

## BUNCH BY BUNCH FEEDBACK SYSTEMS USING iGp DIGITAL FILTER

Makoto Tobiyama<sup>1,A)</sup>, John W. Flanagan<sup>A)</sup>, Takashi Obina<sup>A)</sup>, John D. Fox<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> High Energy Accelerator Research Organization (KEK), 1-1 Oho, Tsukuba, 305-0801, Japan

<sup>B)</sup> Stanford Linear Accelerator Center, 2575 Sand Hill Rd, Menlo Park, CA 94025, U.S.A.

### Abstract

Integrated general purpose digital filter system (iGp) for bunch by bunch feedback systems has been developed under the international collaboration of KEK, SLAC and INFN-LNF. It consists of a 8-bit ADC, a VertexII FPGA, 8MB of external memory and a 12-bit DAC. It can be configured to fit almost all the harmonic number with RF frequency of less than 540MHz. All the features of the board is controlled through the integrated EPICS IOC. An example of application on the KEKB-HER transverse feedback systems is shown with the result of built-in transient domain analysis system.

### iGpデジタルフィルターを使った個別バンチフィードバックシステム

#### 1. はじめに

粒子ファクトリーや放射光リングのような、大電流蓄積リングで発生する、バンチ結合不安定を抑制するため、個別バンチフィードバックシステムを建設、使用することは非常に有効な対策である。個別バンチフィードバックシステムは、それぞれのバンチ重心の位置を測定する振動検出部、位置情報から必要な情報(振動成分)を抜き出し、必要な位相シフトを行い、ビームとのタイミングを合わせる信号処理部、ビームの角度(あるいはエネルギー変位)を変える高出力アンプ・キッカー部から成っている。信号処理部は、小型のリングではケーブルディレイやアナログ信号合成回路からなるアナログ回路で構成される例が多かったが、リング周長が大きくなり、また不安定が強力になるにつれ、ノイズの問題などで実現が困難となっていた。さらに、調整の手間、長時間の安定性にも大きな問題があった。

KEKBやPEP-IIリングでは、設計時からバンチフィードバックシステムが必須であることが明らかであったため、はじめからデジタル信号処理を基本としたバンチフィードバックシステムの開発が行われた。KEKBでは横方向、進行方向フィードバック用に高速論理回路で構成されたハードウェア2タップFIRフィルターを開発し[1]、PEP-IIでは進行方向用に多くのDSPを使用し複雑なFIR、IIRフィルターを実現するデジタル信号処理システムを開発した[2]。両システムともビーム不安定を抑制し、リングの性能を向上させるのに大きく寄与してきた。しかしながら、これらのシステムは開発時の技術的制約から汎用性や性能上の制約が多くあり、さらに開発開始より10年以上の年月がたち、ほとんどが製造中止部品となり、性能維持すら困難になってきた。

近年の大規模高速FPGA(Field Programmable gate Array)の進化に伴い、ADC-FPGA-DACといった簡単な構成で、汎用性の高いフィードバックデジタル信

号処理回路を構成することが可能となってきた。そこで、KEKB-SLAC-INFNの共同で、次世代汎用フィードバック用信号処理回路の開発を開始した。現在までの成果として、iGp(integrated General-purpose signal processor)が完成し、種々の加速器で試験、また実用に使われ始めている。

KEKB加速器は、周長、加速周波数いずれをとってもiGpが対象としてきた加速器で最大規模のリングである。すでにバンチフィードバックシステムが動作しており、信号処理部のみの効果を確認することが可能である。さらにビームサイズをはじめとする各種モニターも整備されており、フィードバックシステムがもたらす影響、特に衝突型加速器特有の強力なビームビーム相互作用に関する効果を検証することができる。

本報告では、はじめにiGpシステムについて説明を行い、本システムの応用例としてKEKB-HERバンチフィードバックシステムの信号処理部(水平、鉛直両方向)をiGpに交換し、システムの性能を測定した結果について報告を行う。KEKBリングの関連するパラメータは表1に示す通りである。

表1 KEKB Machine Parameters

	LER	HER	
Energy	3.5	8.0	Gev
周長	3016		m
交差角	クラブ交差(22 mrad)		
I <sub>beam</sub>	1619	854	mA
N <sub>bunches</sub>	1584		
I <sub>bunch</sub>	1.02	0.534	mA
ε <sub>x</sub>	15	24	nm
β*x	90	90	cm
β*y	5.9	5.9	mm
σ*y	1.1	1.1	μm
vx	45.505	44.509	
vy	43.567	41.596	

<sup>1</sup> E-mail: [makoto.tobiyama@kek.jp](mailto:makoto.tobiyama@kek.jp)

## 2. iGpシステム

iGpシステムのブロック図を図1に示す。バンチ位置信号処理回路からの位置信号は、内蔵の14dB広帯域増幅器で増幅された後、8bit FADCでデジタル化され、VertexII FPGAに入る。FPGA内でFIRフィルター処理、及びFIFOを使ったone-turn(可変)ディレイを通り、12ビットDACに出力される。同時にこの位置信号は、FPGA内部及び外部(8Mバイト)にあるメモリーに記録され、フィルター処理を妨げることなく読み書きできる。また、特に進行方向フィードバックに使用する場合はシンクロトロン周波数が遅いためある程度のデータの間引き(down sampling)を行うのが普通であるが、このためデータダウンサンプル機能、及び出力のhold buffer機能を持っている。この機能のON/OFFとは独立に、記録データのダウンサンプル機能も有している。これらの機能はUSBインターフェースを通し、Linux上で動作している内蔵のmini-ITXボードからEPICSインターフェースを通して制御される。FPGAのfirmwareはこのインターフェースを通しboot時、及び指定時にdownloadされる。また周辺機器及びDACのオフセットを制御するため、8ch 12ビットの遅いADC、8ch 8bitの遅いDAC、32bitの汎用I/Oポート、さらに内部機器温度を監視する温度モニターを備えている。

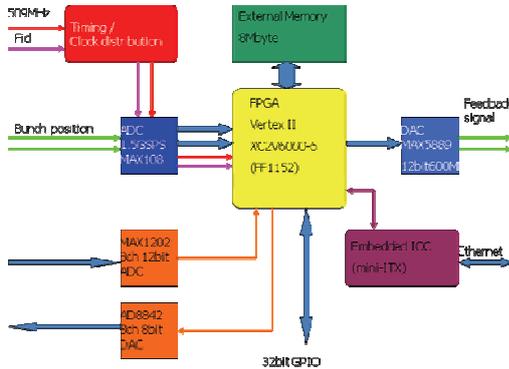


図 1 iGpシステムのブロック図

ADCの出力は2チャンネルにinterleaveしているので、harmonic numberが偶数であればそのままFPGA内部回路が並列化できるが、たとえ奇数であっても、同一FPGA内の回路なので、uneven stepping回路などを使い対応は可能である。KEKB用フィードバック回路では、harmonics numberが5120と数多く2で割りきれられるため単純な並列回路となっているが、harmonic numberが大きくRF周波数も高いため、他のリング(中規模放射光リングなど)と比べて回路規模は大きくなり、16タップFIRフィルターを可能にする構成でXC2V6000の6Mゲート回路のうち約90%のSLICEリソースを使用している。

FIRフィルターの係数については、EPICSのedmインターフェース上に簡易生成パネルが用意されており、随時変更可能である。また、係数自体もEPICSデータベースになっているため、外部ソフトウェア

を使用して変更することも可能である。

システム上には2種類のFIRフィルター係数セットを同時に持つことができ、その2つを設定した内部タイミングで切り替え、データを記録することが出来るので、1つの係数セットをすべて0にすることで、ある時間feedbackをoffし、その後onにするシーケンスを実行し、不安定の成長、減衰を同期して記録する、transient-domain測定を行うことが出来る。これから、ビーム不安定の起こりはじめの純粋な不安定モードを特定することが出来るので、不安定自身の研究にきわめて有効であるだけでなく、フィードバックシステムの減衰特性、特にresistiveに出来ているのかどうかの確認が出来る。

## 3. KEBB-HERでのフィードバック実験

KEKB HER個別バンチフィードバックシステムで、水平、鉛直両方向で、既存の2 tap FIRフィルターの代わりに2台のiGpシステムを入れ、ビームフィードバックを行う実験を行った。実験で使用したフィードバックシステムのブロック図は図2の通りである。

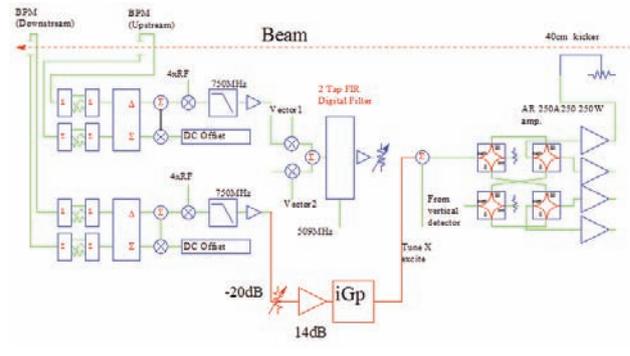


図 2 KEBB-HERでのiGpを使ったフィードバック実験ブロック図

既存のシステムはリング上流、下流の2箇所を設置したBPMから得られる位置信号をアナログでベクトル合成し、ビーム位置に対して90度の位相シフトを生成して、それを2 tap FIRフィルターに渡し、DC成分を除去、1 turn delayをしてフィードバックしていたが、iGpはタップ数が多いためフィルター係数の選択で任意の位相シフトを生成可能のため、下流側電極からの位置信号のみを用いた。

はじめ、単バンチビーム(0.8mA)を入射し、iGpシステム自身のタイミング及びビームに対するフィードバックタイミングあわせ(1 turn delay)をフィルターを1tap(スルー)モードにして行い、安定性を確認後フィルターを8タップFIRにし、マルチバンチ通常フィルパターンに戻し、HER単独で0mAから徐々に200mA、400mA、600mA、800mAと蓄積を行い、ゲインバランスなどを微調しながらビーム状態を確認した。信号スペクトラム、ビーム位置信号及びフィードバックパワーいずれにもビーム不安定の兆候はなく、入射及び蓄積に問題が無いことを確認し

た。

800mA単独ビーム蓄積状態で、transient-domain解析を水平鉛直両方向にそれぞれ行った。図3に、水平方向transient-domainモード解析を示す。この場合、feedbackを11ms OFFにし、その後ONにしている。

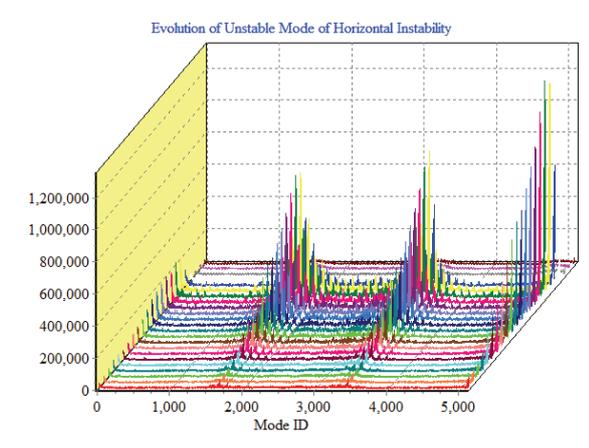


図 3 水平方向の growing transient と damping transientの様子例

この例の場合、フィルパターンが3バケツスペースと4バケツスペースの組み合わせのため、モードにも複雑な折り返しが出ているが、もっとも強力な不安定モードは5101付近にあることがわかる。このモードに着目し、不安定の成長、フィードバックによる減衰を表示すると図4の様になる。これから、不安定の成長時定数は2.5msから3ms程度、それに対して減衰時定数は-0.6ms前後であることがわかる。

また、各バンチで不安定成長時のベータトロン振動数とフィードバックによる減衰時の振動数を比較することで、フィードバックがresistiveであるかわかる。一般のFFTでは特に減衰時のデータ点数が少なく、精密な解析が不可能なので、MEM(Maximum Entropy Method)を使い解析を行った。図5に、鉛直方向で、横軸ベータトロン振動周波数、縦軸に頻度を取り、不安定成長時及び減衰時の比較の例を示す。約0.1kHzほどのずれがあり、わずかにreactiveであったことがわかる。

最後に、LERにも通常パターンでビーム蓄積を行い、衝突時の振る舞い及びluminosityを確認した。衝突時LERでは鉛直方向のフィードバックゲインを上げると鉛直方向ビームサイズが太り、ルミノシティが低下する現象が確認されているが、今回HERでも鉛直方向フィードバックゲインを下げるとルミノシティが上がる現象が起きた。但し、鉛直方向ビームサイズはフィードバックゲインを上げると下がる方向で、また蓄積完了後時間が無い状態での調査であったので、ビームチューニングの方がより大きな影響を持っていた可能性もある。次回以降、より詳しく調査を行う予定である。

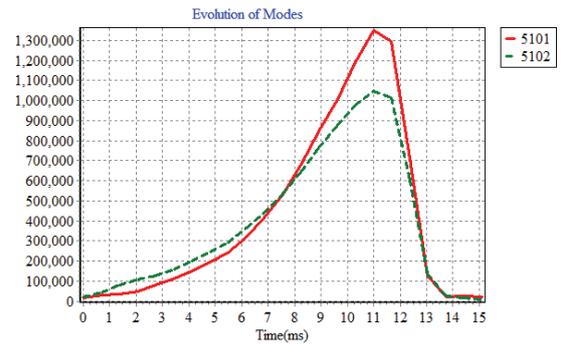


図 4 水平方向mode id 5101付近の時間変化

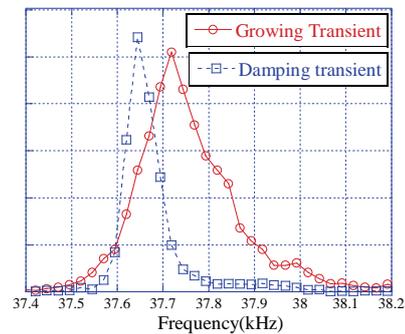


図 5 不安定成長時減衰時の振動数分布

#### 4. まとめ

フィードバック用汎用デジタル信号処理回路iGpを国際共同開発し、実際にKEKB-HERにインストールし、個別バンチフィードバックの実証を行った。システム及びfirmwareに関しては、なお開発途上ではあるが、現時点のものでも十分な性能と実用性を有することがわかった。KEKBリングでは、今後すべての2タップフィルターをiGpに置き換え、長期試験を行いつつ開発を続ける予定である。

本共同研究は、高エネルギー分野における日米科学技術協力事業(次世代高ルミノシティコライダのための開発研究(代表:生出勝宣))の補助をうけ遂行されている。フィードバック実験に当たり、KEKBコミショニングチームのご理解とご協力をいただいた。感謝する。

#### 参考文献

- [1] M. Tobiya and E. Kikutani, "Development of a high-speed digital signal process system for bunch-by-bunch feedback systems", Phys. Rev. ST Accl. Beams, 3, 012801 (2000)
- [2] J. D. Fox et al., in Proceedings of the 1999 Particle Accelerator Conference, p.636.