

## Performance and Experience of Transverse Bunch-by-Bunch Feedback System for SPring-8

T. Nakamura, K. Kobayashi, T. Ohshima  
Japan Synchrotron Radiation Research Institute/SPring-8  
1-1-1 Kouto, Mikazuki-cho, Sayo-gun, Hyogo, 679-5198

### Abstract

Transverse bunch-by-bunch feedback system is developed and in operation from January 2004, and suppresses horizontal and vertical multi-bunch instabilities. The results of beam tests and this half-year experience are described in this report.

### 横方向bunch-by-bunchフィードバックの性能と経験

#### 1. はじめに

SPring-8では、横方向bunch-by-bunchフィードバック装置[1]を開発し、2004年1月からユーザー運転において稼動させており、これにより水平、垂直の両方向について不安定性を抑制している。SPring-8蓄積リングは放射光源用の8 GeVの電子蓄積リングであり、その諸元を表1に示す。このリングでは、垂直、水平方向では真空封止型挿入光源によるresistive-wall不安定性、加えて水平方向では高周波加速空洞の高次モードによる不安定性が問題となっていた[2]。Bunch-by-bunchフィードバックの導入以前は、これらの不安定性を、クロマチシティを水平、垂直ともに8に増やすことにより抑制していた。しかし、このような強いクロマチシティでは、入射ビームの、挿入光源部などのギャップの小さいチェンバーでの損失が大きく、top-up運転時に問題となることが判明し[3]、また、検討されている低エネルギーや大電流の運転ではより不安定性が強まるが、これ以上のクロマチシティは、電源やダイナミックアパチャーの制限から困難である。このような問題を解決するために、bunch-by-bunchフィードバックが必要とされた。また、bunch-by-bunchフィードバックは、top-up運転時において、バンパ軌道の形成の際に生じる蓄積ビームの残留振動の早い減衰にも有効であり、放射光利用者からみた入射時の見かけのビームサイズの増大をより低減することが可能となっている。

表1. SPring-8蓄積リングの諸元

Energy	E	8 GeV
Average Current	I	100 mA
Emittance / Coupling	$\epsilon / \kappa$	6.6 nm / 0.2 %
Beta function at feedback	$\beta_H / \beta_V$	24 m / 5.8 m
Beam size at feedback	$\sigma_H / \sigma_V$	400 $\mu$ m / 8.7 $\mu$ m
Fractional Tune	$\Delta\nu_H / \Delta\nu_V$	0.15 / 0.35
Betatron Damping Time	$\tau_\beta$	8.3 ms
RF Frequency	$f_{RF}$	508.58MHz
Revolution Period	$T_0$	4.8 $\mu$ s

#### 2. Bunch-by-bunchフィードバックの構成

Bunch-by-bunchフィードバックの構成を図1に示す。本装置の特徴として、低雑音、アナログ分配器を用いることによる12-bit ADCの適用、ならびに信号処理にFPGAを用いて単純化と低コスト化を行ったことにある。低雑音化のため、片側がショートしたストリップライン型位置モニタを開発し、ボタン型モニタの10倍以上の高感度を得て、位置測定誤差を5 $\mu$ m(rms)にできている。これによる残留振動は0.5 $\mu$ m(rms)程度であると期待される。これはビームサイズの1/10以下であり、diffraction limitのビームサイズ程度であるので、十分な性能である。12-bit ADCを用いることができたため、従来の8-bit ADCで問題となっていたダイナミックレンジと精度のトレードオフがなくなり、またオフセットのキャンセル回路が不要となった。また、モニタからキッカーまでのレイテンシは1.3ms(内ケーブル長0.3ms)である。FPGAでのFIRフィルタには9-tapを用いている。

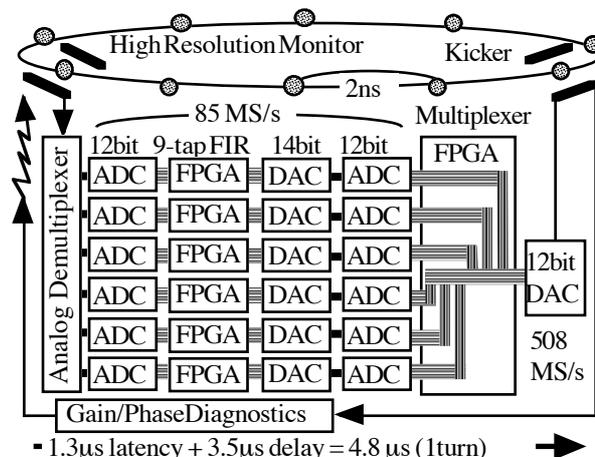


図1 : bunch-by-bunchフィードバックシステムの構成

#### 3. Bunch-by-bunchフィードバック診断系

図1中でGain/Phase Diagnosticsと示されている

フィードバックのゲイン/位相の診断系の詳細を、図2に示す。信号発生器にチューンの端数として0.25に相当する信号を発生させ、それをbunch-by-bunchフィードバック(BBF)の入力に導入する。その信号はフィードバック装置をへてキッカーに伝わり、その出力に現れるが、これを元の信号と比較して振幅(ゲイン)、位相を計算する。現在は、単一周波数でのみ測定を行っているが、ネットワークアナライザを用いて任意の周波数での診断を可能とすることを検討している。

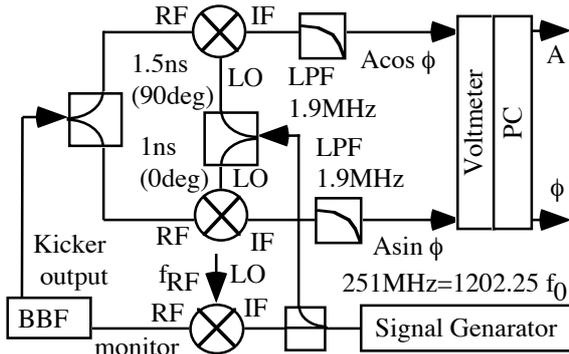


図2: ゲイン/位相診断系。図中BBFが bunch-by-bunchフィードバックを示す。

#### 4. マルチバンチ性能試験

マルチバンチ時の特性を測定した。測定はマルチバンチ運転時と同じバンチ電流0.05mA/bunchのバンチからなる400バンチのトレインで行った。不安定性の影響を小さくするために低電流としている。別途のキッカーを用いてビームを強制振動させ、強制力を切った時点からの減衰時間の測定をフィードバックONとOFFとで行い、フィードバック単体での減衰時間を得た。このときのクロマチシティは水平、垂直ともに2である。測定周波数は、ベータトロン周波数である30kHz(水平), 70kHz(垂直) および不安定性の最高の周波数である250MHz近辺にて行った。結果を図3に示す。図3中で  $t_{FB}$  はフィードバック単体での減衰時間を示す。すなわちフィードバックONで得られた減衰時間から、フィードバックOFFでの減衰時間を差し引いた値である。フィードバックOFFでの減衰時間は、放射減衰の時間8.3msより早い、これはチューンの振幅依存性などによるバンチ内のチューンの広がりによる重心振動の減衰が寄与しているものと思われる。この効果は、強制振動の振幅が大きいほど強くなる傾向があるが、フィードバックONでの強制振動の振幅は、OFFの場合の数割となっているので、測定されたフィードバック単体の減衰時間は得られた値よりやや短いと考えられる。なお、図3では振幅を正規化して表示している。

フィードバック単体での減衰時間が低周波と高周波で異なるのは、用いているキッカーの長さが水平では、45cm (transit time factor 0.25 at 250MHz) 2本、垂直では、45cm 1本および7cm (transit time factor 0.98 at 250MHz) 1本であることから、transit time

factorの違いによる寄与が大きいと考えられる。この試験により十分な減衰時間が得られていることがわかった。

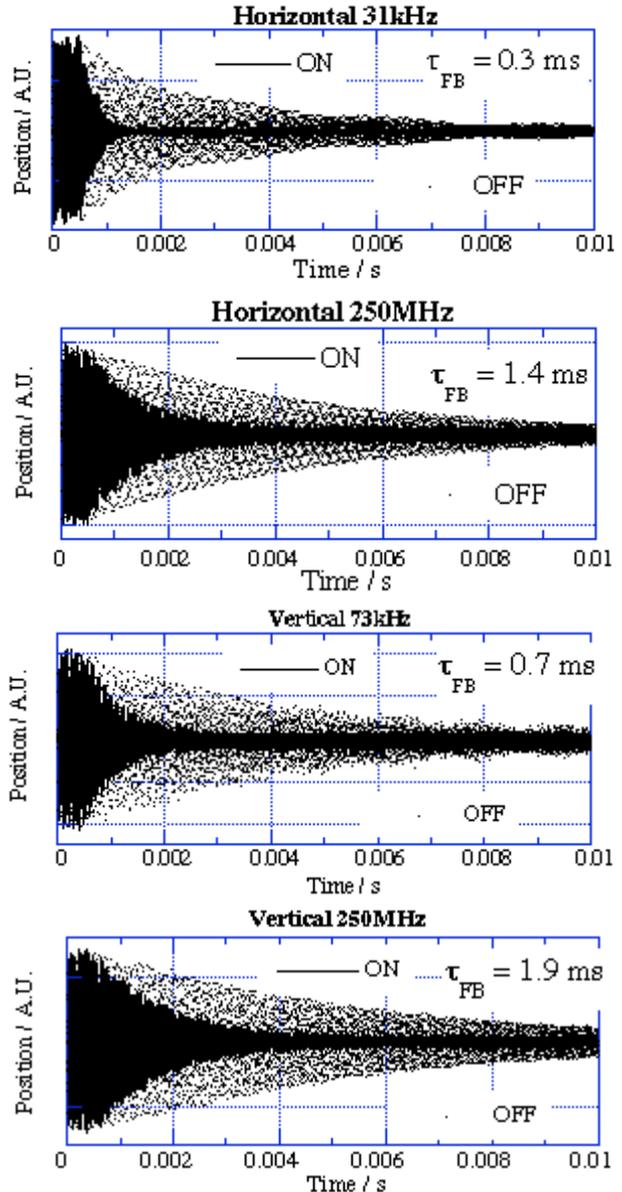


図3: 強制振動の強制力を切った後の振動の減衰。強制力は、5ms(0.0005s)で切られている。図中、 $t_{FB}$  はフィードバック単体での減衰時間。

#### 5. シングルバンチ性能試験

シングルバンチ不安定性に対するフィードバックの効果を測定した。リングの一つのバケットにのみ電流を蓄積し、その電流を増やしながらチューンの測定を行った。クロマチシティを水平、垂直とも8としていた従来の測定では、水平、垂直ともにフィードバックがなくとも15mA/bunchまで安定に蓄積することができ、電流の上限は、真空の悪化で決められていた。今回はクロマチシティを水平、

垂直とも2として測定を行った。フィードバックOFFでは、水平、垂直ともに3.5mA/bunch程度でm=0とm=-1とのmode-coupling不安定性が発生した。これに対してフィードバックONでは、8mA/bunchまで安定に蓄積することができ、それを越えると、水平、垂直ともにビームは不安定となった。m=0とm=-2のmode-coupling不安定性と思われる。しかし、達成した8mA/bunchは、放射光利用者に対してのシングルバンチ運転の最初の段階としては十分な値である。この試験では30dBの減衰器を用いてモニタからの信号を減衰させているが、8mA/bunchの時、モニタ信号の増大によるゲインの、マルチバンチの低周波時と比較した増加はtransit time factorによる寄与0.66 (水平)、0.83(垂直)を考慮して、水平3.4倍、垂直4.2倍程度と見積もれる。これから8mA/bunchでの期待される減衰時間は、0.09ms(水平)、0.17ms(垂直)程度である。

## 6. 経験

### 6.1 入射バンパ形成による蓄積ビームの残留振動

bunch-by-bunchフィードバックのダイナミックレンジとゲイン (減衰時間) はパワーアンプの出力パワーの上限によりトレードオフにあり、ゲインを増やすとパワーアンプの飽和によりダイナミックレンジが制限されてしまう。この制限により以下のような現象が発生した。当初、入射バンパを形成した場合には、蓄積ビームもその影響を受け、特に水平には1mm程度の残留振動が発生した。その際、フィードバックのダイナミックレンジとして0.5mm程度としていたため、数msの間、bunch-by-bunchフィードバックが飽和し、その間、フィードバックによる減衰時間が長くなってしまいう状況が発生していた。通常のフィリングではこのような場合でも不安定性は十分に抑制できていたのであるが、203バンチのフィリングすなわち12バンチおきの等間隔フィリングでは水平方向に非常に強い不安定性が生じ、フィードバックが飽和している間に不安定性が成長して数十msから100ms程度の間、ビームが振動してしまうという現象が現れた。ダイナミックレンジを広げるとゲインを下がるため不安定性の抑制が不可能となり困難な状況であった。現在は、6極磁石の調整[4]により残留振動の振幅を数分の1に小さくできているので、bunch-by-bunchフィードバックの飽和はなくなり、早い減衰が得られている。なお、この強い不安定性は、加速空洞のいくつかの高次モードやresistive-wallインピーダンスが、203バンチのフィリングにおいては一つのマルチバンチモードにおいて重なり合ってしまうことにより発生しているものと考えている。

### 6.2 システムの安定性

稼動を始めて以来の半年の間、bunch-by-bunchフィードバック追加の微調整等なしに安定に動作して不安定性を抑制している。前述の診断系により定

常的に250MHz近辺での位相、振幅のズレを測定しているが、位相の変動は、数度程度であり、性能には全く問題ない範囲であった。また振幅の変動も数%であった。

## 7. 今後の改善

### 7.1 デジタル信号処理系の単一ボード化

図1にみられるように、FIRフィルタ用のボードとmultiplexer用のボードが別々となっているので、これを図4に示すような単一のボードにまとめたものを開発中である。これにより、周回周期の短いリングに対応するための信号処理のレイテンシの短縮や、調整の簡略化を行うことができる。また価格も現在より半額程度とすることが可能となる。また現状ではharmonicsが6で割り切れるリングに対してのみ用いることができるが、このボードでは、harmonicsが4で割り切れるリングに対しても使用可能とすることを検討している。この場合には、RF周波数は欧米のリングでよく用いられている352MHzを目標とする。

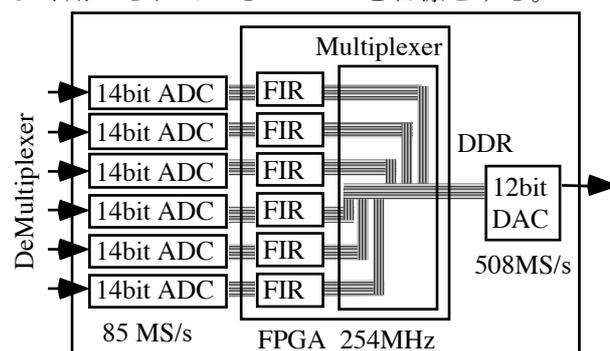


図4：開発中のデジタル信号処理ボード

### 7.2 マルチバンチ-シングルバンチ共存蓄積

マルチバンチの部分と、4mA/bunchを越えるようなシングルバンチが共存して蓄積されているフィリングでは、どちらの不安定性も抑制する必要がある。しかし、バンチ電流が2桁ほど異なるため、現状のシステムでは、両方を同時に取り扱うことは不可能である。そこで、位置モニタ信号に1入力2出力スイッチを2台設置し、バンチ電流に応じて減衰器を数nsの時間で高速に切り替えることのできるシステムを開発中である。

## 参考文献

- [1] T. Nakamura, et. al., "Bunch-by-bunch feedback for the SPring-8 Storage Ring", the proceedings of the 9th European Particle Accelerator Conference, Lucerne, 2004
- [2] URL: <http://acc-web.spring8.or.jp/~nakamura>
- [3] M. Takao, et. al., the proceedings of the 9th European Particle Accelerator Conference, Lucerne, 2004
- [4] H. Tanaka, et. al., the proceedings of the 9th European Particle Accelerator Conference, Lucerne, 2004