

HLS横向反馈系统研制中的关键技术*

王筠华^{1,1)} 郑凯¹ 李为民¹ 杨永良¹ 刘祖平¹ 周泽然¹ 王琳¹ 孙葆根¹
陈圆博¹ 黄龙君¹ 马力² 曹建社² 岳军会² 刘德康³ 叶恺容³

1(中国科学技术大学国家同步辐射实验室 合肥 230029)

2(中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

3(中国科学院上海应用物理研究所 上海 201800)

摘要 较为全面地介绍了合肥光源横向模拟反馈系统研制过程中,所涉及的部分关键问题,如矢量运算模块的开发,Notch滤波器研制,基于Hilbert变换进行相空间重建、模式分析,反馈Kicker腔的研制。

关键词 横向反馈系统 矢量计算 相干滤波器 希尔伯特变换

1 引言

高能加速器储存环中,来源于高频腔高次模(HOM)和电阻壁阻抗等所引起的耦合束团不稳定性已成为妨碍储存环改(建)造调试达标和性能提高的一个非常重要的因素。逐束团测量和束流反馈系统是近十年来新建或改造的大型加速器普遍采用的技术,如PEP-II, KEKB, DAΦNE, ALS, PLS, BESSYII, SLS, ELETTRA等^[1, 2]。因为,利用该系统可以方便地测量

到束流二极振荡的增长或阻尼时间,并可以通过束流运动,研究环上阻抗分布情况等。HLS逐束团测量和模拟横向反馈系统线路图和系统指标可分别参考^[3, 4]。

2 矢量运算单元

反馈系统的关键在于为束流提供一个合适的反馈力,该反馈力应该同反馈点的束流信号成 $\pi/2$ 的相位差。使用双BPM系统进行矢量运算原理如下:

$$x_1 + x_2 = a_1 \sqrt{\beta_1} \sin(\varphi_1(s)) + a_2 \sqrt{\beta_2} \sin(\varphi_1(s) + \varphi_0) = [(a_1 \sqrt{\beta_1} + a_2 \sqrt{\beta_2} \cos \varphi_0)^2 + (a_2 \sqrt{\beta_2} \sin \varphi_0)^2]^{1/2} \sin(\varphi_1(s) + \Delta \varphi), \quad (1)$$

$$\Delta \varphi = \tan^{-1} [a_2 \sqrt{\beta_2} \sin \varphi_0 / (a_1 \sqrt{\beta_1} + a_2 \sqrt{\beta_2} \cos \varphi_0)]. \quad (2)$$

两个BPM探测的信号分别加以 a_1 和 a_2 的衰减后相加。相移的大小由公式(2)表示。矢量运算单元需要提供计算机远控衰减调节,调试时很复杂,调节范围小。为此,我们利用压控混频器提供衰减的方法,在不

改变硬件电路前提下实现反馈相位 360° 调整,即可以随意对束流进行反馈或激励。如稳定激励某一特定耦合振荡模式(图1(a)),配合适当的反馈相位驱动反馈设备,耦合振荡模式得以抑制(图1(b));如将反馈相位反相,从频谱上观测到不仅原先的模式振荡幅度进一步增长,而且先前稳定的耦合振荡模式也出现了(图1(c))^[5]。

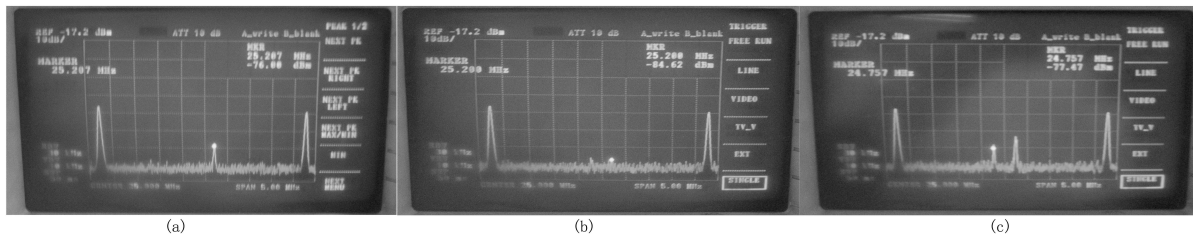


图1 反馈实验中束流频谱变化 (a) 激励束流频谱; (b) 反馈束流频谱; (c) 反相反馈束流频谱

2008-01-07 收稿

* 国家自然科学基金(10175063)和国家自然科学基金重点基金(10535040)资助

1) E-mail: wjhua@ustc.edu.cn

3 Notch Filter 单元

经过矢量计算的输出信号中, 回旋频率占据了主要分量, 此信号会引起送往终极放大器饱和, 所以需要 Notch 滤波器, 来滤除该信号中的回旋频率及其谐波分量, 节约反馈功率. 滤波原理和函数见图 2.

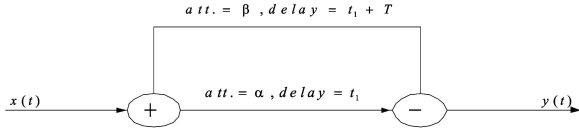


图 2 Correlator 滤波器原理示意图

输出信号为

$$y(t) = \alpha x(t - t_1) - \beta x(t - (t_1 + T)), \quad (3)$$

T 即为回旋时间, 传输函数为

$$|H(\omega)| = |y(\omega)/x(\omega)| = [\alpha^2 + \beta^2 - 2\alpha\beta \cos(\omega T)]^{1/2}, \quad (4)$$

滤波深度为

$$R = -20 \log[|H(\omega)|_{\max}/|H(\omega)|_{\min}] = 20 \log[(\alpha + \beta)/(\alpha - \beta)], \quad (5)$$

其中 α 和 β 为两路的衰减因子. 利用了两根不同长度和不同种类电缆, 形成时延为一圈 (220ns) 的梳状滤波器, 来实现对旋转频率进行抑制, 其幅频特性如图 3 所示. 从图中可以看出, 虽然最佳滤波深度可达 44dB, 但是明显滤波深度同频率变化相关. 为解决该问题, 我们选择传输衰减同模拟信号频率不相关的延时途径—光纤, 进而彻底解决频域内可能出现的不平衡的现象. 我们与美国加州弗里蒙特 YY 实验室合作研发的光纤滤波器 (Optical FIR Filter) 的实测结果如图 4 所示. 该滤波器具有体积小, 带宽宽 (高达 1GHz), 频域响应稳定的特点^[6], 对于大型储存环的模拟反馈系统相当适用.

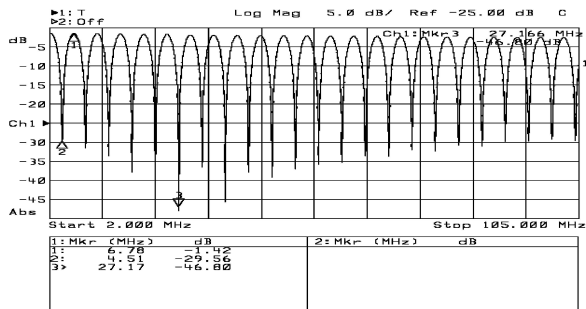


图 3 电缆延时滤波器的幅频响应

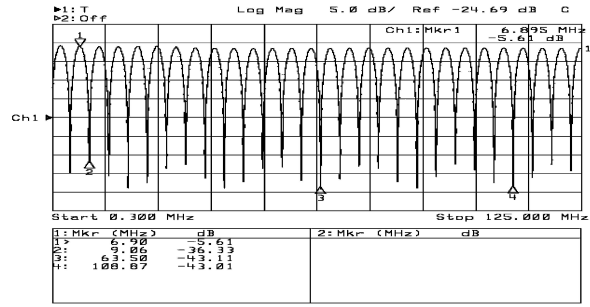


图 4 光纤延时滤波器的幅频响应

4 基于 Hilbert 变换的数据处理方法

为了能够全面深入的了解束团振荡信号所传达的信息, 利用基于 Hilbert 变换的相空间重建理论分析问题的方法^[7], 用一种时域非平均的方式, 从多束团的角度出发全方位的观察束团振荡. 图 5 为扫频激励束流, 图 6 和图 7 示出了, 利用该方法连续追踪束团相位的变化和束团振荡模式等, 其时域精确度和频域精确度远好于以往的任何方法.

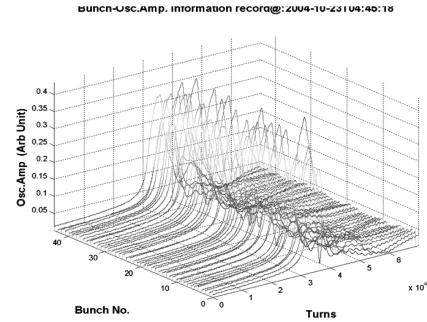


图 5 利用 10ms 单门扫频激励束流

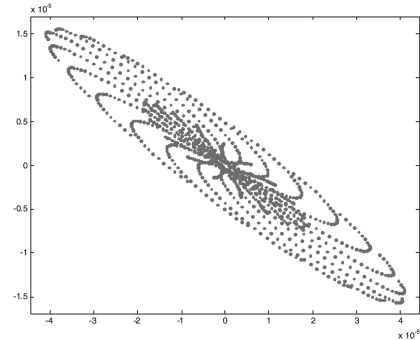


图 6 束团的相空间图像

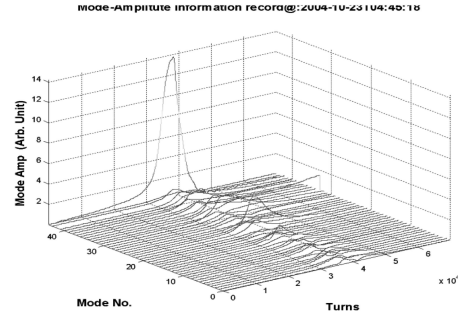


图 7 模式振荡追踪

5 新的反馈 Kicker 腔的研制

由于 HLS 储存环只有 66m 周长, 只能提供设计一个 20cm 条带空间, 参考 SPring8 短条带的设计^[8]

$$E \times T \times \frac{1}{\tau} \times \Delta = C' \times F_k \times L \times \sqrt{\beta} = C \times \sqrt{P} \times L \times \sqrt{\beta}. \quad (6)$$

左边: 所需要的 Kick 量; 右边: 是可能提供的 Kick 量. E: Energy; T: kick rate (that as Revolution period); τ : Damping time by feedback; P: Power of amplifier; β : Beta function at kicker; L: kicker length.

该 Kicker 是有 4 条 45° 倾斜安装在真空管道的 Stripline 电极组成的. 该 kicker 腔体是采用不锈钢制造, 其内表面和条带的外表面镀铜. Stripline 电极的厚度为 2mm, 张角为 60°.

参考文献(References)

- 1 Cappel R, Metral E, Mohl D et al. Transverse Coherent Instabilities In the Presence Of Linear Coupling[A], EPAC'2000[C]
- 2 GAO J. Theory of Single Bunch Transverse Collective Instabilities in Electron Storage Ring[A], EPAC'97[C], 1997
- 3 WANG Jun-Hua, LIU Jiang-Hong, ZHENG Kai et al. High Power Laser and Particle Beams, 2006, **18**(2): 291—296 (in Chinese)
(王筠华, 刘建宏, 郑凯等. 强激光与粒子束, 2006, **18**(2): 291—296)
- 4 WANG J H, ZHENG Kai, LI W M et al. Development of Transverse Feedback System and Instabilities Suppress at HLS, PAC07, USA, 2007.6
- 5 ZHENG Kai. Bunch-by-Bunch Measurement and Feedback System on Transverse Analog in HLS, Thesis for Doctor Degree of University of Science and Technology of China, 2007.6, Hefei (in Chinese)
(郑凯. 合肥光源逐束团测量和横向模拟反馈系统, 中国科学技术大学博士论文, 2007,6, 合肥)
- 6 ZHENG Kai, WANG JunHua, LIU Zu-Ping et al. HEP & NP, 2007, **31**(3): 307 (in Chinese)
(郑凯, 王筠华, 刘祖平等. 高能物理与核物理, 2007, **31**(3): 307)
- 7 YIN Yan, WANG J H et al. Optical-Fiber Two-Tap FIR Filter for Storage Ring Transverse Feedback System, PAC07, USA, 2007.6
- 8 WANG J H, Nakamura T. Private Communications

Key Technologies in Transverse Feedback System of Bunch by Bunch at HLS^{*}

WANG Jun-Hua^{1;1)} ZHENG Kai¹ LI Wei-Min¹ YANG Yong-Liang¹ LIU Zu-Ping¹
ZHOU Ze-Ran¹ WANG Lin¹ SUN Bao-Gen¹ CHEN Yuan-Bo¹ HUANG Long-Jun¹
MA Li² CAO Jian-She² YUE Jun-Hui² LIU De-Kang³ YE Kai-Rong³

1 (National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230029, China)

2 (Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100049, China)

3 (Shanghai Institute of Applied physics, CAS, Shanghai 201800, China)

Abstract In this paper, we introduce the most key points during the implementation of Bunch-by-Bunch transverse feedback system of HLS (Hefei Light Source), such as the vector computation, the notch filter development, the data processing, the phase space reconstruction method based on Hilbert transform, the mode analysis, and the development of feedback kicker cavity.

Key words transverse feedback system, vector compute, notch filter, hilbert transform

Received 7 January 2008

* Supported by NSFC (10175063, 10535040)

1) E-mail: wjhua@ustc.edu.cn