较早发展起来的 Bunch-by-Bunch 束团流强测量手段, 仅能分辨时间间隔不小于 80 ns 的相邻束团^[2]。该方案的设计开始采用 Diplexer 降低采样速率, 后接多 ADC 并行处理。为了提高时间分辨率, 采用 ICT(integrating current transformer) 串, 系统原理如图 1 所示, 从现在的技术角度考查该系统, 费用过高, 并且对于电子储存环而言, 束团长度比较小, 而利用 Button 型 BPM (beam position monitor) 上探测到的信号足以表达束团流强信息。

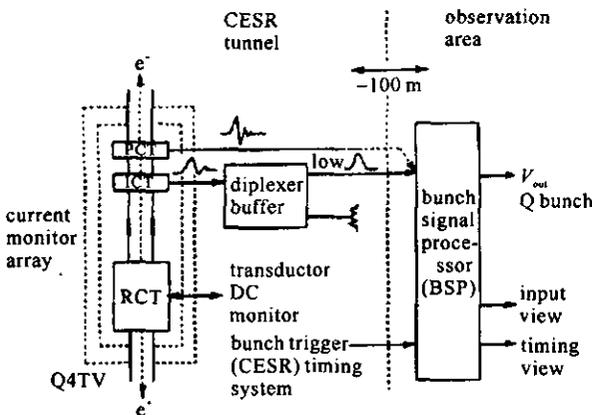


Fig. 1 Cornell bunch current detection system

图 1 Cornell 束团流强测量系统

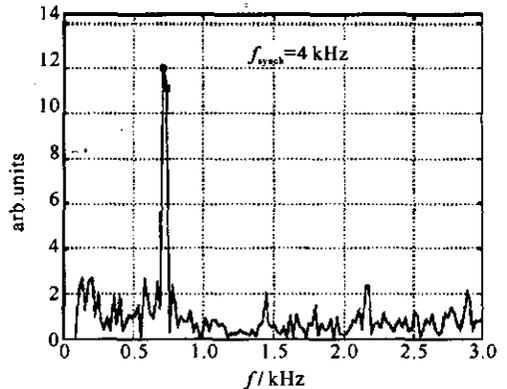


Fig. 2 720 Hz in the spectrum for bunch current detection at SLAC

图 2 SLAC 用于求取束团流强信号的 720 Hz 频谱分量

1.2 测量低频分量

对于运行于 SLAC 的 Bunch-by-Bunch 束团流强探测系统^[3], 研究人员在分析 BXB 探测系统采得的数据

* 收稿日期: 2005-11-18; 修订日期: 2006-03-23

基金项目: 国家自然科学基金资助课题(10175063)

作者简介: 郑 凯(1980—), 男, 在读博士, 从事加速器束流测量、不稳定性 and 反馈技术的研究; kzheng@mail.ustc.edu.cn。

时发现在 360 Hz 和 720 Hz 频率分量处有明显的由速调管引起的频率分量, 频谱如图 2 所示, 该分量的幅度同束团流强之间有着相互对应的关系, 所以可以通过探测每一束团的该频率分量得到该束团流强。但是该方法存在着很大的局限性和偶然性。

1.3 时域分析

采取 Top-Up 注入模式的 KEKB 在实现该方案的时候, 选择读取 BOR (bunch oscillation recorder) 所采集到的束团和信号, 系统如图 3 所示^[4]。在纵向振荡较小的情况下, 该信号在时域上的幅值即代表该束团的流强。但是当纵向振荡(振荡时间长度 τ)比较大时, 由于纵向振荡的调制作用, 所得信号的幅度会受到明显的影响, 因此在分析时需要选取至少 1 个纵向振荡周期的信号。

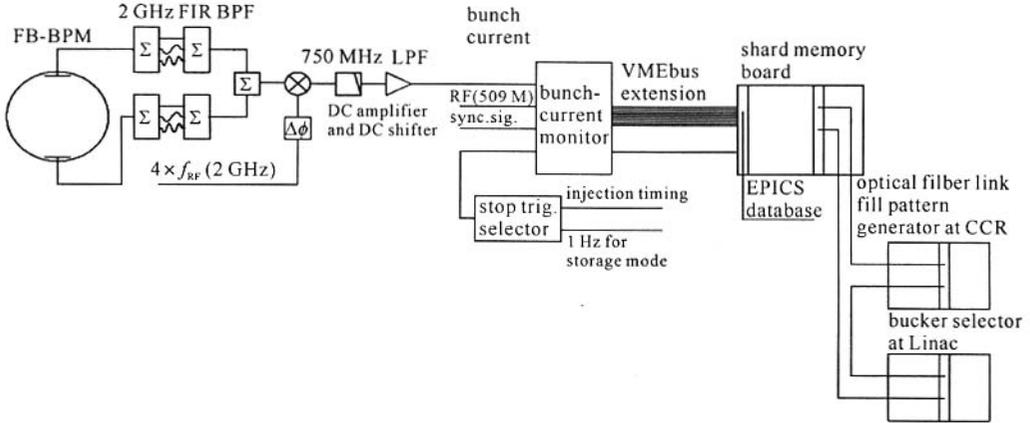


Fig. 3 Bunch current detection system in KEKB

图 3 KEKB 束团流强监测器

1.4 示波器观察

这是一种最简单但不可靠的方法。首先, 对于脉宽只有百 ps 量级的脉冲信号, 需要至少 10 GSPS (giga sampling per second) 的采样率才能较好地恢复, 很不合理。其次当束团的纵向振荡比较剧烈的时候, 简单的时域观测无法真实地反应束团的流强情况。再次, 利用这样的监测设备, 无法将所观察到的束团流强信号应用于其他设备中, 例如 Top-Up 注入这样的工程项目。

2 HLS 逐束团流强测量方案选取

无论是测量信号的低频分量还是做时域平均, 都是基于 BXB 系统采集束团脉冲信号的幅值。在电子储存环中, 从 Button 型 BPM 的 4 个拾取电极上面所采得束团和信号的大小同束团的电荷量之间存在很好的线性关系。在 HLS BXB 横向探测系统^[5]的基础上, 我们选择从前端 Hybrids 输出的和信号作为代测信号, 经过 3 阶梳状带通滤波器, 与 3 倍高频正弦信号进行混频运算, 下变频后的信号送往低通滤波器, 最后将该低通后信号送往 ADC (analog digital convertor), 通过对 3 倍高频正弦信号的相位调整, 使低通后信号输出为正且幅值最大, 图 4 表示 HLS BXB 束团流强探测系统。

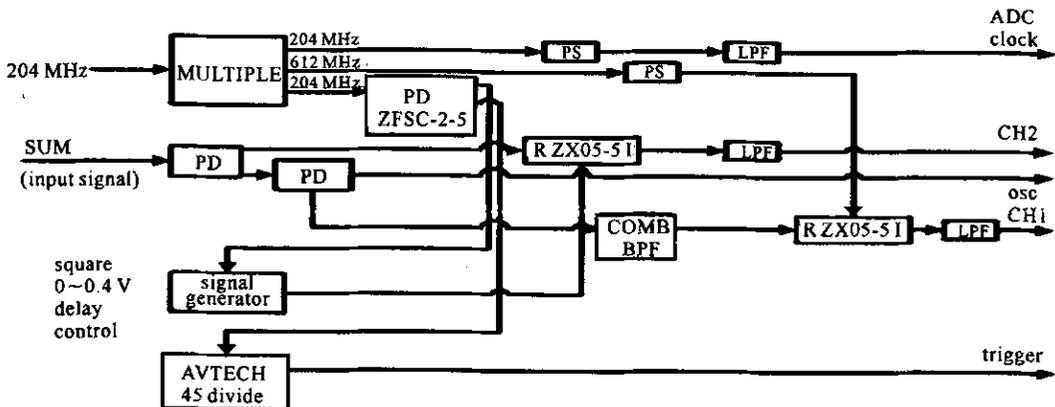


Fig. 4 Bunch current detection system in HLS

图 4 HLS 束团流强信号监测方案

2.1 新的检波方案的应用

在该系统的设计当中,应用一种新的脉冲信号检波方式^[6]。频率为 RF 的方波信号替代了 RF 倍频正弦波信号。其工作原理如图 5 所示,实际应用效果如图 6 所示,分别为图 4 的输入信号和 CH2 的低通前信号,上下两路信号在时间上并未严格对应,该处不便进行幅度比较。该检波方案可以提供廉价的模拟 Diplexer 方式,将信号分路送往 ADC,可有效地降低数字式 BXB 的成本,是 BXB 系统升级的一项关键技术。

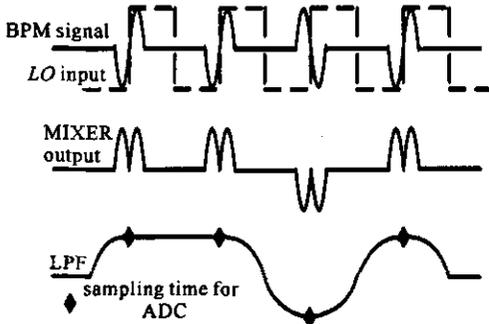


Fig. 5 Theory of demodulation by pulse signal

图 5 脉冲信号检波原理示意图

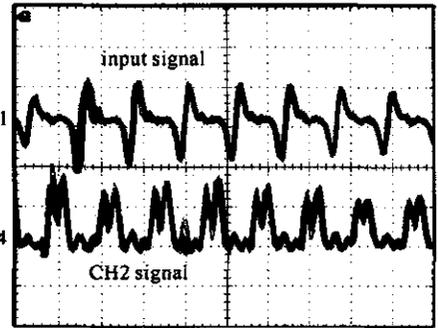


Fig. 6 Effect of demodulation by pulse signal

图 6 脉冲信号方波检波效果

2.2 测量系统的准确性验证

为了比较不同方法的准确性,在该实验的设计中,从 hybrid 送来的束流和信号^[4]分为 3 路,分别送往示波器,正弦波检波电路(图 4 中 CH1)和方波检波电路(图 4 中 CH2)。

将从示波器读取的束团和信号同 ADC 的两个通道(图 4 中通道 CH1 和 CH2)采得的数据相比较,曲线吻合很好。说明这两套系统均可以正确地探测束团和信号。图 7、图 8 为实验探测结果,其中,图 7 为示波器读取的束团和信号,由三幅图片合并而成;图 8 为 ADC 探测的束团和信号,其中 CH1 为正弦波检波结果,CH2 为方波检波结果。图 9 为 ADC 的检波结果的均方误差,该误差主要由不同束团纵向振荡幅度引起的。由图 8 和图 9 可见,正弦波检波和方波检波得到的结果并无太大的区别。其幅度上的差别是为了便于区分而调整 DBM(double balance mixer)的 LO 输入端的信号幅度所致。

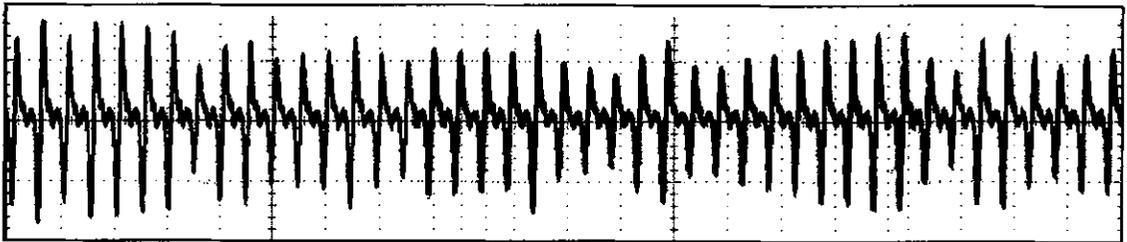


Fig. 7 Sum signal detected by oscilloscope

图 7 示波器探测的束团和信号

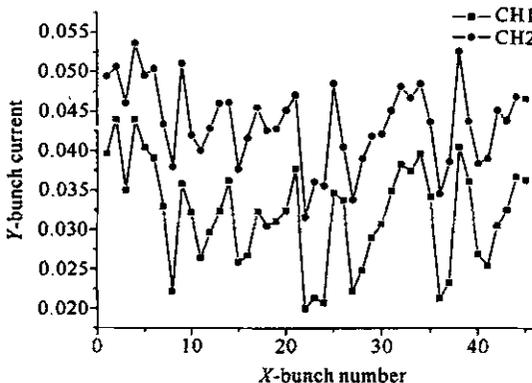


Fig. 8 Sum signal detected by ADC

图 8 ADC 探测得到的束团和信号

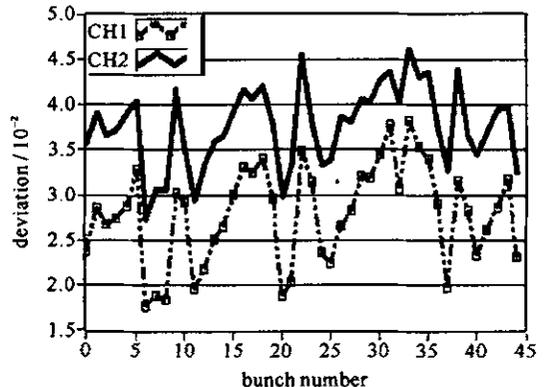


Fig. 9 Deviation of sum signal detected by ADC

图 9 ADC 探测的束团和信号的方差

3 HLS 逐束团流强测量系统定标

为了得到更为可信并且实用的结果,并且把测得的束团流强信号同束团实际流强对应起来,以方便在 HLS 的实际应用,我们把这套系统测量得到的数据同 DCCT(direct current current transformer) 采得的数据相比较来进行系统的定标。

3.1 多束团测量

在机器正常运行的情况下,每 5min 记录长度为 9 K 的 ADC 采样数据,所得值同从 DCCT 服务器读取的总流强信息的关系如图 10 所示。实际探测得到的信号幅度大小同输入信号幅度以及检波信号输入幅度都有关。图 10(b)中时域(TD)平均求和结果和频域(FD)求和结果皆表现出很好的线性关系,两个通道的时域和频域曲线基本重合,图中难以辨析。将不同时间所采集的数据进行比较,如图 10(a),(b)所示,两图中对应通道信号的曲线表现出很好的一致性。

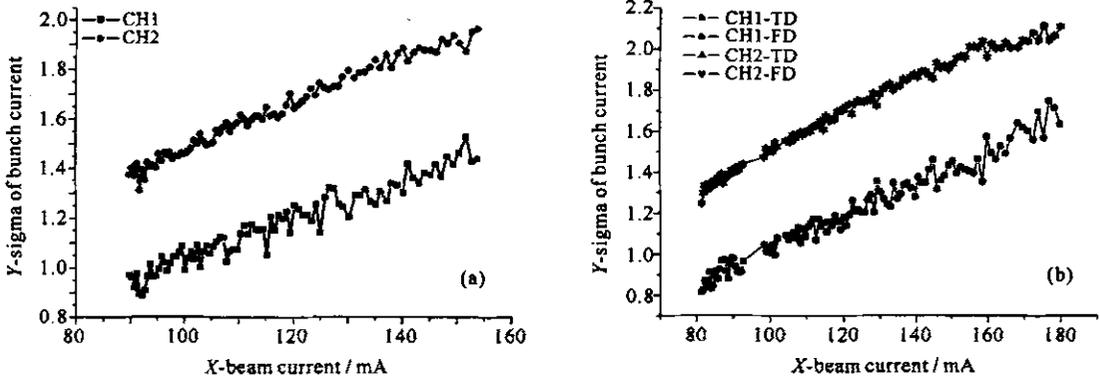


Fig. 10 Measurement results in time domain on 2005-10-31 (a) and in time and frequency frequency on 2005-11-01 (b)

图 10 2005-10-31 的时域测量结果(a)和 2005-11-01 的时域、频域分析结果(b)

3.2 单束团定标

为了排除多束团之间可能存在的耦合影响和判断电子学系统的本底噪声大小,我们选择在单束团情况下用 270 组采样数据进行定标,定标结果如图 11(a),(b)所示。

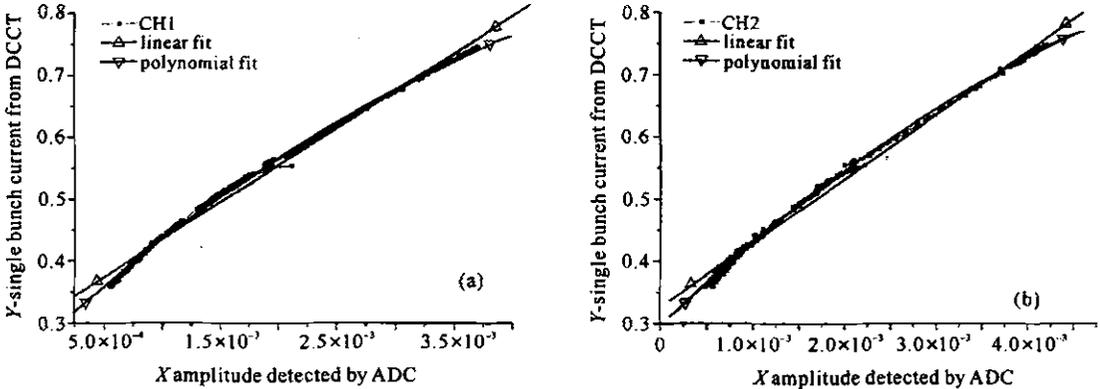


Fig. 11 Single bunch detection in CH1 (a) and CH2 (b) on 2005-11-07

图 11 2005-11-07 的 CH1(a)和 CH2(b)单束团测量结果

利用 origin 程序对数据进行 1 阶和 2 阶拟合,结果如表 1 所示,其中参数 A, B_1, B_2, R, SD 均为 origin 标准^[7]。

表 1 单束团情况下 ADC 测量数据同 DCCT 探测数据拟合结果

Table 1 Fit results of ADC data and DCCT data in single bunch operation

		A	error	B_1	error	B_2	error	R	SD
CH1	linear fit	0.313 32	0.001 32	119.96	0.655 5	—	—	0.996 02	0.011 19
	polynomial fit	0.275 03	0.001 28	170.81	1.544 0	-12 180	363.40	0.998 48	0.004 91
CH2	linear fit	0.325 66	0.001 20	102.85	0.536 2	—	—	0.996 38	0.010 68
	polynomial fit	0.294 56	0.001 07	141.81	1.191 9	-8 435.5	252.94	0.998 60	0.004 71

1 阶线性拟合的均方差为 1% 左右, 2 阶拟合的均方差小于 0.5%, 测得的束团幅值与由 DCCT 读取的束团流强存在很好的线性关系。单束团小流强情况下, 束团长度伸长。由于纽扣型束流位置监测器探测的是束流信号的微分形式, 所以束团长度伸长时, 和信号的峰值减小, 测量所得曲线必然向下弯曲, 该现象如实地反映在测量结果中。

4 结 论

在 HLS 的逐束团流强测量实验中, 利用方波检波处理高频脉冲信号的方法, 比较了正弦波和方波两种不同的检波方式在时域和频域下的分析结果。在多束团和单束团运行情况下对系统做了定标实验, 测试结果表明系统的 1 阶线性拟合标准偏差均在 1% 左右, 并对单束团小流强情况下曲线出现的弯转给出了物理解释。系统的设计达到了预期的目标, 能够有效地探测任一束团流强。

致 谢 感谢机器运行部赵枫、周伟伟等老师的大力协助, 特别感谢黄贵荣老师以及 KEKB 的 E. Kikutani 给予的讨论和帮助。

参考文献:

- [1] 王筠华, 刘建宏, 郑凯, 等. HLS 逐束团测量和横向束流反馈系统设计[J], 强激与粒子束, 2006, 18(2):291-296. (Wang J H, Liu J H, Zheng K, et al. Design of bunch by bunch measuring and transverse feedback system at HLS. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(2):291-296)
- [2] Dunnam C R, Unser K B. Fast bunch-to-bunch current sampling in the Cornell Electron-Position Collider[C]//Particle Accelerator Conference. Washington D C, 1993:2394-2396.
- [3] Prabhakar S, Fox J, Hindi H, et al. Calculation of impedance from multibunch synchronous phase: theory and experimental results[C]//Euro Particle Accelerator Conference. Stockholm City, 1998:996-998.
- [4] Tobiyama M, Kikutani E, Flanagan J W, et al. Beam diagnostic using bunch-by-bunch feedback system in the KEKB rings[C]//Asian Particle Accelerator Conference. Beijing, 2001:752-754.
- [5] 郑凯, 王筠华, 刘建宏, 等. HLS 逐束团跟踪监测系统[J]. 高能物理与核物理, 2006, 30(6):577-581. (Zheng K, Wang J H, Liu J H, et al. Bunch-by-bunch tracing measurement system in HLS. *High Energy Physics and Nuclear Physics*, 2006, 30(6):577-581)
- [6] Nakamura T, Date S, Kobayashi K, et al. Transverse bunch-by-bunch feedback system for the Spring-8 Storage Ring[C]//Euro Particle Accelerator Conference. Lucerne, Switzerland, 2004:2649-2651.
- [7] Originlab corporation. Origin[CP]. 2002.

Improvement of bunch-by-bunch beam current detection system in Hefei light source

ZHENG Kai, WANG Jun-hua, LIU Zu-ping, LI Wei-min, ZHOU Ze-ran,
YANG Yong-liang, HUANG Long-jun, CHEN Yuan-bo

(National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China,
P. O. Box 6022, Hefei 230029, China)

Abstract: Bunch-by-bunch beam current detection system is an important facility in the multibunch storage ring. In this paper, the established bunch-by-bunch beam current detection systems for the accelerator such as Cornell, SLAC and KEKB were compared and studied. The design of the bunch-by-bunch beam current detection system for HLS, which was based on the bunch-by-bunch tracing measurement system in HLS was given. Both demodulation by sine wave and square were applied in this paper, the deviation of the detect system was determined by the longitudinal oscillation. Compared the data acquired form ADC with the data from DCCT, the ADC data was scaled by the bunch current. The standard deviations of linear fit were about 1%, and the standard deviations of polynomial fit were less than 0.5% in both sine wave and square wave demodulation. Some analysis of the measurement results also had been shown in this paper.

Key words: Bunch-by-bunch detection system; Bunch current; Beam current; Square-wave demodulation