

A SYSTEM FOR MONITORING OF THE TRANSVERSE INJECTION ERROR AND BETATRON TUNE IN J-PARC MR

Shuichiro Hatakeyama^{*A)}, Takeshi Toyama^{B)}, Masaki Tejima^{B)},

^{A)} Japan Atomic Energy Agency (JAEA), 2-4 Shirane Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1195 Japan

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK), 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801 Japan

Abstract

The beam commissioning of J-PARC MR (Main Ring) started in 2008. The current beam power of the user operation is 40kW-70kW which corresponds 1/10 of the designed value of 1st stage. One of the hurdle to clear for the power up is the beam loss at the injection which is mostly originated from the error of bending angles of RCS-extraction and MR-injection magnets. Therefore it is required to monitor continuously the transverse injection error. It can be calculated using beam bunch positions at the injection. For this purpose a dedicated digitizer is used to acquire the waveform of BPM. It is also monitored the betatron tune using the same digitizer. Processing the injected 93 turns beam bunch positions by FFT, it is realized continuous monitoring with 3.52 s operating cycle. When determining the beam bunch position, the digital-high-pass filtering is adapted to the waveform of BPM to remove the slow component noise.

J-PARC MR 横方向の入射エラー及びベータトロンチューンモニターシステム

1. はじめに

J-PARC の MR (Main Ring) は 2008 年からビームコミッションが始まり、現在第 1 期の設計目標の約 1/10 の 40kW-70kW で定常運転を行っている。ビーム強度増大のハードルの一つは、入射直後のビームロスである。その原因の一つは RCS の出射機器及び MR 入射機器の偏向角度の誤差で、それを監視するために横方向の入射エラーを常時モニターすることが要求された。本稿では MR 入射直後の BPM を用いてビームバンチの位置を計算し、入射エラーとベータトロンチューンを常時モニターするシステムについて述べる。

2. 測定系

入射エラー測定用の BPM は、MR の COD 測定用の対角線カット型 BPM^[1] を用いる。水平方向測定用に収束型四極電磁石 (QFR-006, QFR-008)、垂直方向測定用に発散型四極電磁石 (QDR-007, QDR-009) の前部に設置された合計 4 台の BPM を使用する。図 1 はそのうち水平方向を測定する BPM の 2 つの電極からの信号処理系を示す。BPM の信号は、コモンモードのノイズ対策のためのチョークコアのコイル (~ 6mH) を通った後、専用の処理回路である BPMC のアナログモジュール(トランス、可変減衰器、可変増幅器、ローパスフィルター、バッファアンプ) を通り 2 系統に分かれる。一方は COD 測定を行うために BPMC の ADC と FPGA で FFT 処理される。他方は BPMC の筐体背面のレファレンス出力端子を通してビームバンチ波形測定用のデジタイザー (YOKOGAWA WE7118) に接続される。WE7118 はサンプリング 100MS/s、分解能 12bit、レコード長 50000 サンプル/ch で、入射直後の 3GeV のビームで 93 ターンの波形を 3.52 秒周期で処理できる。波形データは LAN 経由で EPICS¹ の IOC によって取り込まれ、状態遷移のシーケンスを記述できる SNL(State Notate Language) を

* hatake@post.j-parc.jp

¹ ANL.LANL で開発された加速器や大型測定装置のための分散型制御システム及びソフトウェア開発環境

用いて、位置情報やベータトロンチューンが計算される。

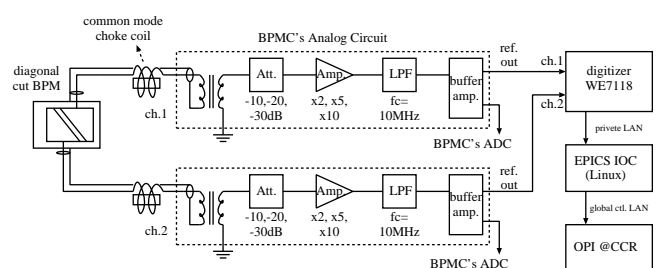


図 1: 入射エラー、ベータトロンチューン測定系

3. MR 入射のトリガータイミング

MR はハーモニクス 9 で、キッカー電磁石の立ち上がり時間の関係で最大で 8 バンチまで入射可能である。RCS(ハーモニクス 2) からは 1 回に 2 バンチ来るから 4 回入射となり、それぞれ RCS の 25Hz(40ms) のキッカータイミングに合わせて K1, K2, K3, K4 入射と呼んでいる。2010 年 7 月までの MR の定常運転では K2, K3, K4 の 6 バンチ入射である。入射エラー測定では、WE7118 のトリガーを K2 入射に合わせてあるため、測定レンジの 500μs(93 ターン)の間では、リング内には 2 つのバンチしかない。この 2 つのバンチはタイミングの早い方から、前バンチ、後バンチと呼んでいる。

4. ビームバンチ位置測定

4.1 デジタル HPF によるノイズ除去

MR の BPM は、COD 測定の場合は、FFT 処理により RF 周波数の 2 倍高調波を検波することによりコモンモードチョークで取り除ききれない電磁石からの低周波のノイズを分離している。一方でビームバンチの位置測定では、時間領域の波形からパルスのピークを検出し、その振幅を計算しなければならない。このため、

デジタル化された波形を、10MHzのカットオフ周波数に相当するデジタル・ハイパスフィルタ (HPF) で処理し低周波のノイズを取り除いた。実際に使用したデジタル HPF のソースコードを図 2 に示す。この関数の引数は、ndata(=50000) がレーコード長、wfin が入力波形の配列、wfout が出力波形の配列、dt(=0.01μs) がサンプリング時間、fc(=10MHz) がカットオフ周波数となる。

```
void BPM_HPF(int ndata, float *wfin, float *wfout,
             float dt, float fc) {
    float alpha = 1./(1.+ 2*3.14159265*fc*dt);
    int i;
    wfout[0] = wfin[0];
    for(i=1; i < ndata; i++) {
        wfout[i] = alpha*(wfout[i-1]+wfin[i]-wfin[i-1]);
    }
}
```

図 2: デジタル HPF の C 言語での実装

図 3 に HPF なし (青) と HPF あり (赤) の BPM の波形を示す。横軸はサンプリングクロック、縦軸は ADC のカウント数である。この図では 2 バンチのビームの最初の 2 ターンが表示されている。BPM の電極信号は元々微分波形で双極パルスであるが、HPF を通るとさらに微分されて、正側に 2 つ、負側に 1 つのパルスとなる。図 3 は比較のためにノイズの大きい場所の BPM を例として示したが、実際に入射エラー測定用に使用した BPM(address=6,7,8,9) では、低周波のノイズはこの図の 1/10 程度である。

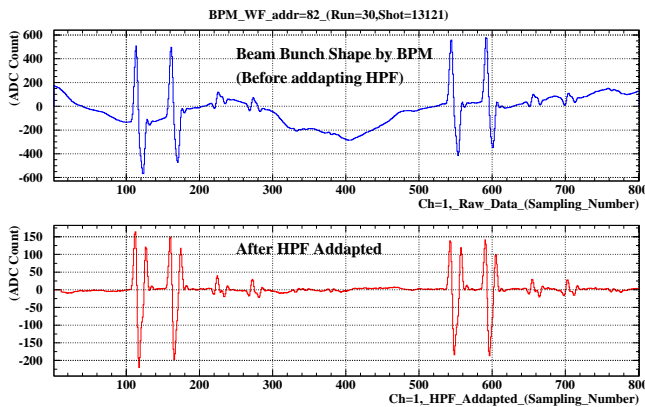


図 3: BPM 出力波形、HPF なし (青)、HPF あり (赤)

4.2 ビームバンチの位置計算

ビームバンチの位置計算は、例えば水平方向の場合、BPM の左右の電極の振幅値を A_L, A_R 、感度係数を k_x とすると、 $x = k_x(A_R - A_L)/(A_R + A_L)$ のように求めることができる。ここで、HPF なし、ありで図 4 に示すように 2 通りの計算を行った。

- (HPF なし) 単純に peak-to-peak の振幅を計算。
 $A_i = V_{1,i} + V_{2,i}$, ($i = L, R$)
- (HPF あり) パルスの領域を積分して振幅を計算。
 $A_i = S_{1,i} + S_{2,i} + S_{3,i} = 2(V_{1,i} + V_{2,i})$, ($i = L, R$)

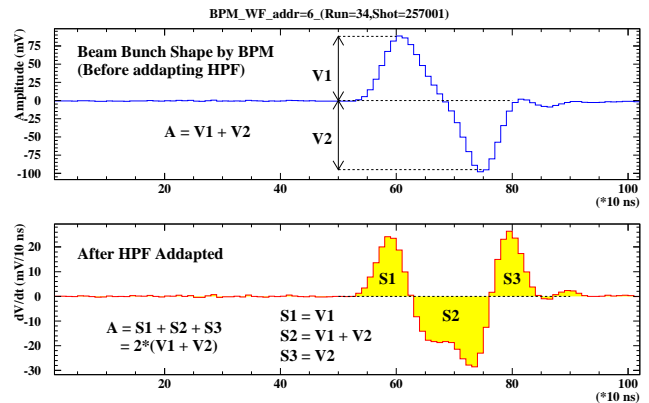


図 4: BPM パルス振幅、HPF なし (青)、HPF あり (赤)

4.3 3BPM 法による位置精度の見積り

HPF なし、あり、それぞれの方法について、3BPM 法 [2] を用いて位置精度を計算した。データは BPMC の波形モード 6.25ms(1100 ターン)を使用した。図 5 は、横軸が BPM のアドレス番号、縦軸が 3BPM 法で計算した位置精度で、上のグラフが水平、下が垂直位置精度である。青いプロットが HPF なし、赤いプロットが HPF ありの 1100 ターン分の平均値で、誤差棒は標準偏差である。垂直位置精度に関しては、違いは殆どみられないが、水平位置精度に関しては HPF ありの方が良いことが分かった。

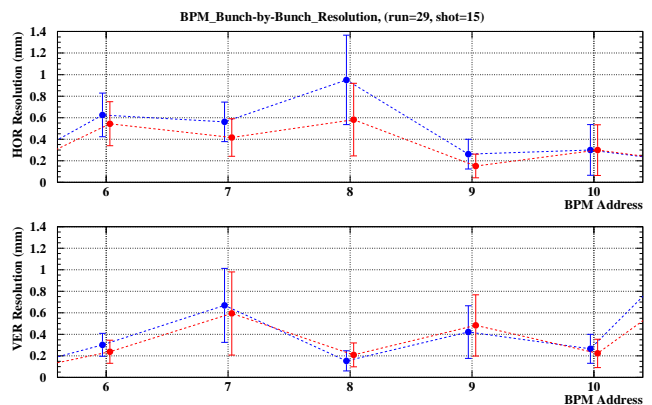


図 5: 3BPM 法による位置精度、HPF なし (青)、HPF あり (赤)

5. ベータトロン振動測定

5.1 最小二乗法による測定

図 6 にアドレス 8 の場所の BPM で測定された水平方向のビームバンチ位置の時間変化を示す。上段の青いプロットが前バンチ、中段の赤いプロットが後バンチ、横軸はターン数、縦軸が位置 (mm) である。図中の点はデータでそれをつなぐ線は、正弦関数

$$x_n = a \cdot \sin(2\pi\nu \cdot n + \delta) + c \quad (1)$$

で 10 ターン毎にフィットした結果を重ねたものである。ここで n はターン数、 x_n はターン n の位置で、フリーパ

ラメータは、振幅 a 、ターンあたりの振動数 ν ($0 \leq \nu < 1$)、初期位相 δ 、位置のオフセット c である。図の下段は横軸 ν 、縦軸 a をプロットしたもので、左の青い点が前バンチ、右の赤い点が後バンチである。 ν はベータトロンチューンの小数部を表し、その平均値は、前、後バンチで 0.410、0.409 とほぼ一致している。一方、振幅 a は、横方向の入射エラーに相当し、その平均値は、前、後バンチで 8.09mm、4.46mm と大きくかけ離れ、初期位相も 180 度近くずれているのが分かる。これは RCS キッカーパルスのフラットトップのリング部分に前バンチ、或いは後バンチのどちらかが乗ってしまい、取り出しの軌道が両者で異なるからだと考えられる。実際、RCS のキッカーのタイミングを微調整してリングの位置からずらせば、前バンチと後バンチの振幅を揃えることができる。また、MR の入射セプタム、キッカーの偏向角度を微調整し最適化^[3] することにより入射エラーは 0.5mm 程度に抑えることができる。

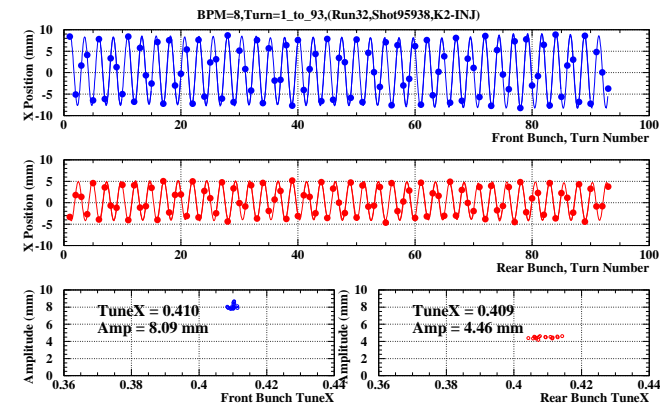


図 6: ベータトロン振動、前バンチ (青)、後バンチ (赤)

5.2 FFT による測定

最小二乗法のフィットは時間がかかる上、フィットに失敗することが多いため、定常運転時のオンラインモニターでは、図 7 に示すように、ターンあたりのバンチの位置を離散フーリエ変換して振幅とベータトロンチューンを求めた。離散フーリエ変換のツールとして、MIT で開発されたフリーソフト FFTW (ver.3.1.2) に Han 窓関数を当てはめ使用した。図 7 の上段 (青)、下段 (赤) はそれぞれ前バンチ、後バンチのベータトロンチューンと振幅 (単位を mm に規格化) で、最小二乗法で求めた値とほぼ一致している。

6. オンラインモニター OPI

OPI として EPICS の標準 GUI ツールである edm を使用した。図 8 上段は、横方向の入射エラーとベータトロンチューンをリアルタイムで表示し、チューンダイアグラムにプロットしている。下段は、BPM6、8 の水平方向のバンチ位置を位相空間上にプロットしている。

7. まとめ

J-PARC の MR の横方向の入射エラーとベータトロンチューンをオンラインでリアルタイムに測定するシステ

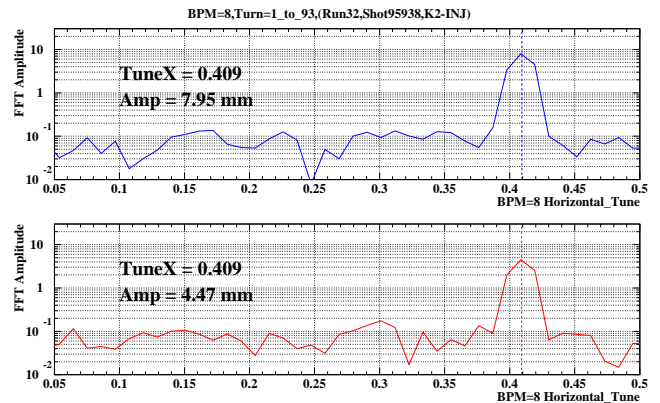


図 7: FFT による測定、前バンチ (青)、後バンチ (赤)

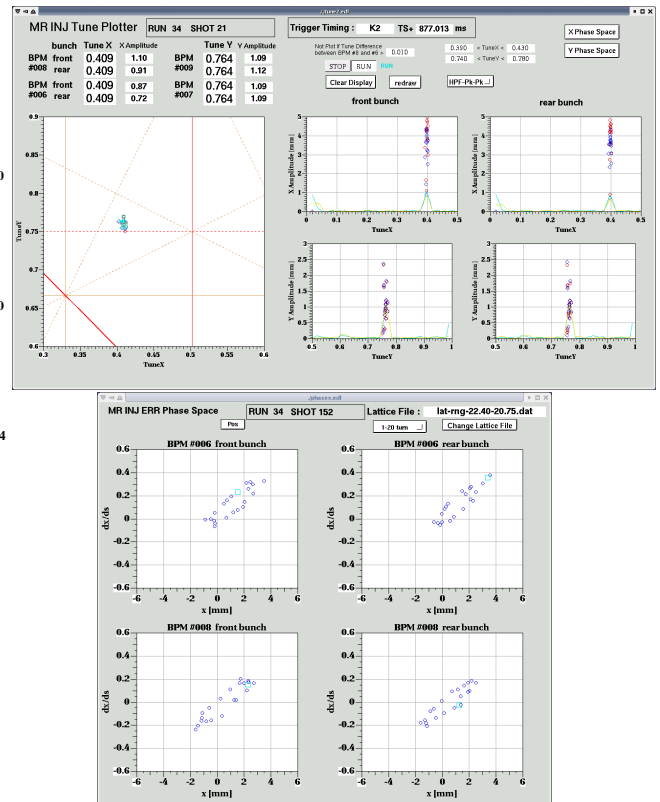


図 8: チューンダイアグラムと位相空間プロット

ムを開発した。このシステムは 2010 年 5 月から運用され現在のところ安定して稼働している。

参考文献

- [1] T. Toyama, et. al., "Beam Position Monitor for J-PARC Main Ring Synchrotron", DIPAC2005, Lyon, France, 2005, POW013, p.270.
- [2] S.Hiramatsu, "Beam Instrumentation for Accelerators", Expert training for engineering staff of KEK, 2003, p.115, Japan.
- [3] G.H.Weil, et.al., "Beam Injection Tuning of the J-PARC Main Ring", Proceedings of IPAC10, 2010, Kyoto, Japan.