

文章编号: 1001-4322(2006)06-1011-03

用于 HLS 单束团运行模式的高频剔除系统*

黄贵荣, 徐宏亮, 刘功发, 李为民

(中国科学技术大学 国家同步辐射实验室, 合肥 230029)

摘要: 介绍了主要用于实现合肥光源单束团运行模式的高频剔除(RFKO)系统。该系统完全基于仪器设备(分频器、波形发生器、宽带放大器和具有 I/Q 调制功能的矢量信号发生器),无任何专门设计的电子线路。高频剔除的原理是激励粒子横向振荡而丢失。激励信号产生的过程是:将取自储存环高频系统的信号进行分频,得到束团同步信号;用束团同步信号触发波形发生器,生成窄脉冲;该窄脉冲调制信号发生器,输出高频剔除信号,放大后加在条带电极上,进行束团剔除。目前获得了 18 mA 的单束团最高流强。改变分频数和脉冲长度,可得到其它一些周期性填充模式,其中 3 串 6 束团以及非均匀填充模式得到了实验验证。

关键词: 填充模式; 单束团; 高频剔除; 合肥光源

中图分类号: TL503.2 **文献标识码:** A

合肥光源(HLS)储存环采用长脉冲注入,全环 45 个 Bucket 均匀填充。为了运行在部分填充模式(partial filling pattern)如单束团,需要进行高频剔除(RF knock out, RFKO)。它的原理是在储存环条带电极(strip line)上施加与粒子横向振荡频率相关的正弦信号,激励粒子横向共振而丢失^[1]。对正弦信号进行脉冲幅度调制,使部分束团不受力,可实现储存环部分填充。HLS 曾研制过两套 RFKO 系统,均由非常复杂的电子线路构成^[2-5],损坏后未能修复。为此利用实验室已有的一些高性能仪器,构建了一套新的 RFKO 系统。

1 RFKO 系统构成

RFKO 的结构见图 1,由 AVTECH 分频器、Agilent 33250A 波形发生器(80 MHz function/arbitrary waveform generator)、Agilent E4430B 矢量信号发生器、HP8347A 宽带放大器组成。束团在储存环中的回旋运动与高频加速场保持同步,HLS 高频场的频率为 204 MHz,谐波数 45,对应全环 45 个束团。因此从高频系统引入参考信号(ref),可使 RFKO 系统与束团同步。分频器对参考信号 45 分频(单串模式),得到束团回旋频率 4.533 MHz,其输出信号为单脉冲(5 V TTL 电平),用它触发波形发生器,生成幅度、宽度、直流偏置和延时均可调的脉冲输出,加载于矢量信号发生器 I/Q 调制模块的 I 端或 Q 端,对源输出的正弦信号进行脉冲幅度调制。RFKO 信号生成过程见图 2。

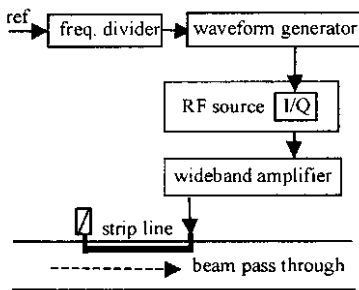


Fig. 1 Schematic of RFKO system

图 1 RFKO 系统示意图

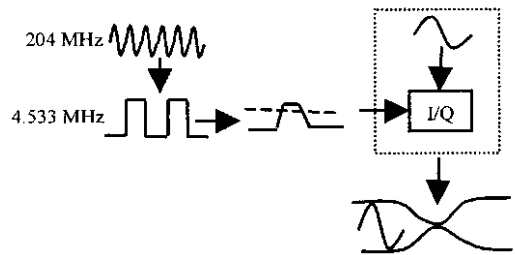


Fig. 2 Diagram of RFKO signal processing

图 2 RFKO 信号生成过程

脉冲调制正弦信号有很多方式,有些 RFKO 系统使用双平衡混频器(DBM)^[6],本系统采用 I/Q 调制。E4430B 的 I/Q 调制功能的主要设计目的是实现数字调相(I:同相,Q:90°相移),其输出信号的幅度受调制信号控制,所以也可用于脉冲幅度调制。该信号源也有脉冲调制功能,但最小调制脉冲宽度(2 μs)不能满足要求。

* 收稿日期:2005-11-18; 修订日期:2006-04-06

作者简介:黄贵荣(1970—),男,博士生,高级工程师,主要从事加速器微波技术研究;grhuang@ustc.edu.cn。

本系统利用了 33250A 的两个功能:串(burst)和脉冲(pulse)。burst 在外触发下生成数目可变、延时可调的脉冲串,串内脉冲的幅度、宽度和直流偏置在 pulse 中设置,脉冲平顶宽度最小值为 8 ns,上升沿 5 ns,基本满足要求。

RFKO 系统生成的单束团模式高频剔除信号见图 3。E4430B 在窄脉冲 I/Q 调制下不能完全截止,放大后的信号在截止区仍有一定残余,并且脉冲有一定展宽。调整 33250A 输出脉冲的幅度和直流偏置使残余信号最弱。同时 E4430B 的输出设置为略大于可剔除其它束团的幅度,以减轻残余信号对保留束团的影响。

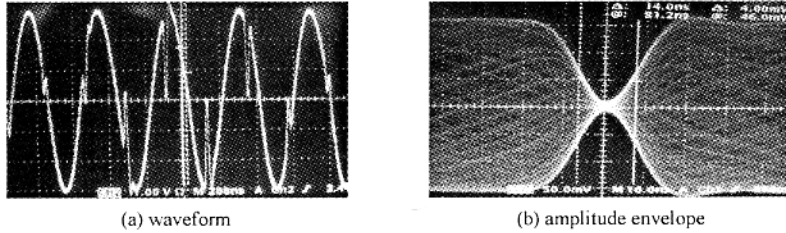


Fig. 3 RFKO signal for single-bunch mode

图 3 单束团模式的 RFKO 信号

33250A 和 E4403B 通过 RS232 与加速器控制系统相连,参数设置在中央控制室完成。

2 单束团模式

RFKO 系统工作在 200 MeV 注入阶段,边注边剔,可获得较高单束团流强。若注入后再剔,受多束团流强限制,单束团流强难以超过 7 mA。同时因为粒子能量低,所需剔力很小,宽放输出小于 300 mW。剔除信号加在垂直方向条带电极上,其频率 f_k 由下式决定。

$$f_k = nf_{\text{rev}} + f_y \quad (1)$$

式中: f_{rev} 为回旋频率; n 为任意正整数; f_y 为垂直方向自由振荡频率(betatron oscillation frequency)。自由振荡频率常用的表达是工作点 Q ,

$$Q_y = f_y / f_{\text{rev}} \quad (2)$$

f_y 在 2.58~2.70 MHz 之间,由储存环运行参数决定。在每次进行剔除之前,由工作点测量系统测得 f_y 准确值。

由于储存环存在非线性效应, f_y 有一定的频率分散。 f_k 要进行调频,实验得到当 $n=0$ 时合适的调制频率为 1 kHz,频偏 4 kHz。

当单束团积累到所需流强后停止注入,在慢加速(ramping)之前 RFKO 系统继续工作,进行单束团纯化。与目标束团相邻的两个束团,由于调制脉冲的展宽,剔除力较弱,有时不能直接剔除干净。调整 33250A 的脉冲延时,可将之逐个剔除,此时应注意不要影响主束团。RFKO 系统获得了比较纯净的单束团(见图 4),目前单束团最高积累流强可达到 18 mA。

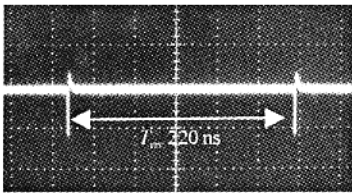


Fig. 4 Single-bunch signal from button electrode

图 4 单束团信号(取自钮扣电极)

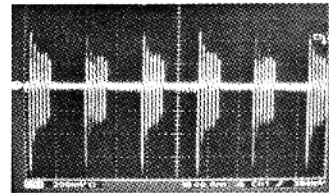


Fig. 5 3-train with 6-bunch mode

图 5 3串6束团模式

3 其它填充模式

RFKO 系统可通过改变分频器的分频数和波形发生器输出脉冲信号的长度等方式得到其它周期性填充模式。由于分频数必须是整数,而谐波数为 45,所以周期性填充模式串的数目 m 只能是 1,3,5,9,15,对应的分频数为 45/ m 。调整波形发生器的脉冲长度,可改变串内的束团数。图 5 是每串 6 个束团的 3 串模式。

将分频数固定为 45,33250A 的串数目设为 m ,也可以实现周期性填充,并且串数可以任意。但实验发现在多串模式下,33250A 输出容易发生串间抖动现象,所以这种方式没有采用。

当束团受到的剔除力较弱,不足以完全剔除束团,束团流强大致与所受剔除力成反比。调整波形发生器输出脉冲信号的沿长度,可得到串内束团流强斜坡式的非均匀分布(见图 6)。但束团在弱力作用下的表现有很大的随机性,流强大小的规律性和重复性都不强。

4 结 论

新 RFKO 系统结构简单,各设备性能稳定可靠,所有设备在不进行 RFKO 时均可用作他途。目前该系统主要为储存环自由电子激光实验和机器研究提供单束团,并得到了满意的结果。

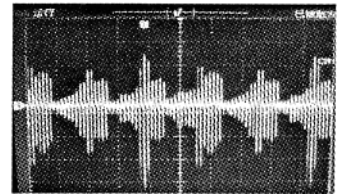


Fig. 6 Non-uniform bunch train

图 6 非均匀束团串

参考文献:

- [1] Fujita H, Iwashita Y, Morita A, et al. Slow extraction of electron beam with combination of the third order resonance and RFKO[C]//Proc of PAC2001. Chicago, 2001: 3591-3593.
- [2] Jin Y M, Liu Z P, Li W M, et al. Machine study and improvement of the HLS storage ring[C]//Proc of PAC99. New York, 1999: 2406-2408.
- [3] 裴元吉, 李为民. 用 RFKO 法对 HLS 环中某些束流不稳定现象的初步试验研究[C]//第六届全国加速器物理学术交流会议论文集. 长沙, 1997: 22-25. (Pei Y J, Li W M. Experimental study of HLS beam instability based on RFKO method. Proc of the 6th National Particle Accelerators Physics Symposium in China. Changsha, 1997: 22-25)
- [4] 李为民, 裴元吉, 戴益明. 储存环高频剔除系统[C]//第二届全国加速器技术交流会论文集. 宁波, 1998: 111-115. (Li W M, Pei Y J, Dai Y M. Storage ring RFKO system. Proc of the 2nd National Symposium on Particle Accelerator Technology. Ningbo, 1998: 111-115)
- [5] 李为民, 周安奇, 李永军, 等. 在 NSRL 上利用 RFKO 实现部分填充[J]. 核技术, 2002, 25(1): 29-32. (Li W M, Zhou A Q, Li Y J, et al. A study on the partial filling at NSRL. *Nuclear Techniques*, 2002, 25(1): 29-32)
- [6] Haga K, Honda T, Kasuga T, et al. A new purification method for single bunch operation at the photon factory storage ring[C]//Proc of PAC99. New York, 1999: 2310-2312.

RFKO system for single-bunch operation of Hefei light source

HUANG Gui-rong, XU Hong-liang, LIU Gong-fa, LI Wei-min

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

Abstract: A new RFKO(RF Knock Out) system for partial filling operation is in commission at the Hefei light source storage ring. This system is composed of a frequency divider, waveform generator, vector signal source and wideband amplifier. The in-phase signal of beam bunch is obtained by dividing the reference signal from the storage ring's RF system. Triggered by the in-phase signal, the waveform generator outputs a pulse burst. Modulated by the pulse, the waveform generator produces the RFKO signal, and the RFKO signal is applied to the strip line after amplification. The single bunch operation is achieved in this way and the current has reached 18 mA at present. Some bunch-train patterns such as 3-train with 6-bunch and non-uniform bunch train are also tested.

Key words: Filling pattern; Single-bunch; RFKO; Hefei light source(HLS)