

BPM signal processing circuit for RF Feedback in J-PARC MR

Dai Arakawa^{1,A)}, Shigenori Hiramatsu^{A)}, Takeshi Toyama^{A)}, Yoshinori Hashimoto^{A)},
Masaki Tejima^{A)}, Kenichirou Satou^{A)}, Makoto Tobiyama^{A)}, Msahito Yoshii^{A)}, Seishu Lee^{A)},
Kotoku Hanamura^{B)}, Shuichiro Hatakeyama^{B)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

^{B)} Mitsubishi Electric System & Service Co. Ltd

Abstract

Beam Position Monitor (BPM) for RF Feedback system is indispensable for the stable beam acceleration in the proton synchrotron. We developed and installed a new BPM signal processing system for RF feedback in J-PARC MR. In the first beam commissioning, the prepared processing circuit did not work properly. One reason was the induced noise from magnet power supplies. Another was that the signals from pickup electrodes were too small duty factor for RF detector circuit. Both difficulties were solved by shaping the signal with the band-pass filters and amplifiers. The beam orbit has been obtained successfully with the improved circuit.

J-PARC-MR RFフィードバック用BPM信号処理回路

1. はじめに

陽子シンクロトロンで安定にビームを加速するためには、BPM (Beam Position Monitor) で得られたビーム位置情報を用いて加速高周波 (RF) にフィードバック制御を行なうことが不可欠である。

上記目的達成のためJ-PARC MRに設置したRFフィードバック用BPM信号処理回路のブロック図を図1に示す。

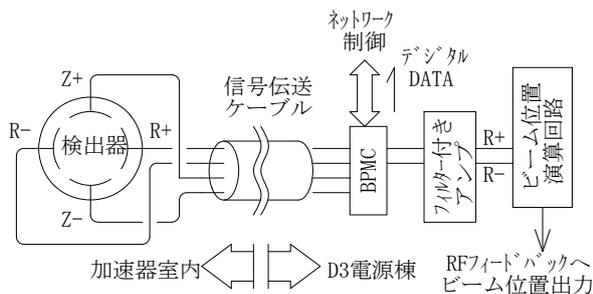


図1 J-PARC MR RFフィードバック用BPM
ブロック図

検出した信号はD3電源棟に伝送され、BPMCと称する信号処理回路に入力される。BPMCの構成は入力信号のレベルに応じて感度切り換えができるアンプで信号を受けた後、バンチ信号をそのまま出力するバッファ出力と、ADCによってデータを取り込んで解析を行なう系統に分岐される。

バッファ出力信号をアナログ処理することでフィードバック用のBPMはビーム位置信号を得る。上記システムを組みビーム位置測定を行なった結果、良好な測定を行なうことができたので報告する。

2. ビーム位置検出器出力信号

J-PARC MRのビーム位置検出器の概略は下記の通りである^[4]。

真空容器全長：330mm

真空容器と電極のギャップ：1mm

電極内径：φ130mm

電極外径：φ134mm

電極長：100mm (斜めカット：2分割)

電極数：水平方向及び垂直方向の2対 (4枚)

電極1枚あたりの静電容量：約210pF (実測値)

J-PARC MRに入射された直後のビームバンチ波形は運転条件によって変化するが、幅が約60nSec程度のパルス波形で、MRに1パルス入射モードで運転した場合、約5.4μSecごとの繰り返しでビームバンチが検出器を通過する。検出器設計当初は検出器のすぐ近傍に外付けのコンデンサーを取り付け、静電容量を増やすことで低域時定数を増やし、ビームバンチの時間構造と相似形に近い信号を得る予定であった^[7]。しかし、放射線環境での使用部品点数が増えると故障率増大や、加速器運転初期の強度を絞った運転時には外付けのコンデンサー付加による感度低下に伴うS/Nの悪化などの懸念事項があったため、検出器と50Ωケーブルを直結して測定する方針に設計変更がされた。

このためBPM検出器の低域カットオフ周波数は約17MHzとなり、検出されるビームバンチ信号は微分波形となった。(図5：CH1、CH2参照)

¹ E-mail: dai.arakawa@kek.jp

3. ノイズの除去

電極で検出した信号の伝送には、シールドの処理やコモンモードノイズ対策など、細心の注意を払い雑音対策を行なっている。しかし雑音測定の結果^[5]、図2に示す通りRF周波数である1.7MHz近辺の周波数帯域には電源由来等の誘導雑音が大きいことが確認された。RFの2倍波である3.4MHz付近の方が1.7MHz近辺より約1桁雑音が低かったため、RFの2倍高調波に絞って信号処理を行なうことにした。

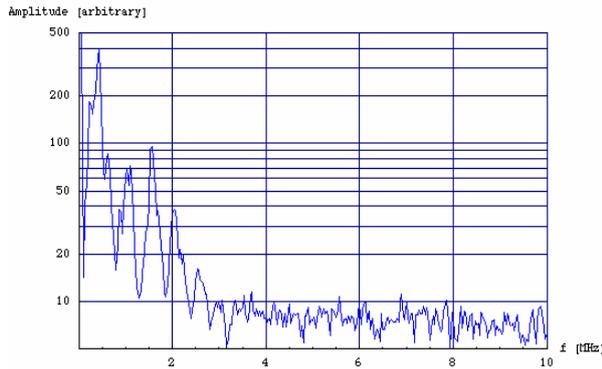


図2 加速器室内～D3電源棟間の伝送ノイズ分布
ケーブルに誘導される雑音の周波数 (#133BPM、R+電極)

4. フィルター付きアンプ

設計時にはビーム位置演算回路とBPMCを接続して信号処理を行なう予定であったが、すでに述べた様に検出器の低域時定数変更の影響や、最初にMRで行なったマシンスタディー時には1パルスモードで運転を行った影響を受け、ビーム位置演算回路内蔵の高周波全波整流回路に入力される信号の電圧と時間の積 (duty) が不足し、ビーム位置を十分に判別できるだけのS/Nを得ることができなかった。

この時BPMCのバッファ出力ですでにバンチ信号のピーク電圧は400mV-ppであったことから、dutyが不足するからと言って単純に増幅すると、後段の回路がピーク電圧で飽和をする可能性が高く、又、増幅度を飽和寸前にしてしまうとダイナミックレンジが狭くなってしまう。そこで図3に示す回路構成のフィルター付きアンプを開発した。

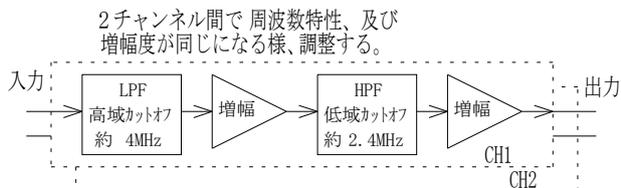


図3 フィルター付きアンプのブロック図

増幅する前に急峻なカットオフを持たせたLPF (ローパスフィルター) を入れてピーク電圧を抑制し、増幅後にHPFで低周波側の雑音をカットし、さらに増幅してから出力する構成とし、3.4MHz近辺の増幅度は約25倍に設計した。

フィルターの通過帯域は前項目で述べた様に、雑音を除去の観点から1.7MHzはカットし、RFの2倍波である3.4MHz付近を通過させるものとした。

又、ビームを加速させると3%程度ではあるがRF周波数がスweepするので、周波数帯域幅の中ではなるべく平坦な周波数特性を保つ様に設計し、出来る限り2チャンネル間の特性を揃える様に調整した。

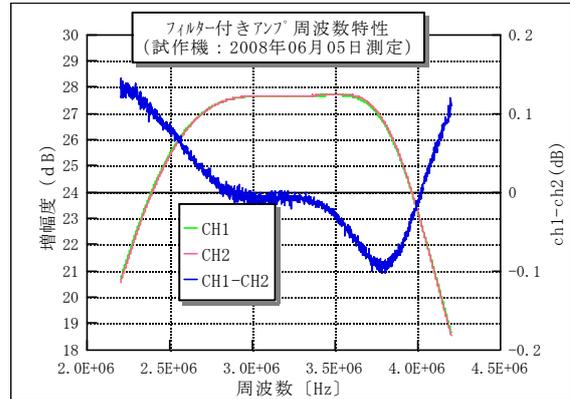


図4 フィルター付きアンプの周波数特性

フィルター付きアンプの測定結果は図4の通りで、1dB/divのスケールで表示するとチャンネル間の差が判別できないほど特性が一致しているため、CH1とCH2の差の表示は2Y軸を用いて拡大表示している。

-3dBカットオフの帯域内でのチャンネル間バランスは概ね±0.1dB以内の範囲に入っており、この数値をビーム位置の測定誤差に換算すると±0.5mm以内の精度を保ち処理ができることを示している。

図5は、フィルター付きアンプの入出力波形のdutyを比較するために取ったDataである。ただしBPMCは各電極に1回路しかバッファ出力がないため、フィルター付きアンプに入力した信号そのものは見えないため同型ではあるものの別な電極からの信号を比較対照として表示したものである。



図5 BPMC出力信号波形とフィルター付きアンプの出力波形の比較写真

BPMC出力信号
(CH1=R+、CH2=R-、BPM#140、200mV/div)

フィルター付きアンプ出力信号
(CH3=R+、CH4=R-、BPM#133、500mV/div)

図5から、入力信号のdutyは小さいが、出力信号はduty（絶対値を取った電圧×時間積）が大きく増えていることが一目瞭然である。

5. ビーム位置演算回路

ビーム位置演算回路のブロック図を図6に示す。高速オペアンプを用いた理想ダイオード回路による高周波全波整流回路と、リップル除去フィルタを用いて検波し、入力信号の強弱に比例した直流を含んだ低周波の電圧レベル信号に変換している。

検波後の割り算回路は^[6]を踏襲しており、加算回路、減算回路、割り算回路、によって演算をし、ビーム位置の情報を得る構成になっている。

尚、入力信号が無い場合には出力は不安定になってしまうため、A+Bの信号が閾値を越えた場合のみ出力を有効にしている。

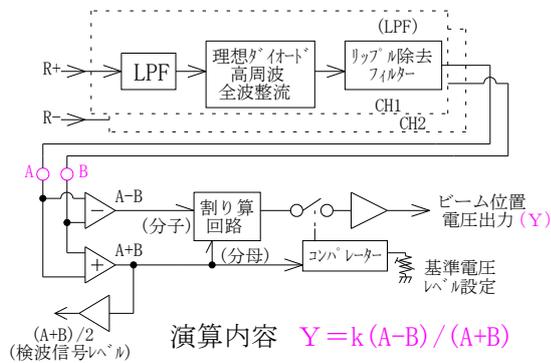


図6 ビーム位置演算回路、ブロック図

6. ビーム位置測定結果

J-PARC MRのビームを以上述べたシステムを用いて測定した結果を図7に示す。



図7 J-PARC MRのビーム測定結果

CH3 検波出力レベル” (A+B)/2” (100mV/div)

CH4 ビーム位置信号出力(500mV/div)
(ビーム位置換算値=2.5mm/div)

R1 違うショットで取ったビーム位置信号
(ビーム位置換算値=2.5mm/div)

図7で見られる周期が短く振幅が約5mmの振動はシンクロトロン振動であり、周期が長く約2mmの振幅を持った振動は50Hzある。当初50Hzの振動が確認された時、BPMの信号処理回路に雑音が混入した可能性を疑ったが、全ての電磁石やRFが動作中にビームが入射されていない条件で検波出力を測定しても雑音がほとんど確認できなかった。従ってBPMの信号系へのノイズ混入はなく、現段階でリップルの原因は電磁石電源の残留リップルによって実際に50Hzの成分でビームが振動している可能性が高いと考えられており、裏付けの調査が電源グループ等によって進行中である。

このシステムはRFフィードバック用として開発したものであるが、瞬時にビームの動きを把握できるため、運転に必要な情報源として注目されている。

7. 今後の課題

今回製作したフィルター付きアンプは1セットのみで、定常の加速運転時には4系統のBPMのビーム位置信号を合成して用いることを予定しているため、4台の量産に向けて現在設計を進行中である。

特にBPMCから先、ビーム位置演算回路内のリップル除去フィルタまでの回路については2チャンネル間のバランスが精度を議論する上で重要になるため、量産を行なう場合にはフィルタの特性管理を十分に行なう必要がある。特性管理の方法としてはLPFとHPFを量産し、特性の近いペアを1台のBPM用として組み上げる予定である。

又、1パルス入射だけでなく、8パルス入射も予定されていることから、フィルター付きアンプはダイナミックレンジを広げるべく感度切り替えなどを行なう必要があるが、感度を切り替えた際のゲインバランスの確保など、今後さらに製作を進めつつ、より運転に適した回路に仕上げたいと考えている。

参考文献

- [1] 平松成範 . "Beam Instrumentation for Accelerators" KEK Internal 2004-4,
- [2] Accelerator Group JAERI/KEK Joint Project Team. "Accelerator Technical Design Report for J-PARC" KEK Report 2002-13,
- [3] "Proceedings of the Meeting on the Technical Study at KEK, Tsukuba, Feb.12-13, 1998, KEK Proceedings 98-1,
- [4] T. Toyama et al, Beam Position Monitor for The J-PARC Main Ring Synchrotron, DIPAC2005
- [5] 手島昌己 et al, J-PARC MR ビーム診断装置のノイズ問題, 本学会プロシーディングス
- [6] 平松成範 "ビーム位置演算回路タイプ2回路図" JAN,28,1980
- [7] 外山毅 et al, "Proceedings of The 14th Symposium on Accelerator Science Technology, November 2003