

## J-PARC 主リングにおけるイントラバンチ・フィードバックの運用の現状 STATUS OF THE INTRABUNCH-FEEDBACK FEEDBACK AT J-PARC MR

外山毅<sup>#A)</sup>, 仲村佳悟<sup>B)</sup>, 飛山真理<sup>A)</sup>, 岡田雅之<sup>A)</sup>, 陳榮浩<sup>A)</sup>, 菖蒲田義博<sup>C)</sup>, 帯名崇<sup>A)</sup>, 小関忠<sup>A)</sup>  
Takeshi Toyama<sup>#A)</sup>, Keigo Nakamura<sup>B)</sup>, Makoto Tobiyama<sup>A)</sup>, Masashi Okada<sup>A)</sup>, Yong Ho Chin<sup>A)</sup>, Yoshihiro  
Shobuda<sup>C)</sup>, Takashi Obina<sup>A)</sup>, Tadashi Koseki<sup>A)</sup>  
<sup>A)</sup> KEK, <sup>B)</sup> Kyoto University, <sup>C)</sup> JAEA

### Abstract

One of the present obstacles for intensity upgrade of the J-PARC Main Ring is transverse collective instability. We have been developing so-called intra-bunch feedback system and in operation during injection flat bottom since last year. But recent beam intensity up grade pushes us to improve further the system, namely feedback during acceleration. The delay in the feedback loop is changed stepwise triggered by external pulses. We are examining quick trigger timing determination by matching the bunch shape in the controller ("iGp12") to the one from the exciter (kicker) and estimating differences of slice markers in time.

### 1. はじめに

J-PARC Main Ring (MR) のビーム強度増強の制限要因の一つは、現在、横方向インスタビリティである。このインスタビリティを抑制するため、イントラバンチ・フィードバック・システムを構築し、昨年、3GeV 入射での横方向不安定をダンピングしている<sup>[1][2][3][4]</sup>。その後ビーム強度の増強が行われ、加速中の横方向不安定性が問題となってきたため、これをダンピングすることが、さらなるビーム強度増強のために必須となっている。ここでは、加速に伴う位相変化の影響を簡便にとり込み調整する方法について述べ、実験結果を報告する。

### 2. システム

Transverse intra-bunch feedback system は、Figure 1 に示すように水平・垂直方向のビーム位置を検出するビーム位置モニタ (BPM)、信号処理回路 (iGp12<sup>[4]</sup>)、高周波電力増幅器、およびキッカーから構成されている。機器の詳細と MR 入射期間 (3 GeV, 固定周波数) での動作状況は文献<sup>[1][2][3][4]</sup>に詳述されている。

iGp12 では、1 つの RF バケツを 64 分割したスライスで BPM 信号をフィルタを通してゲインと位相を調整する。その FIR フィルタは

$$H(f) = \sum_{n=1}^4 a_n e^{-j2\pi fn} \quad (1)$$

で表される 1 ターン遅れ・4 tap のものを使用している。動作例を定性的に示す。1 つのスライスに着目した場合のフィルタ入出力波形は、ベータトロンチューン (端数) が 0.4 の場合で、フィルタ位相が正しく設定されていない場合、Figure 2.a のようになる。左図の黒点がターン毎の入力信号で、青色の

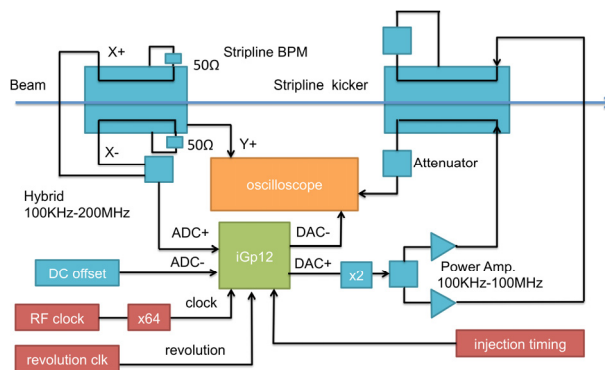


Figure 1: Schematic diagram of the transverse intra-bunch feedback system in J-PARC MR.

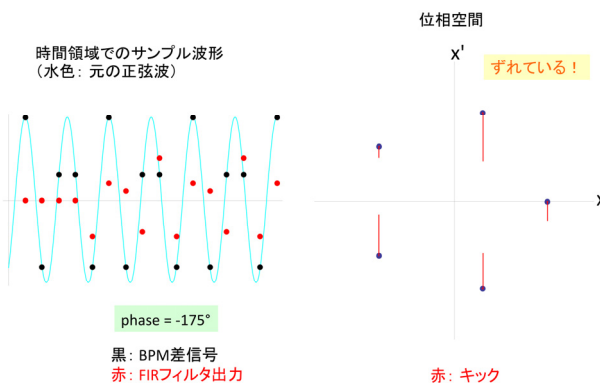


Figure 2.a: Input-output characteristics of the 4-tap FIR filter. The phase is not tuned properly.

補助線によりサイン波をサンプリングしていることを示している。赤点が FIR フィルタの出力である。右図に位相空間内での当該スライスの座標 (黒点) とキック (赤線、大きさは相対値) を示す。キックが不適正であることがわかる。例えば、キックが不

<sup>#</sup> takeshi.toyama@kek.jp

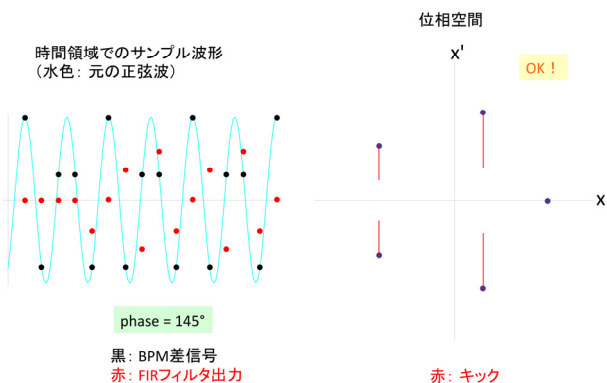


Figure 2.b: Input-output characteristics of the 4-tap FIR filter. The phase is tuned properly.

要な  $x$  最大の位置 (右端) でも有限の値でキックしている。正しい設定値  $90^\circ$  の場合は Figure 2.b のように適性なキックがビームに加えられる。

ベータatronチューンが大きく変わらない限り、上記のような FIR フィルタのパラメータ (ゲイン、位相) は変える必要が無い。今回は加速中でもベータatronチューン一定なのでフィルタ・パラメータも不変とした。

### 3. 加速中の調整と結果

加速開始からは、ビームの速さ (周回周波数、RF 周波数) ・シンクロtron位相が変わるために、信号伝播時間の変化に対応することが必要になる。ここでは、

- ・ iGp12 のサンプリング・クロック周波数を RF 周波数に同期させる (RF CLK の通倍)
- ・ 伝播時間を iGp12 内のディレイ値で調整することで対応した。iGp12 内では 16 種類のディレイのプリセット値を格納しておき、外部からのトリガ信号で切り替えることができる。3GeV 入射から 30GeV フラットトップまでで、周回周波数は 2.9% 増加する。

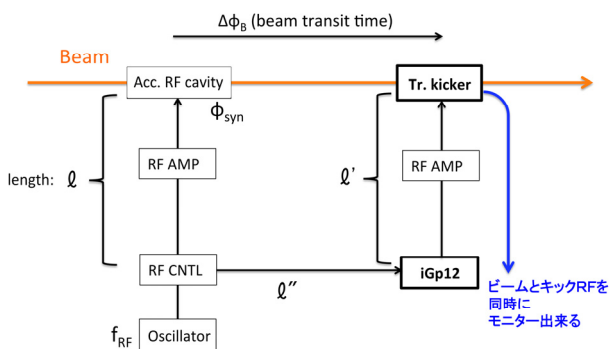


Figure 3: Signal flow in the intra-bunch feedback system.

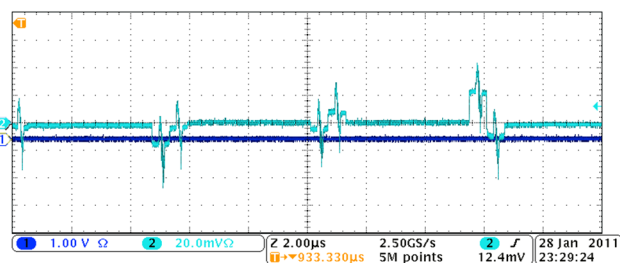


Figure 4: Timing adjust of a bunch-by-bunch feedback is performed with a stripline kicker waveform as shown above, where the bunch signal (bipolar due to BPM's differentiating response) is superimposed on the feedback pulse (stepwise). Each step corresponds to the one RF bucket. The delay is adjusted so as to fully overlap each other.

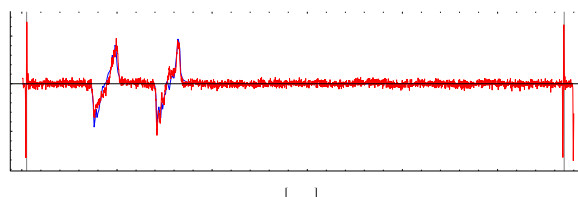


Figure 5: Timing adjust of an intra-bunch feedback is performed with a stripline kicker waveform (red colored), where the bunch signal (bipolar due to BPM's differentiating response) is superimposed on the "marker". Blue curve is taken by iGp12. Each slice corresponds to the one 64th of one RF bucket time duration. The delay is adjusted so as to fully overlap the signal and marker.

バンチ毎フィードバック (bunch-by-bunch feedback) では、Figure 4 に示すように、微分されたバンチ信号と階段状のフィードバック信号とを、ストリップライン・キッカーからの信号を見ながら合わせることができる。一方イントラバンチ・フィードバックでは、各スライスのビーム信号は複雑なため上記のような方法は困難である。

タイミング (ディレイ) を調整する方法としては、下記のようなものが考えられる。

- ・ iGp12 の局所励振機能を使用してスライス毎のビーム伝達関数を求める方法。加速中の各時刻で測定が必要となる。
- ・ iGp12 のマーカー波形発生機能を使って、ビーム信号とマーカーの時間関係からディレイ値を求める方法。iGp12 内では  $i$  番目のスライスで  $i$  番目に対応するビーム信号が観測される。ストリップライン・キッカーでは、 $i$  番目のスライス・マーカー (矩形信号) と対応するビーム信号の重畳波形 (信号) が観測される。両者のスライス (マーカー - ビーム信号) の時間差が等しくなるように、ディレイを調整するのである。

後者では、原理的には、iGp12 内信号とストリップライン・キッカーの信号波形を 1 加速分取り、波形解析するだけでよく、所要時間が少ないので、こ

の方法を試験した。

実際上の問題点としては、

- 加速中のビーム信号と基準 RF クロックとの時間関係がビーム強度などの運転条件によって変更される (ことがある)。
- 大強度ビームではインスタビリティが発生しやすくなるので、安定化した状態 (フィードバック ON) での調整が必要になる。
- iGp12 内で取得される BPM からのビーム信号と、ストリップライン・キッカーで観測されるビーム信号とで、応答の違いによる相違がある。

上記の通り、フィードバック調整してインスタビリティを抑制しないと大強度ビーム加速出来ないが、大強度ビーム加速の条件を決めないとフィードバック調整が出来ない、というジレンマを抱えるが、今回は、インスタビリティを抑制できるクロマティシティだがビームロスのある条件で信号波形を取得し、フィードバック調整時にはビームロスの小さいクロマティシティを使った。

また、ストリップライン・キッカーに送ったフィードバック信号はビーム信号と位相が異なるため、調整のためには雑音となるが、BPM の和信号を取ることで相殺した。さらに、加速全期間の信号波形の取得が、メモリ長の制限のためできないので、実際には数ショットに分割して取得した。

調整の前後で、Figure 6 に示したとおり、水平方

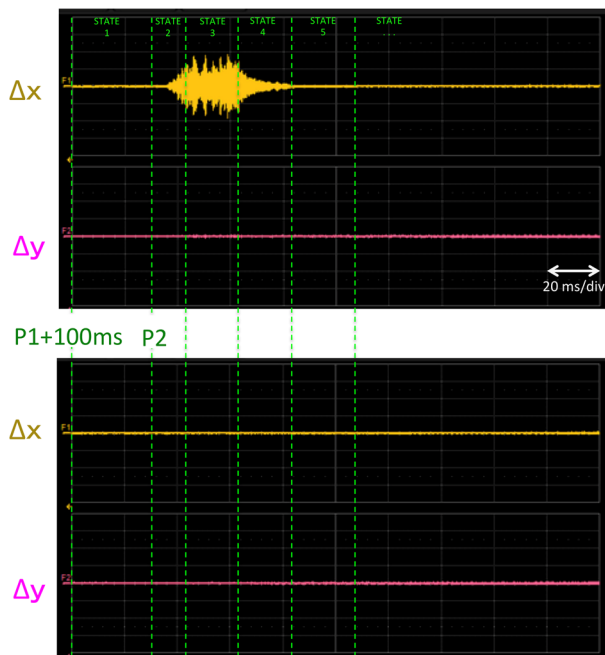


Figure 6: Upper plot: intra-bunch feedback off. “P2” is the acceleration start timing. The instability in the horizontal plane occurred during acceleration.

Lower plot: intra-bunch feedback on. The instability in the horizontal plane disappeared.

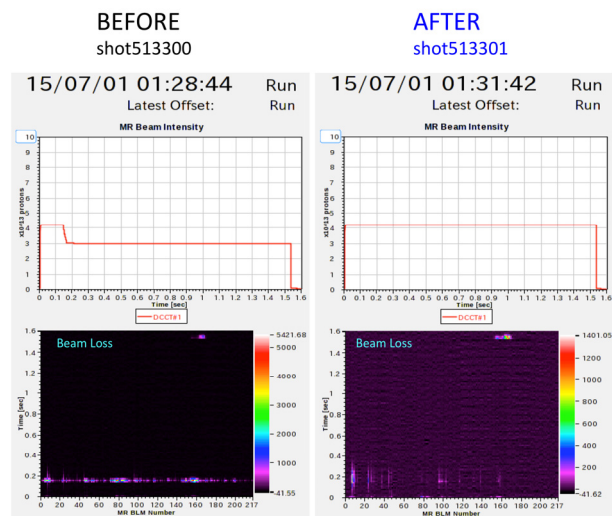


Figure 7: Left plots: intra-bunch feedback off. The instability caused beam loss during acceleration. Upper plot: DCCT waveform (beam intensity), lower plot: BLM waveform. A few 1000 of beam loss counts are seen along the MR at  $\sim 0.15$  s.

Right plots: intra-bunch feedback on. The DCCT waveform is constant. Ordinary beam loss of a few 100 counts or less occurred.

向のインスタビリティを抑制できた。フィードバック OFF / ON でのビーム強度を Figure 7 に示す。

#### 4. まとめ

加速中の横方向インスタビリティの抑制 (水平方向) / 調整 (垂直方向) が、波形比較により、P2 +  $\sim 80$  ms まで完了した。

加速全期間の調整が今後の課題であるが、今回の試験で基本的問題は解決したと考えられる。

本研究は、MEXT 科研費 25105002 新学術領域研究「ニュートリノフロンティアの融合と進化」の助成を受けたものである。

#### 参考文献

- [1] Y. Kurimoto et al., “Bunch by bunch feedback system in J-PARC MR”, DIPAC2011, Humburg, May 2011, p482 (2011).
- [2] Y. H. Chin, et al. ,“Analysis of transverse instabilities observed at J-PARC MR and their suppression using feedback systems“ NA-PAC2013, Pasadena, September-October 2013, p.27, (2013).
- [3] K. Nakamura et al., “Intra-bunch feedback system for J-PARC MR”, IPAC2014, Dresden, June 2014, p.2786 (2014).
- [4] K. Nakamura et al., “PERFORMANCE EVALUATION OF THE INTRA-BUNCH FEEDBACK SYSTEM AT J-PARC MAIN RING”, IBIC2014, Monterey, CA, USA, p.277 (2014).