

# 合肥光源逐束团测量和横向反馈系统 及初步反馈效果实验\*

王筠华, 郑凯, 刘建宏, 李为民, 刘祖平, 杨永良,  
周泽然, 王琳, 孙葆根, 陈园博, 黄龙君

(中国科学技术大学国家同步辐射实验室, 安徽合肥 230029)

**摘要:**合肥光源逐束团测量和横向反馈系统不仅可以完成合肥光源逐束团的横向振荡、流强测量、纵向振荡和常规反馈任务,同时还开发了对多束团储存环中指定束团的激励,以及形成单束团和不同数量的束团串等附加功能.介绍了该系统研制中所涉及的部分关键问题,如矢量运算模块的开发、梳状(notch)滤波器研制、数据处理程序的开发和应用,并给出了相空间重建、模式分析和带束流反馈实验的初步结果.

**关键词:**横向反馈系统;矢量计算;梳状滤波器;希尔伯特变换

**中图分类号:**TL506 **文献标识码:**A

## HLS bunch-by-bunch measurement, transverse feedback system and primary experiment results

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

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

**Abstract:** The HLS (Hefei light source) bunch-by-bunch measurement system and transverse feedback system were developed to provide transverse betatron oscillation detection, bunch current detection, longitudinal phase detection and transverse feedback, and some other functions were also developed as designated bunch exciting and knock-out. Most of the key points during the implementation of the system were discussed, such as vector computing, notch filter developing and data processing. Some experimental results were given, such as reliability test, phase space reconstruction, mode analysis, and feedback primary commission results with beam.

**Key words:** transverse feedback system; vector compute; notch filter; Hilbert transform

## 0 引言

在 高能 加速 器 储 存 环 中, 来 源 于 高 频 腔 高 次 模 (high order modes, HOM) 和 电 阻 壁 阻 抗 等 因 素 所 引 起 的 耦 合 束 团 (coupled-bunch, CB) 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 因 素. 测 量 和 抑 制 不 稳 定 性 模, 克 服 CB 不 稳 定 性, 已 成 为 世 界 各 大 加 速 器 实 验 室 重 点 研 究 课 题 之 一. 逐 束 团 反 馈 系 统 是 近 10 年 来 世 界 上 新 建 或 改 造 加 速 器 装 置 中 均 采 用 的 一 种 最 现 实 和 有 效 的 阻

\* 收稿日期:2006-12-25;修回日期:2007-03-20

基金项目:国家自然科学基金重点项目(10535040),国家自然科学基金(10175063)和国家三部委 15211 工程资助.

作者简介:王筠华(通讯作者),女,1944年生,研究员.研究方向:束流仪器与诊断. E-mail: wjhua@ustc.edu.cn; Tel: 0551-3602050

束团耦合束团不稳定性方法,如 PEP-II, KEKB, ALS, PLS, BESSY II 等<sup>[1~6]</sup>.

合肥光源(HLS)、北京正负电子对撞机重大改造工程(BEPC II)和上海光源(SSRF)三大粒子加速器都将在多束团、高流强下运行,所以对 CB 不稳定性的研究和抑制是 3 家实验室共同关心的重点问题.本文较系统地介绍了在合肥光源上研制的一套横向(X、Y 方向)高频、宽带逐束团(bunch-by-bunch, BxB)测量和横向反馈系统实验装置,以期研究和最终抑制 CB 集体不稳定性.合肥光源环参数见表 1.

表 1 合肥光源环参数

Tab. 1 Parameter of storage ring of HLS

能量, $E/\text{MeV}$	800
周长, $C/\text{m}$	66
总流强, $I_0/\text{mA}$	300
回旋频率, $f_0/\text{MHz}$	4.533
高频频率, $f_{\text{RF}}/\text{MHz}$	204.035
高频谐波数, $h$	45
振荡频率, $\nu_x/\nu_y/\nu_s$	3.57/2.61/0.026
辐射阻尼时间, $(\tau_x/\tau_y/\tau_s)/\text{ms}$	21.15/21.65/10.95
注入阻尼时间, $\tau_I/\text{s}$	1.38
最小束团间距, $s_b/\text{m}$	1.5
横向振荡最大振幅, $\Delta x/\text{mm}$	1
自然束团长度, $\sigma_s/\text{cm}$	3.8

HLS 电子储存环是专用的同步辐射装置.电子以 200 MeV 注入储存环,在 800 MeV, 100~300 mA 流强下运行.储存环周长为 66 m.用以探测束流位置信号的钮扣电极,4 个一组以斜 45°安装在真空室内<sup>[7]</sup>.HLS 采用多圈多次全束团注入(即 45 个束团满填充)方式.机器具备 3 种正常工作状态:注入过程、无扭摆磁铁和有扭摆磁铁正常供光状态.

## 1 系统设计思想

为了克服 HLS 储存环上的 CB 不稳定性,考虑到 HLS 储存环周长较短,我们利用两组 BPM 信号,研制了一套逐束团测量和横向逐束团反馈系统(BxB 测量系统是模拟横向反馈系统不可分割的一部分).逐束团监测(横向位置、纵向相位和束团流强测量)由 RF 前端检测单元,高速、宽带信号处理单元和数据获取单元等组成.在获得正确信息的基础上,加上激励单元(由宽带功率放大器和条带激励器(stripline-kicker)等组成),进行逐束团横向反馈抑制 CB 不稳定性模<sup>[8,9]</sup>.BxB 反馈控制原理,是通过

探测束团质心振荡信号,经过适当的电子学处理,再以适当方式作用于同一个束团,起到抑制该束团质心振荡的作用.同时它也能阻尼注入过程中束团瞬时大幅度振荡和光电子不稳定性.这样提高了储存流强和束流品质,保证光源高亮度稳定运行. BxB 测量和横向反馈系统线路框图见图 1.

图 1 线路的原理:前端采用两组 pick-up 信号,目的是可通过调节衰减器( $a_1/a_2$ ,  $b_1/b_2$ )(C),进而控制相位的延迟,保证 pick-up 和 kicker 相位差  $\pi/2$ ;利用 hybrid 对四路电极信号做加减运算,得到 X 和 Y 方向上的束流位置振荡信号(A);通过梳状带通滤波器(B)后与倍频(E)进行混频(DBM),然后通过低通滤波器(LPF)得到带宽为 100 MHz 束流低频振荡信号.梳状滤波器,将使束流频谱集中在 3、6 倍 RF 频率范围内,可得到高的信噪比和检测灵敏度,但需低于真空管道截止频率(2.044 GHz);利用 notch 滤除 DC 回旋频率,节约反馈功率(I);精密可编程部件(program delay)(H),通过反馈信号控制模块(F),调节 pick-up 和 kicker 之间 ps 级精密时延,以保证反馈信号真正作用到对应束团上.

逐束团测量系统只用到横向反馈系统前面一组 BPM pick-up 信号.其中横向位置和纵向相位监测是采用同一个数字化仪进行数据采集(G).纵向相位靠鉴相电路提取.纵向相位和束团流强测量是利用一组 BPM pick-up 的和信号来完成(D).

## 2 逐束团测量系统

### 2.1 梳状(notch)滤波器

在束团很窄(100 ps 量级)时,LC 滤波器已经不能满足要求,我们选择既经济又简单的电路,该电路由功分器/结合器+延时电缆构成,各电缆之间的延时差为与中心频率对应的周期的倍数.时域输出为一串脉冲,频域相当于带通.图 2 是采用 RG223 cable 自制的 3-tap 滤波器幅频和相频响应曲线(与 4-tap 雷同).

与 LC 滤波器相比,FIR 虽然对带通之外的频谱成分抑制不太好,但可以保证严格的线性相位频响,这个带通范围内信号不会发生畸变,所以多数人倾向于使用这种滤波.在我们的方案中,横向使用 3-tap 滤波(612 MHz),纵向使用 4-tap 滤波(1.2 GHz).

### 2.2 高速度数据获取系统

高速数据获取系统将完成逐束团采样,进而研

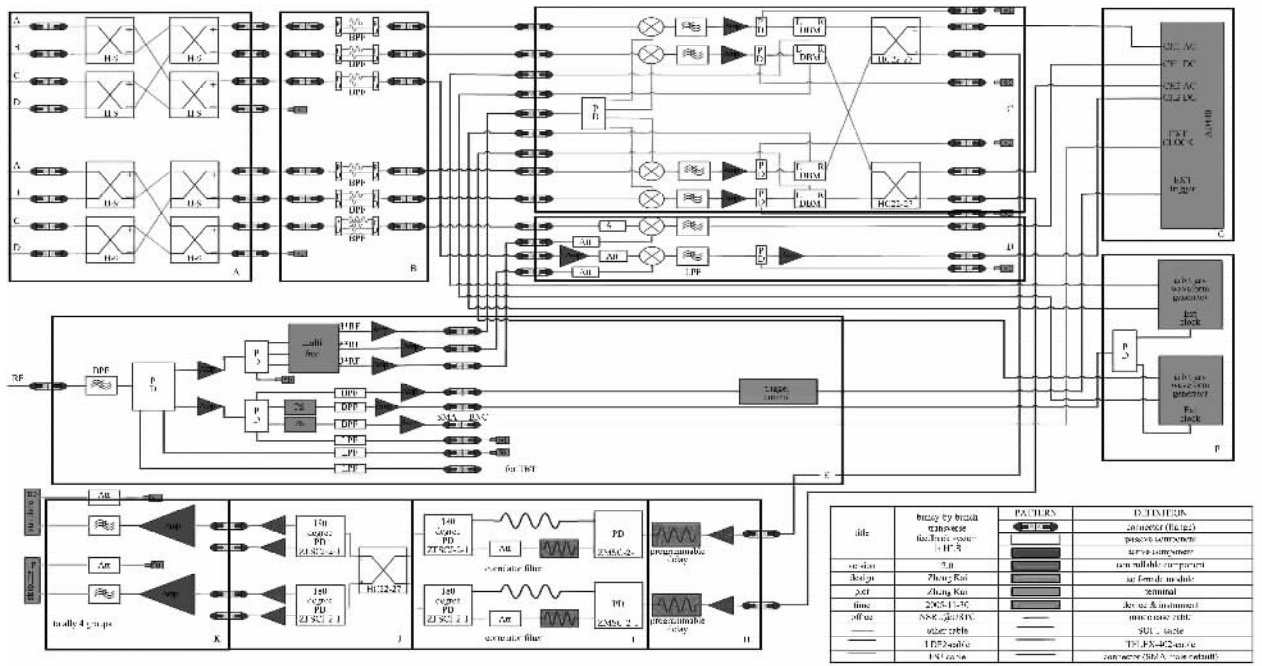


图 1 HLS BxB 测量和横向反馈系统设计框图

Fig. 1 Sketch for HLS BxB measurement and feedback system

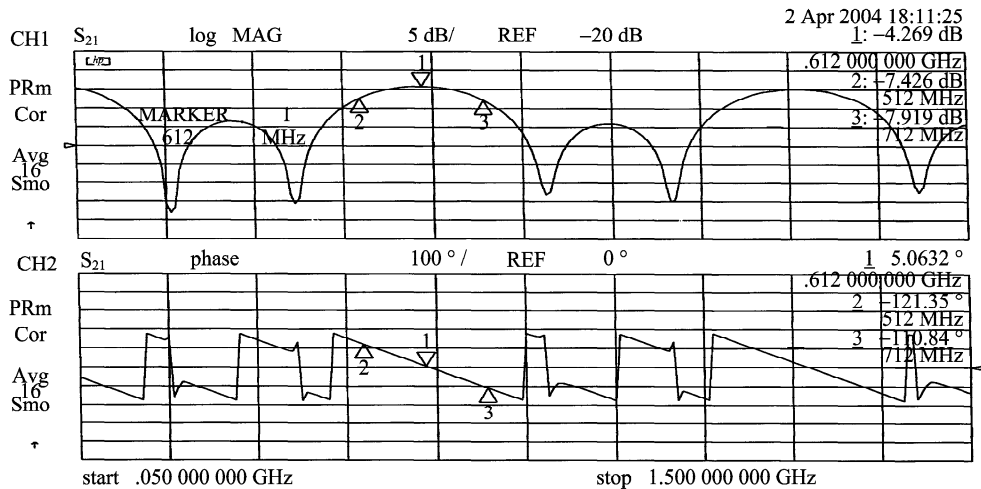


图 2 实测自制 3-tap 滤波器幅频和相频响应曲线

Fig. 2 Respond curve of amplitude and phase frequency for 3-tap filter developed by home

究机器运行过程中出现的束流各种不稳定性. 该系统的核心是基于 PXI 技术的数字转换器 (digitizer). 它用从高频机分出的高频信号作为时钟信号, 逐个束团进行采样. 对获取的数据进行离线分析, 作为机器研究的一种有效的手段.

考虑到兼容性和为日后开发模块提供较大的空间, 我们选择了德国 MEN 公司的 6U, 14 槽的 PXI 机箱, 并选择由 Acqiris 公司新近生产的 PXI 6U, DC440 数字化仪. 该数字化仪最高达 400 MSPS, 12

bit 分辨率, 4 MB 的内存 (memory), 足以记录下一次完整的纵向振荡的信息.

### 2.3 逐束团测量系统的运用

#### 2.3.1 束流不稳定性测量

利用初步建立的逐束团测量系统, 对 HLS 储存环进行激励和运行状态下测量, 获得的几个典型图形如图 3~图 6 所示.

#### 2.3.2 束团流强测量

为了得到更为可信、实用的结果, 并且把 BxB

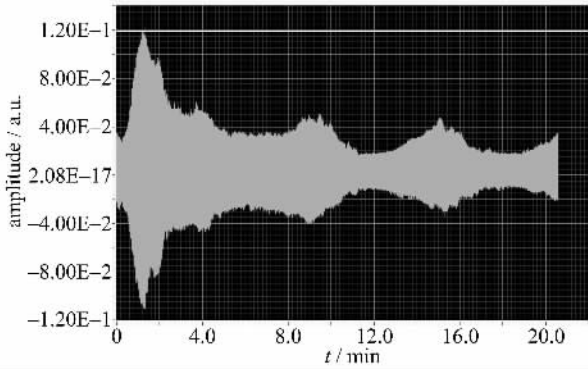


图 3 激励和撤除后长时间纪录显示出现的相干不稳定性振荡

Fig. 3 Coherent instability oscillation appeared after removing excitation

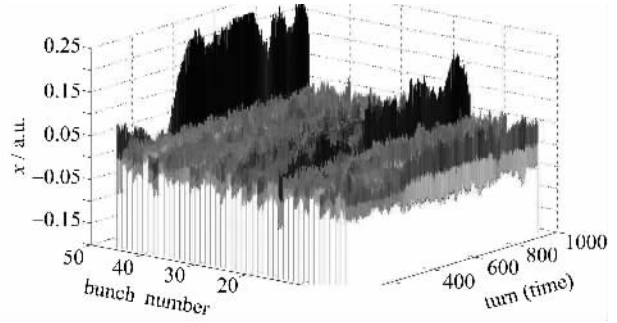


图 5 45 个束团随着时间横向振荡

Fig. 5 Transverse oscillation of 45 bunches

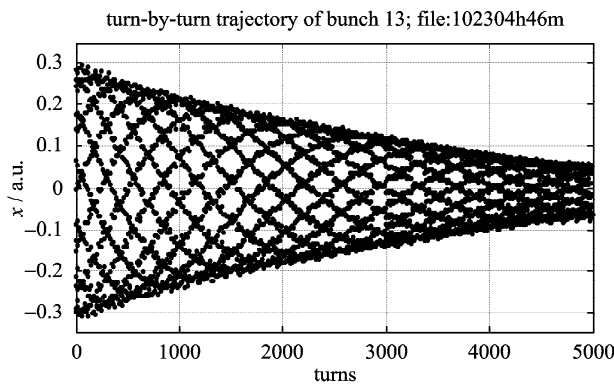


图 4 激励和撤除后的横向振荡随时间衰减

Fig. 4 Transverse oscillation after removing excitation

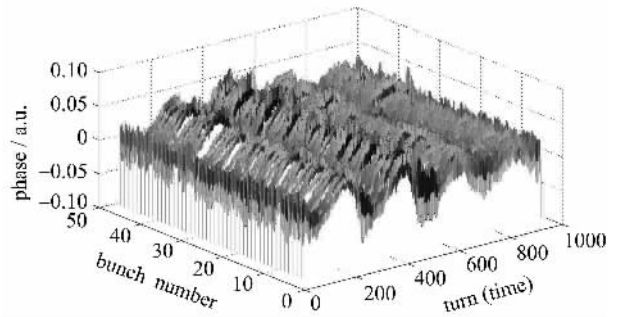


图 6 检相测量获得的同步相位振荡幅度随时间的变化

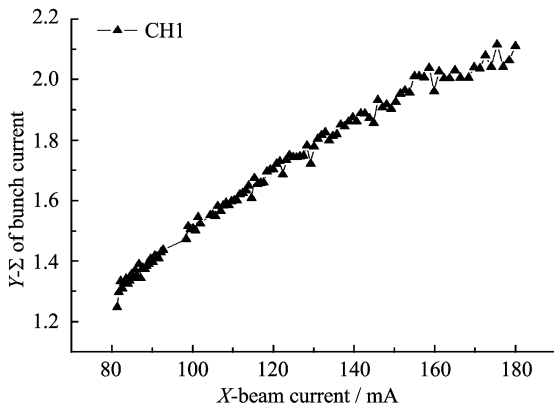
Fig. 6 Synchrotron phase oscillation in the longitudinal direction measured by phase detecting

测量系统测得的束团流强信号,同束团实际流强(DCCT 采得的数据)相对应起来,进行了系统的定标实验,以方便于在 HLS 的实际应用. 所得值同流强关系如图7所示<sup>[10]</sup>. 从图7看出,不论是多束团

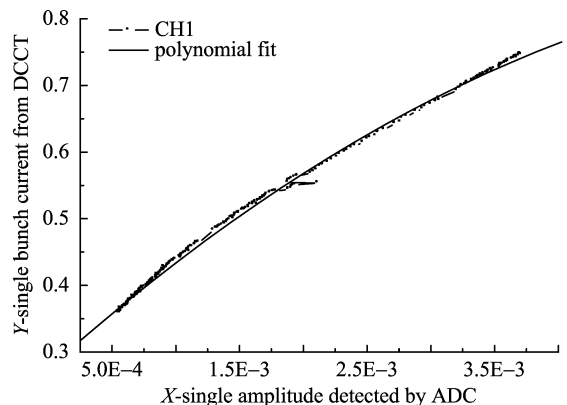
或者是单束团,两测量设备都表现出很好的线性关系. 将不同天所采数据相比较,也可以得到很好的一致性.

### 2.3.3 HLS 储存环阻尼研究

研究 HLS 储存环的阻尼过程,也就是研究扰动束流和扰动消失后束流横向振荡自由阻尼过程,即 damping 过程. 储存环总的阻尼时间由式(1)决



(a) 多束团定标



(b) 单束团定标

图 7 BxB 束团流强测量定标实验

Fig. 7 Calibration of measuring bunch current for BxB

定. 图 8、图 9 分别描述了阻尼过程和阻尼过程中水平工作点( $v_x$ )随时间的变化过程.

$$\frac{1}{\tau_{total}} = \frac{1}{\tau_{rad}} + \frac{1}{\tau_{headtail}} + \frac{1}{\tau_{oct}} + \frac{1}{\tau_{sex}} + \frac{1}{\tau_{mb}}. \quad (1)$$

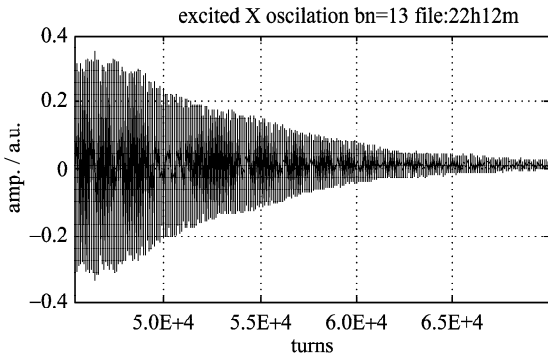


图 8 某个束团激励和自然阻尼过程

Fig. 8 Nature damping for a bunch excited

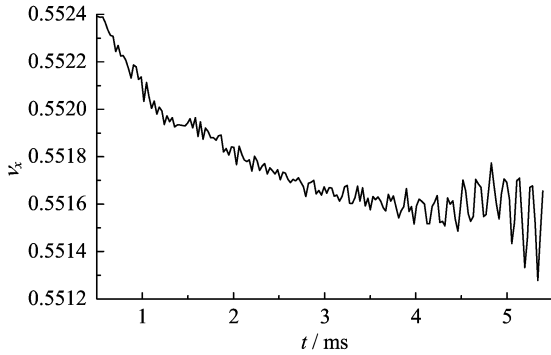


图 9 NAFF 法计算的水平工作点( $v_x$ )的幅度随时间变化关系

Fig. 9  $v_x$  change as time using NAFF

下面给出典型的 damping 时间测量结果及其分析.

对这个阻尼过程作指数衰减拟合得到

$$s(t) = ae^{bt} = 0.2082 e^{-\frac{t}{0.00176}},$$

即这个衰减系数为 1.76 ms. 这个值远远小于辐射阻尼时间(约为 20 ms), 可以判断储存环中存在较强的头尾阻尼和 Landau 阻尼, 后者可以来源于八极铁和六极铁. 这与我们实验的结果相吻合.

再利用 NAFF 法计算工作点随幅度变化关系和时-频分析结果, 明显看出在振荡时工作点明显发散(图 10), 图 11 表现出发散的频率随着幅度的阻尼逐渐收敛<sup>[11]</sup>.

### 2.3.4 激励门电路的研制

为了研究 HLS 储存环的各种性能, 经常需要激励束流, 尤其需要在单束团情况下进行各种测量、

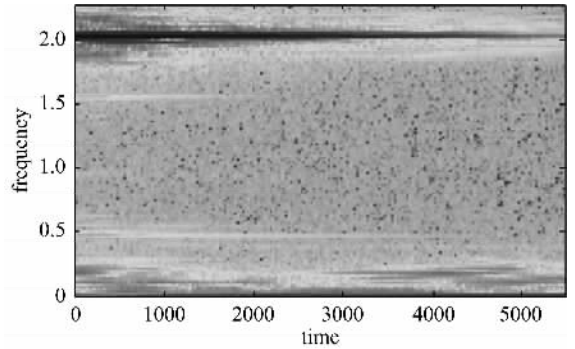


图 10 时-频分析 tune 展宽

Fig. 10 Tune spread in time-frequency analysis

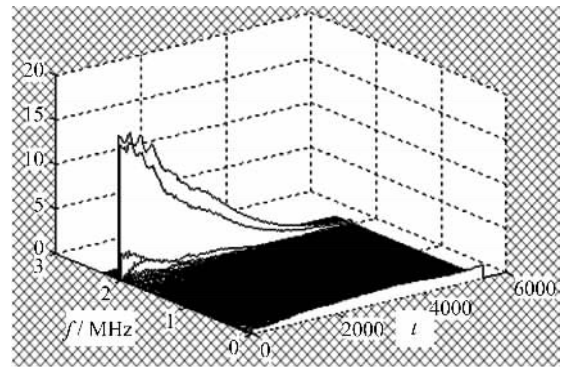


图 11 发散的频率随着幅度的阻尼逐渐收敛

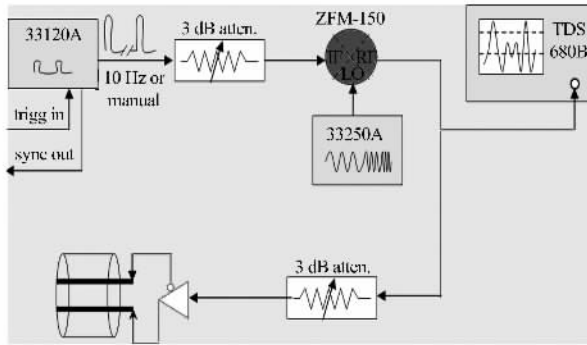
Fig. 11 Frequency spreaded converging after exciting

调试和研究, 如 damping 时间的测量、反馈系统延迟时间和反馈相位的调整等. 而 HLS 储存环目前只能运行在全环填充模式, 因此, 激励门电路的研制和形成单束团都是至关重要的. HLS 储存环上目前还没有安装快速脉冲磁铁, 因此我们尝试使用两种方法扰动束流: 相对较慢的注入脉冲磁铁和条带共振激励方法. 更多的横向激励束流实验是使用条带来开展的. 对于稳定的束流, 无论是传统的扫频激励还是根据测量的工作点计算的单频激励, 都可以得到很好结果. 采用条带共振激励横向( $X, Y$ )线路图 and 对应波形图如 12 所示.

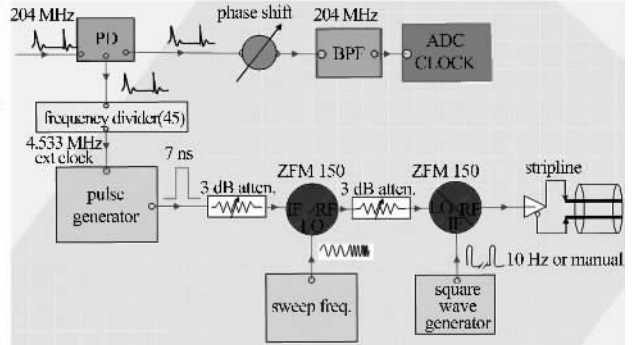
### 2.3.5 采用一个 BPM 进行相空间的描述

常规完成储存环相空间的描述, 都是由两个位置相差约  $90^\circ$  的位置测量(BPM)系统组成. 而采用一个 BPM, 在已知 BPM 所处位置的 TWISS 参数时, 由采样得到的束团横向运动轨迹  $x$  计算对应的  $x'$ , 分别描述以二者为坐标轴的平面内分布, 得到相空间图像.

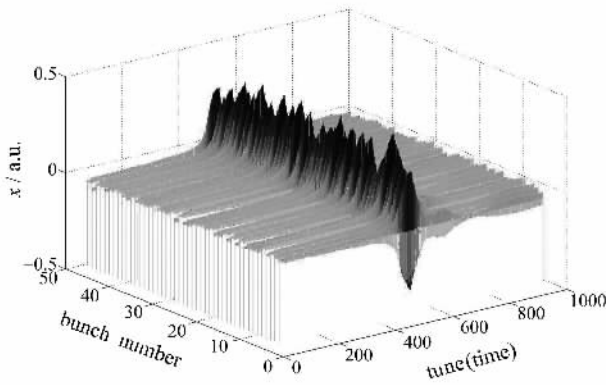
$$x(s) = a \sqrt{\beta(s)} \cos\left(\int_0^s \frac{ds}{\beta(s)} + \phi_0\right), \quad (2)$$



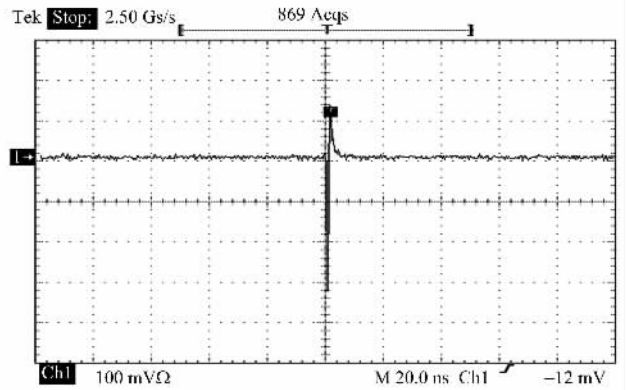
(a) 采用单个开关门(10 ms)扫频激励电路



(b) 采用两个高速开关门形成单束闭环电路



(c) 采用 10 ms 单个门电路扫频激励 45 个束团三维图



(d) 采用两个高速开关门在储存环中形成单束团

图 12 使用条带在横向激励束流的电路图和获得的对应的波形图

Fig. 12 Circuit of exciting beam current by use of stripline in transverse and wave shape obtained

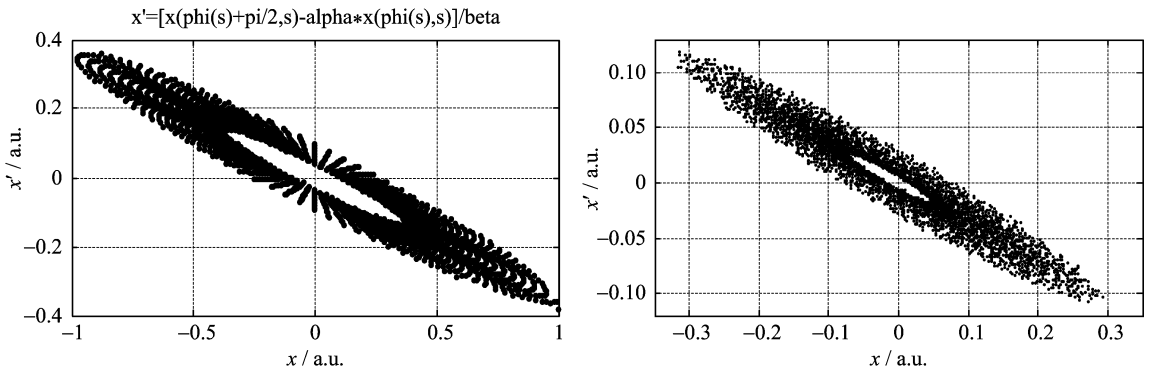


图 13 与束团水平振荡阻尼过程对应的相空间演变

Fig. 13 Evolution of 5 000 turns moment in phase space

$$x'(s) = \frac{1}{\beta(s)} \left[ -\alpha x(s) + a \sqrt{\beta(s)} \cos \left( \int_0^s \frac{ds}{\beta(s)} + \phi_0 + \frac{\pi}{2} \right) \right]. \quad (3)$$

对应恒定振幅运动的束团这个图像应该是一个椭圆, 视其 TWISS 参数的不同, 可以为正椭圆, 更多的情况是斜椭圆. 椭圆的面积正比于束流发射度 (或运动幅度), 所以可以想象与阻尼过程对应的相空间表示应该是收缩的椭圆, 反之则为扩张的椭圆,

实际测量结果很好地验证了这一点. 从图 13 可以看出, 随着束团水平振荡振幅衰减椭圆从外向内收缩. 当束流接近共振带时应该能从相空间表示中看到一族渐开线形式的收敛或发散的曲线<sup>[11]</sup>.

### 2.3.6 基于 Hilbert 变换的数据处理方法

考虑两个以  $t$  为变量的实函数  $x(t)$  和  $\tilde{x}(t)$ , 如果满足以下关系:

$$\tilde{x}(t) = x(t) \cdot \frac{1}{\pi t} = \frac{1}{\pi} \int \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau, \quad (4)$$

就称为连续 Hilbert 变换, 而  $x(t)$  和  $\tilde{x}(t)$  就互为 Hilbert 变换对. 典型的例子就是  $\cos \omega_0 t$  和  $\sin \omega_0 t$ . 对于离散序列也有同样的表达, 即

$$\tilde{x}[n] = \frac{2}{\pi} \sum_{k=-\infty}^{\infty} x[n-k] \frac{\sin^2(k\pi/2)}{k}. \quad (5)$$

在实际的应用中, 可以先对  $x[n]$  做离散的傅里叶变换, 然后将得到的正频信号翻转  $+90^\circ$ , 将负频信号翻转  $-90^\circ$ , 再把结果进行傅里叶的逆变换. 在对离散的序列进行变换的时候, 要注意到大于  $1/2$  采样频率的信号被当作负频率信号处理. 利用基于 Hilbert 变换的相空间重建理论, 获得图 12(c) 某个束团相空间演示(图 14)和束团模式振荡图(图 15). 束团振荡相位和频率, 用一种时域非平均的方式, 从多束团的角度出发, 全方位地观察束团振荡<sup>①</sup>.

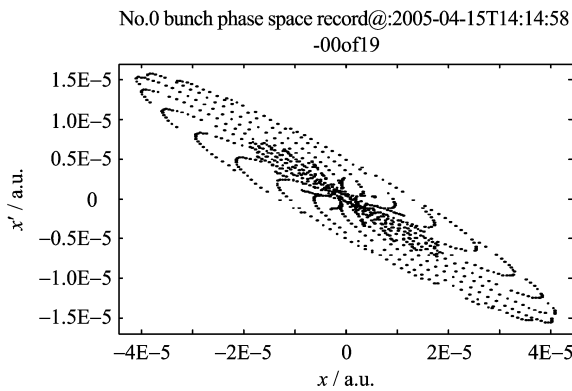


图 14 相空间追踪

Fig. 14 Phase space trace

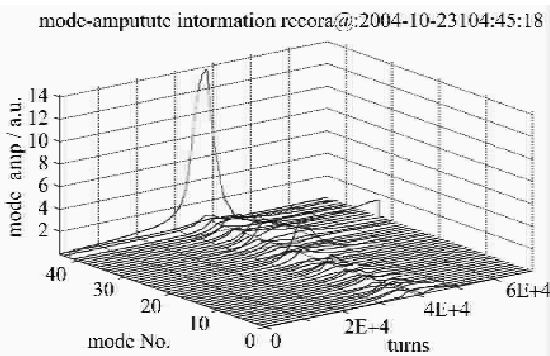


图 15 模式振荡追踪

Fig. 15 Oscillation mode trace

### 3 逐束团反馈系统的研制

#### 3.1 反馈原理

反馈系统就是把从束流那里探测到的信号重新

以某种方式作用回束流上, 也就是一个闭环系统, 我们用一种最为简单的振动模型来描述这个系统:

$$\ddot{x} + \gamma \dot{x} + \omega_0^2 x = U_{\text{ext}}. \quad (6)$$

式中,  $U_{\text{ext}}$  就是外加的驱动力.

#### 3.2 系统主要参数

逐束团束流反馈系统的主要参数包括系统带宽、最大输出电压、最大输出功率等. 这些参数由储存环参数决定<sup>[12,13]</sup>. 合肥光源 BxB 测量和横向反馈系统参数见表 2.

表 2 合肥光源 BxB 测量和横向反馈系统参数

Tab. 2 Parameter of BxB measurement and feedback system in HLS

工作频率	transverse: 612 MHz( $3 * f_{RF}$ ) longitudinal: 1.224 GHz( $6 * f_{RF}$ )
系统带宽	102 MHz,
可调整精度	10 ps
可调整相位精度	$0.09^\circ$ , $\geq 360^\circ$
动态范围	$\geq 35$ dB
本振器	$\geq 7$ dBm, 相位噪声 $\leq -80$ dBc
反馈功率	$\leq 100$ W
反馈阻尼时间	$\leq 44 \mu\text{s}$

#### 3.2 pickup 选择

反馈系统的关键在于为束流提供一个合适的反馈力. 采用两个相位相差  $90^\circ$  的 BPM 信号的线性组合, 可以在任意 pickup-kicker 间距和任意储存环工作点的情况下, 方便地得到所需要的  $90^\circ$  相移. 两组 BPM, 不仅应该选择在色散函数较小, 而  $\beta$  函数相对大的地方, 而且两个 BPM 之间的相位差尽可能  $90^\circ$  (或者  $70^\circ$ ).

##### 3.2.1 矢量计算单元

矢量运算的原理是: 两个 BPM 探测的信号分别加以  $a_1$  和  $a_2$  的衰减, 再将衰减后的信号相加. 相移的大小由式(10)表示. 如选择相位差为  $\varphi_0$  的两个 BPM, 束位置信号分别为  $x_1$  和  $x_2$ , 有

$$x_1 = a_1 \sqrt{\beta_1} \sin(\varphi_1(s)), \quad (7)$$

$$x_2 = a_2 \sqrt{\beta_2} \sin(\varphi_1(s) + \varphi_0), \quad (8)$$

$$x = x_1 + x_2 = [(a_1 \sqrt{\beta_1} + a_2 \sqrt{\beta_2} \cos \varphi_0)^2 + (a_2 \sqrt{\beta_2} \sin \varphi_0)^2]^{1/2} \sin(\varphi_1(s) + \Delta\varphi). \quad (9)$$

式中,

$$\Delta\varphi = \tan^{-1} \left[ \frac{a_2 \sqrt{\beta_2} \sin \varphi_0}{a_1 \sqrt{\beta_1} + a_2 \sqrt{\beta_2} \cos \varphi_0} \right]. \quad (10)$$

① 郑凯, 王筠华, 刘祖平, 等. 基于 Hilbert 变换的相空间重建方法在 HLS 逐束团测量系统中的应用. 高能物理与核物理, 已录用, 编号: 2006-0155.

对于双 BPM 系统进行矢量运算,是利用计算机远程控制压控混频器,而达到衰减调节机制,该方法廉价而且便行.通过该方法,可以在不改变硬件电路的前提下实现反馈相位的 360°的调整<sup>①</sup>,从而可以随意进行束流的反馈或激励.

### 3.2.2 notch 滤波器单元

为了滤除矢量运算后的反馈信号中包含大的回旋频率及其谐波分量(对于 HLS 为 4.533 MHz),避免终极放大器出现饱和,需要经过 notch 滤波器单元. notch 滤波器通常用两根电缆,一个双端口 0°功分,一个双端口 0°和 180°功分来完成. notch 滤波器电路如图 16 所示.

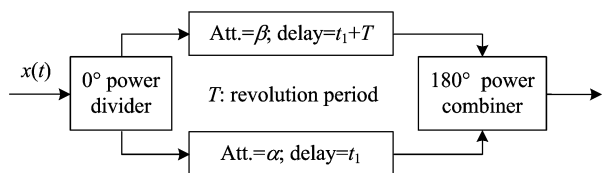


图 16 notch 滤波器原理示意图

Fig. 16 Principle sketch for notch filter

输出信号

$$y(t) = \alpha x(t - t_1) - \beta x(t - (t_1 + T)), \quad (11)$$

式中,  $T$  为回旋时间.

传输函数

$$|H(\omega)| = |y(\omega)/x(\omega)| = [\alpha^2 + \beta^2 - 2\alpha\beta\cos(\omega T)]^{1/2}. \quad (12)$$

滤波深度

$$R = -20\log[|H(\omega)|_{\max}/|H(\omega)|_{\min}] = -20\log[(\alpha + \beta)/(\alpha - \beta)]. \quad (13)$$

其中,  $\alpha$  和  $\beta$  为两路的衰减因子. 依据该原理,我们制作了利用电缆延时的梳状滤波器,其幅频特性如图 17 所示. 从图中可以看出,虽然最佳滤波深度可以到 44 dB,但是明显滤波深度同频率变化相关. 该现象的发生是因为电缆衰减是同电缆本身的延时及频率相关的,而且不同电缆对于频率的响应也很不相同,且带宽越宽,该差异越明显,原理见图 18. 为此,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)的传输衰减与模拟信号频率就不相关了<sup>[14]</sup>. 实测结果如图 19 所示. 该滤波器体积小,带宽宽(高达 1 GHz),频域响应稳定平坦. 它对于大型储存环的模拟反馈系统,或者数字反馈系统 ADC 之前用于提高 ADC 动态范围均更显著.

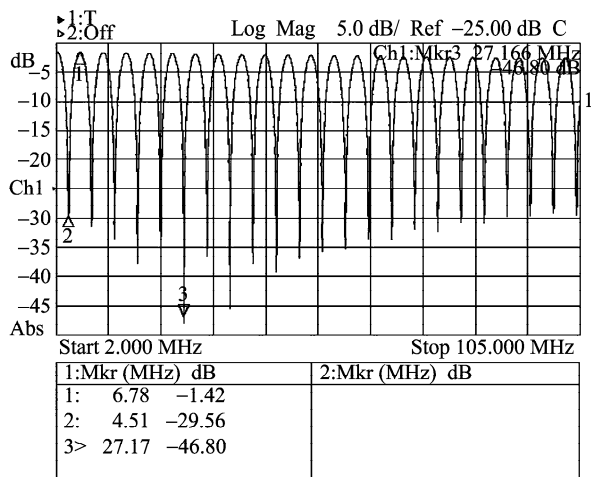


图 17 电缆延时滤波器的幅频响应

Fig. 17 Amplitude-frequency of the cable delay filter

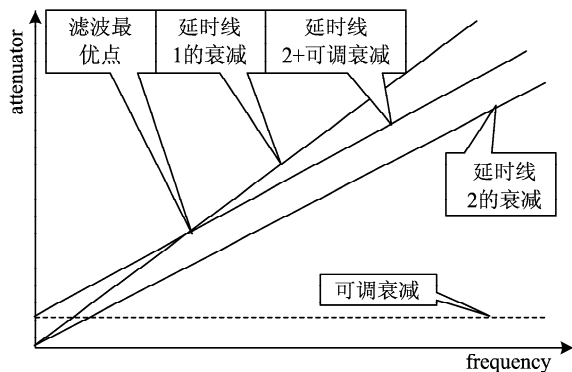


图 18 电缆延时滤波器的幅频响应

Fig. 18 Amplitude-frequency of the cable delay filter

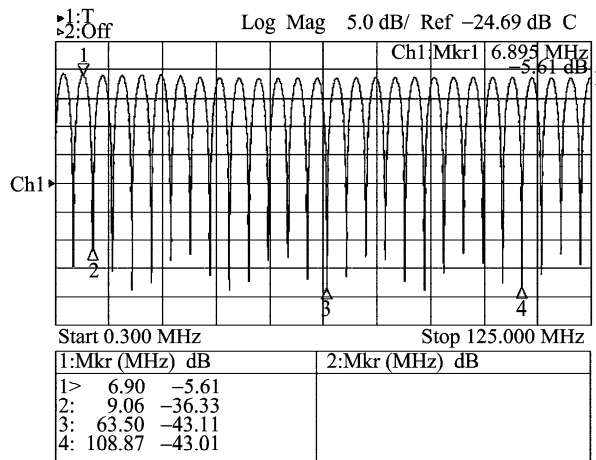


图 19 光纤延时滤波器的幅频响应

Fig. 19 Amplitude-frequency of the optical FIR filter

① 郑凯,王筠华,刘祖平,等.合肥光源逐束团测量和横向反馈系统.2006;粒子加速器希望杯二等奖论文.



优势. 光纤滤波器的线路图见图 20.

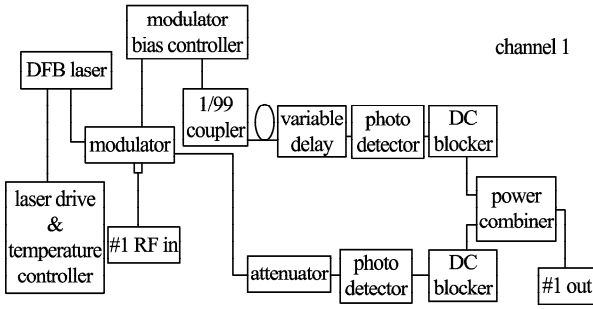


图 20 光纤滤波器的线路图

Fig. 20 Circuitry of the optical FIR filter

### 3. 2. 3 反馈激励单元

目前对于预研制,借用位于 HLS 储存环第三象限直线段上的条带电极反馈激励器. 条带长 75 cm, 覆盖角度为 13.1°, 连结 50 Ω 的匹配电阻, 上游端接管壁(地), 另一端接收来自功率放大器输出的激励信号.

## 4 横向反馈系统初步实验结果

利用 HLS 横向反馈实验装置, 分别在 200 MeV

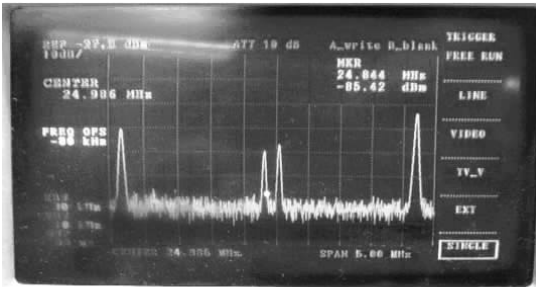
注入条件下和 800 MeV 运行情况下, 进行了反馈效果的初步实验. 在注入时, 反馈系统不仅能有效地抑制横向不稳定性(图 21), 而且能提高头尾不稳定阈值, 这样在一定的情况下(八极铁和六极铁不加), 有助于流强稳定积累.

在 800 MeV 运行状态时, 使用逐束团反馈系统能抑制横向不稳定性造成的束团尺寸的增加(图 22), 使发射度保持在一个很好的水平, 甚至好过单加六极铁时的状态. 表 3 给出了加和不加反馈系统时, 降六极铁电流与电流发射度的关系.

表 3 800 MeV 下反馈实验中的机器运行状态

Tab. 3 Operation state of the equipment in the feedback experiment under 800 MeV

反馈系统状态	六极铁电流/A	水平发射度/nmrad	垂直发射度/nmrad	
a	Off	71~35	323.2	5.72
b	On	71~35	198.3	5.67
c	Off	60~30	495.9	6.92
d	On	60~30	195.8	5.73
e	On	50~25	195.3	5.63
f	X-On, Y-Off	50~25	215.3	—



(a) 注入不加反馈系统时频谱曲线



(b) 加反馈系统时频谱曲线

图 21 注入时反馈系统效果

Fig. 21 Feedback effect in injection (200 MeV)



(a) 不加反馈束流截面



(b) 加反馈时束流截面

图 22 运行时反馈系统效果(800 MeV)

Fig. 22 Feedback effect in operation (800 MeV)

上述的工作,仅是合肥光源反馈系统初步的实验结果.在实验中,还得到了一些令人颇为不解的实验现象,需要进行进一步的实验和分析及研究.一系列更具有针对性的实验将在合肥光源完成,如束团振荡自然增长率,束团振荡耦合方式等.而常规反馈系统也将成为合肥光源日常运行的设备之一.

**致谢** 非常感谢中科院高能所马力研究员、曹建社研究员和岳军会博士很多有益的讨论和技术上的交流和支持,也非常感谢上海三代光源刘德康研究员和叶恺蓉研究员很多的支持!

#### 参考文献(References)

- [1] Fox J D. Bunch feedback systems and signal processing [C]// Proceedings of the Joint US-Cern-Japan-Russia School on Particle Accelerators: Beam Measurement. Singapore: World Scientific, 1999.
- [2] Cappi R, Métral E, Möhl D, et al. Transverse coherent instabilities in the presence of linear coupling [C]//Proceeding of EPAC 2000. CERN, 2000.
- [3] Gao J. Theory of single bunch transverse collective instabilities in electron storage ring[C]// Proceedings of the 1997 Particle Accelerator Conference, 1997, 2: 1 605-1 607.
- [4] Chen C S, Chen J, HSU K T, et al. Bunch by bunch intensity, position monitor for the Taiwan light source [C]//Proceeding of EPAC 1998. CERN, 1998
- [5] Kikutani E, Tobiyama M. Strategy for developing fast bunch feedback systems for KEKB[C]// Proceedings of the 1997 Particle Accelerator Conference. IEEE, 1997, 2: 2 332-2 334.
- [6] Teytelman D, Claus R, Fox J, et al. Operation and performance of the PEP-II prototype longitudinal damping system at ALS[C]// Proceedings of the 1995 Particle Accelerator Conference. IEEE, 1995, 4: 2 420-2 422.
- [7] Wang J H, Yin Y, Li J Y, et al. A closed orbit measurement with the NSRL BPM system [C]// Proceedings of the 1999 Particle Accelerator Conference. IEEE, 1999, 3: 2 048-2 050.
- [8] WANG Jun-hua, LIU Jian-hong, ZHANG Kai, et al. Design of bunch-by-bunch measuring and transverse feedback system at HLS[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2006,18(2):291-296.  
王筠华,刘建宏,郑凯,等.合肥光源逐束团测量和横向束流反馈系统设计[J].强激光与粒子束,2006,18(2):291-296.
- [9] 王筠华,郑凯,刘建宏,等.合肥光源逐束团测量与横向反馈系统研制[J].核技术,2007,30(8).
- [10] ZHENG Kai, WANG Jun-hua, LIU Zu-ping, et al. Improvement of bunch-by-bunch beam current detection system in Hefei light source[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2006,18(7):1 178-1 182.  
郑凯,王筠华,刘祖平,等.改进的合肥光源束团流强测量方案[J].强激光与粒子束,2006,18(7):1 178-1 182.
- [11] 刘建宏. HLS 测量系统研制及不稳定性初步研究[D].合肥:中国科学技术大学,2005.
- [12] MA Li. Beam feedback system[R]. Beijing: Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, 2003:1-15.  
马力.束流反馈系统[R].北京:中国科学院高能物理研究所,2003:1-15.
- [13] Barry W, Byrd J M, Corlett J N, et al. Design of the ALS transverse coupled-bunch feedback system[J]. Proceedings of the 1993 Particle Accelerator Conference. IEEE, 1993, 3: 2 109-2 111.
- [14] Yin Y, Wang J H, Zheng K, et al. Optical-fiber two-tap fir filter for storage ring transverse feedback system [C]//Proceeding of the 2007 Particle Accelerator Conference. IEEE,2007.