

J-PARC MR BPM の修理・改良

REPAIR AND IMPROVEMENT OF THE J-PARC MR BPMS

外山 毅^{#, A)}, 岡田雅之^{A)}, 手島昌己^{A)}, 橋本義徳^{A)}, 畠山衆一郎^{B)}, 花村幸篤^{C)}

Takeshi Toyama^{#, A)}, Masashi Okada^{A)}, Masaki Tejima^{A)}, Yoshinori Hashimoto^{A)}, Shuichiro Hatakeyama^{B)},
Kotoku Hanamura^{C)}

^{A)} KEK/J-PARC, ^{B)} JAEA/J-PARC, ^{C)} Mitsubishi Electric System & Service Co.,Ltd

Abstract

The beam intensity is steadily increasing after the great earthquake in Mar. 2011. The recent Main Ring (MR) beam power at the RUN49 exceeded 230 kW. The earthquake had stopped all the J-PARC facility. The relay switches in the BPM (beam position monitor) circuits without the air conditioner suffered from contact-conductor contamination. It resulted in bad connection of the switches. Those relays were replaced in the 2012 summer shutdown. In addition for higher intensity beams, signal attenuators with the switchable LPF were attached just before the BPMC (a processing circuit for the BPM). The linearity, frequency response and temperature dependence were satisfactory. Before and after the repair and improvement, BPM offsets have been measured. The position resolutions were also measured with the three-BPM method. The results are between a few 10 μm ~ a few 100 μm in rms, which varies with the beam intensity, BPM location and the BPMC setting as attenuation and gain.

1. はじめに

J-PARC は 2011 年 3 月 11 日の震災後、早期に復旧を行い 2012 年 1 月には利用運転を開始した。しかし、震災後の数ヶ月間の空調停止によると考えられるビーム位置検出器 (BPM) の処理回路 (BPMC) 内蔵の減衰器用リレースイッチの接点不良が発生しており、186 台の BPM の内 110 台が、測定レンジのいずれかで不具合を生じていた。このため 2012 年夏期シャットダウン中に処理回路の大幅改修を行った。同時期に、ビーム強度増強に対応するために外付の LPF 付き減衰器を取付けた。外付減衰器については以下のような経緯がある。BPM システム設計当初に、BPM 検出器の外付コンデンサにより出力信号が設計ビーム強度で約 4V となるようにする予定だった。しかし、初期ビームコミッションニング時の百分の一強度のビームでは信号強度が不足するた

め、急遽、外付コンデンサを無くした。その後のビーム強度の増強により、信号強度が処理回路の上限に近づいたため、外付減衰器を増設した。LPF を付加したことにより、信号波形が、従来のビーム電流の微分波形から、ビーム電流波形そのものに近くなり、処理回路のダイナミックレンジの観点からも有利になった。変更前後でのビームベース校正、また、位置分解能測定についても報告する。

2. MR BPM の構成

Figure 1 に MR の BPM システムの構成を示す[1]。信号の流れは、左から、BPM 検出器、減衰器および LPF、そして処理回路 (BPMC) となっている。外付の減衰器および LPF が 2012 年に追加した部分である。

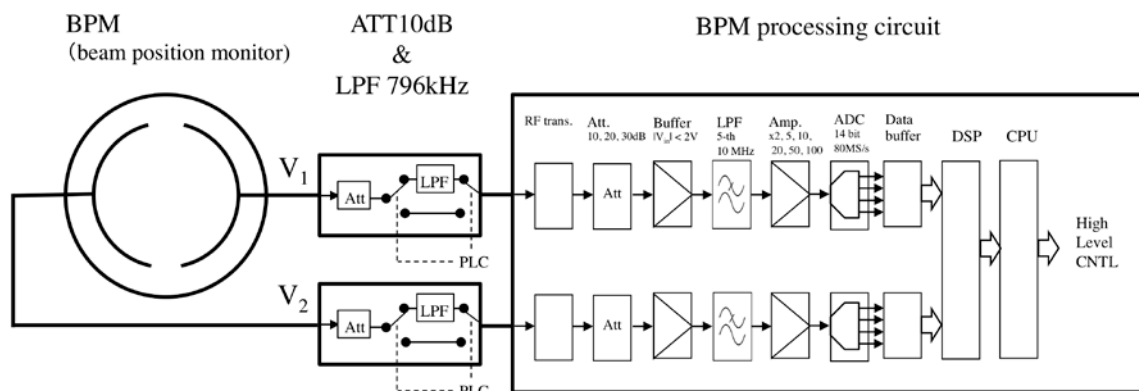


Figure 1: Schematic diagram of the BPM system at the J-PARC MR. The external attenuators (10 dB) and LPFs ($f_c = 796\text{kHz}$) were attached in 2012.

[#] takeshi.toyama@kek.jp

3. 処理回路内蔵の減衰量切替用リレー・スイッチの修理

3.1 故障状況

震災後、基幹設備が復旧し、BPMC の設置してある D1, D2, D3 の各電源棟内のローカル制御室の空調が復旧するまで約 2 ヶ月間かかった。それから、さらに約 4 ヶ月間、BPMC の減衰器の設定は 0dB のままであった。その後、信号を入力して各レンジの動作確認を行ったところ BPMC 内蔵の減衰量切替用リレースイッチに不具合の存在が確認された。

各 UNIT (BPM 1 台/4ch に対応) に 8 個の減衰量切替用リレーが搭載されている。1ch 分の回路を Fig.2 に示す。全 BPMC について調査し、以下のような結果を得た。0dB (THRU) の設定に対応する接点の接触抵抗は良好に保たれていた。10dB, 20dB に対応する接点では、接触抵抗の増加したものが見つかった。入力信号 (V_{IN})、減衰後の信号 (V_{ADC}) を取得し、これらの比を減衰量で規格化した値は Fig. 3 のような分布になった。すなわち、抵抗が増えたため、1 未満となったリレーが多数見つかった。1 UNIT 内で 1 つでも不良箇所があったものは 110 台であった。これらは、リレーを全数交換することとした。

原因は、長期間「開」にしていたリレー接点の表面に有機皮膜が生成・堆積したことにより、接触抵抗が増加し動作不良に至ったものと考えられた。停止期間中の設定が 0dB (THRU) であったため、これに対応するリレー接点は接触したままで、有機皮膜の成長の影響がなかったと考えられる。

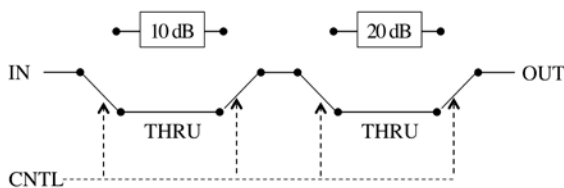
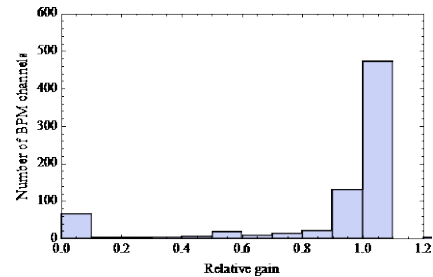


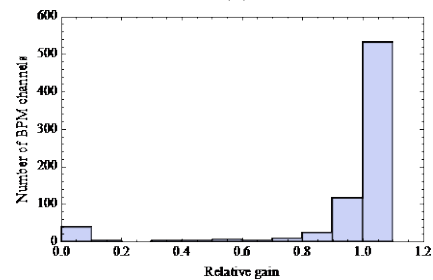
Figure 2: Switchable attenuators in the BPMC. The signal path was kept THRU (0 dB) for nearly a half year. Possibly the relay contact of the opposite side suffered damage from some organic vapor.

3.2 修理

2012 年の長期ビーム停止期間に、不具合の発生したアナログボードについては、ボード上のリレーを全数交換した。交換後、試験信号 (正弦波 1.72MHz) を入力し、EPICS システムで各 ch の信号を取込み、スイッチ切替再現性 ± 0.02 dB 以内、減衰率設定精度 ± 1.5 dB 以内、ch 間アイソレーション 60dB 以上を確認した。



(a)



(b)

Figure 3: Variation of the attenuation at the relay switches; (a) 10 dB range, (b) 20 dB range. Abscissa: the ratio of an ADC voltage to an input voltage, normalized by the design attenuation.

4. 外付減衰器

4.1 設計

設計方針として以下のような事項を考慮した：

- ミス・オペレーションで最大設計強度のビーム (4.13×10^{13} protons/bunch, 8 bunches) が入射されても装置に損傷を与えないこと。
- 調整・スタディのため、最大設計ビーム強度の 1/100 でも精度 (100 μ m 程度) を確保すること。
- 加速によるバンチ形状の断熱的变化による回路のダイナミックレンジ減少を軽減すること。
- 信号処理系の周波数帯域内の信号雑音比 1000 を確保すること。
- 左右および上下の各 2 チャンネル毎の透過率のバランスを 0.2dB 以下にすること。
- VSWR を帯域周波数 1MHz - 50MHz で 1.01 以下とすること。

BPM による位置測定の精度 $\sim 100 \mu$ m (信号電圧の相対誤差 $\sim 0.1\%$) を目標にしているため、上記の値は、これを超えている。このために生じる系統的誤差は、位置測定値のオフセットとして混入する。これは設置後のビームベースの校正により補正することにした。

BPM の高域通過特性のため、ビームのバンチングファクター (平均ビーム電流のピーク電流に対する比) B_f が小さくなり高周波成分が増えると、BPM 出力電圧は大きくなる。設計ビーム強度で、3GeV から 30GeV まで加速して断熱的变化をすると仮定すると、Fig. 4 に青線で示すように、電圧は最大約 108V、変化量は約 30 倍になる。

遮断周波数 796 kHz の低域通過フィルター (LPF) を採用することにより、Fig. 4 の赤線で示すように、電圧変化は約 8 倍、最大電圧も約 3V に減少する。

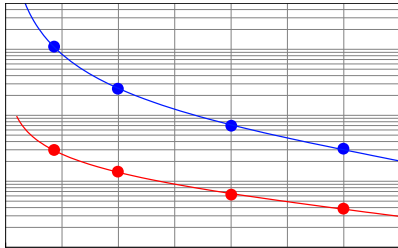


Figure 4: The BPM output voltage (zero-peak) vs. the bunching factor (solid lines as a guide to the eye).

周波数領域で見ると、20dB/dec の低域遮断特性を持つ BPM と、20dB/dec の高域遮断特性を持つ LPF を組み合わせると、Fig. 5 に示すように、0.73 M – 17 MHz (@-3dB) を通過帯域とする帯域通過フィルター (BPF) になる。LPF の遷移領域は、合成後の BPF の通過帯域に対応することになる。従って、LPF は 20dB/dec の高域遮断特性が重要である。一種のイコライザである。

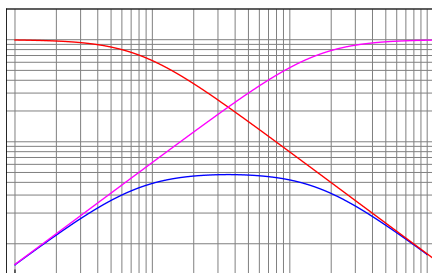


Figure 5: Frequency response of the combined system.

LPF 挿入による 50Ω 信号伝送ケーブルとのインピーダンス不整合は、多重反射を引起す。本システムは、連続するバンチ信号波形を検出する機能も持つので問題となる。これは、LPF と特性の揃った HPF を並列接続することにより解決した。これにより全通過フィルター (APF) が構成されインピーダンス整合が改善される。Figure 6 に遮断周波数 796kHz の APF を示す。さらに、後段回路の保護、信号パワー減弱、リターンロス改善のため 10dB 減衰器を付加した。

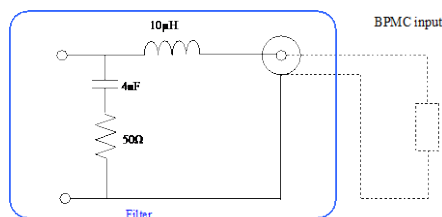


Figure 6: All-pass filter before the BPMC.

4.2 ATT-LPF の性能検査

- 入出力波形、線形性
信号発生器 (KEITHLEY 3390)、高周波電力増幅器 (R&K CA010K251-5757R)、およびオシロスコープ (Tektronix DPO3054) を使って、入出力波形の観測と線形性の確認を行った。オシロスコープで観測した信号発生器の出力信号を Fig. 7 (a)に、この信号を 57 dB の高周波電力増幅器で増幅後 ATT-LPF を通した後の波形を Fig. 7 (b)に示す。ATT-LPF の入出力線形性は、Fig. 8 に示すように必要な領域で確保されている。
- 周波数特性
ネットワーク・アナライザ (Agilent Technologies E5071C) を使って、ATT+LPF の反射、透過特性を測定した。Figure 9 (a)に ATT-LPF のみの特性 (赤線) と ATT-LPF と BPMC を組合せた特性 (青線) を示す。Figure 9 (b)に BPM 特性 (計算値)、ATT-LPF、および BPMC を組合せた特性、Fig. 9 (c)に反射特性を示す。目標仕様はほぼ満足されている。
- パワー試験
BPMC に外付 ATT-LPF を取り付けられた状態 (実機) で、大強度ビームに対応するダミー信号を入力して特性を確認した。信号発生器 (IWATSU SG-4322, Tektronix AFG3252)、高周波電力増幅器 (R&K CA010K251-5757)、およびオシロスコープ (LeCroy WavePro 715Zi) を使用した。測定のセットアップを Fig. 10 に示す。入力波形は、マイクロ構造：パルス幅 約 50ns、1 周期の正弦波、繰り返し 1.72MHz、マクロ構造：1.95 s 周期内で 1 s 間 ON を MR サイクル (6 s) 内で 3 回繰り返すものである。J-PARC MR のタイミング系、EPICS データ収集系を全面的に使用した。入力信号のビーム強度は約 3.5×10^{13} protons/bunch (8 bunch で約 540kW) 相当、バンチングファクターは約 0.043 に相当する。測定結果を Fig. 11 に示す。ATT-LPF の温度は 11 度程度上昇したが、信号伝送系への影響は 0.1% 未満であった。
- バランス

ATT-LPF 特性を全数確認した。入力 VSWR : 平均値 1.004 @ 3.4 MHz、ペア CH 間偏差 0.01 以下。挿入損失 (THRU 側および LPF 側) のペア CH 間偏差 0.07dB 以下。

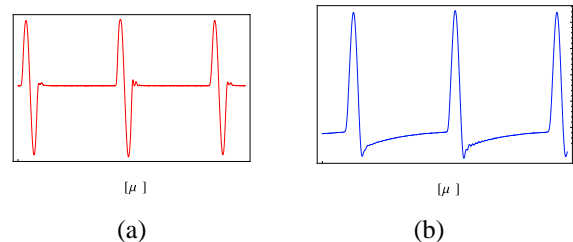


Figure 7: ATT-LPF input/output characteristics.

(a) SG output, (b) ATT-LPF output.

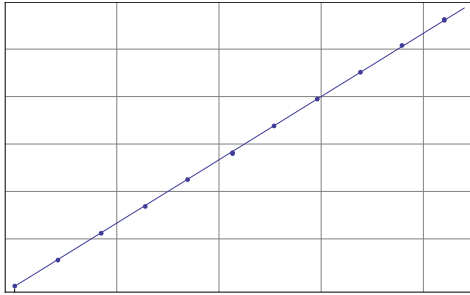


Figure 8: Linearity of the ATT-LPF. (The input is converted to the equivalent BPM output voltage).

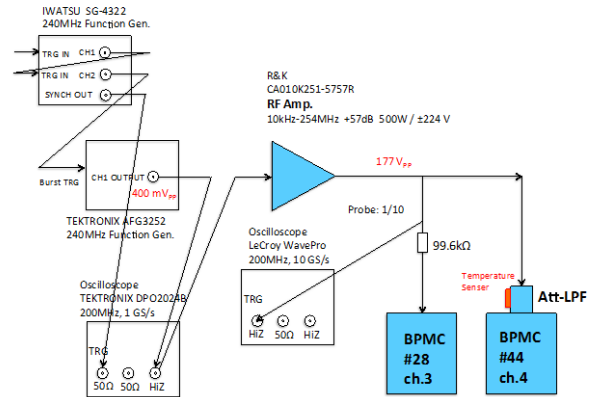
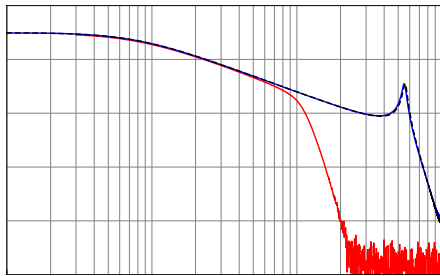
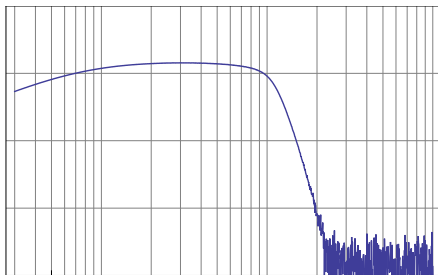


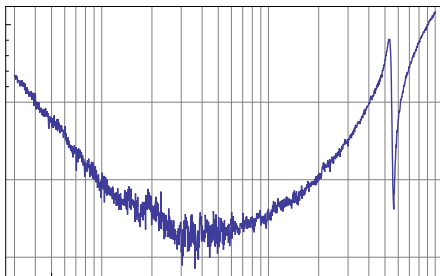
Figure 10: Setup for power test of the ATT-LPF.



(a)

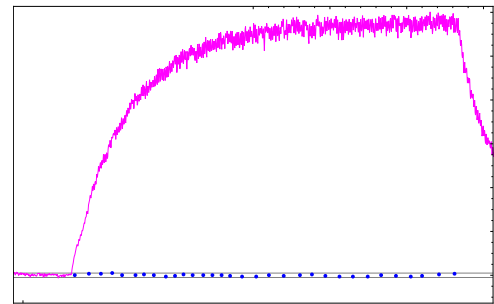


(b)



(c)

Figure 9: Frequency response of (a) ATT-LPF (blue), ATT-LPF and anti-aliasing LPF (red), and (b) the beam (calculated), ATT-LPF and anti-aliasing LPF, (c) return loss of the ATT-LPF.



[]

Figure 11: Ratio of the BPMC ADC counts to the ATT-LPF input signal, normalized by the mean value (blue dot) and the temperature rise on the ATT-LPF (magenta line). Just after injecting the dummy signal, temperature began to rise. On the other hand the acquired signal variation stayed within 0.1 %.

5. BBA, 分解能測定

上記の BPM 処理回路リレー・スイッチの修理、および LPF 付き減衰器の設置を行った後の性能を調査した。以下に結果を述べる。

5.1 BBA

各 BPM にピーク値を持つようなバンブ軌道を $0, \pm 4$ mm 程度の 3 通り作り、それぞれについて、直近の Q 電磁石の補助巻線に電流を $0, \pm 2, \pm 4$ A の 5 通り流し、合計 15 通りの条件による全周の軌道変化を測定した。これらにより Q 電磁石の磁場中心に対応する BPM 読み値、すなわちオフセットを得た[2]。Figure 12 に結果の一部を示す。2011.3.11 震災前後で、アラインメント、BPM リレー修理、および ATT-LPF 設置などの変更があったので、これらの影響によるオフセットの変化が現れている。ただし、変化量は数 mm 程度に留まっている。

1 台辺りの測定の所要時間は約 30 分で、残り台数は 156 台なので、約 78 時間の計測時間が必要である。測定時間の短縮が課題となっている。

5.2 3BPM 法による分解能測定

3 台の隣り合う BPM のデータを使って分解能を求めた。この方法では、対象となる BPM の間に挟まれた磁石の変動による軌道変動も、BPM の分解能に含まれてしまうので注意を要する。

約 9 ターン分のデータを FFT し $2 \times f_{RF}$ (約 3.4MHz) のピークを検出し COD を算出するモード (COD mode) に設定し、ビーム強度 2.55×10^{13} protons / 2bunches で測定した例を Fig. 13 に示す。リングに沿ったアドレスにおいて、その BPM 位置分解能の測定値をプロットした。3 周期の大きな変動が見られるが、これは BPM と処理回路間の伝送ケーブルの長さを反映している。186 台の BPM を 3 つのグループに分けて、3 つの電源棟のうちの直近の電源棟に配線している。距離の近いものは信号減衰量が小さく SN 比が大きい傾向がある。上記のように求めた全周の BPM の位置分解能の平均値を取り、ビーム強度に対する依存性を調べた (Fig. 14)。実線はビーム強度に反比例するようにフィットしたものである。 2.4×10^{13} ppp より大きいビーム強度で位置分解能が頭打ちあるいはやや増え始める原因は調査中である。また、バンチ数を増やすと SN 比が改善されるので位置分解能も良くなる。

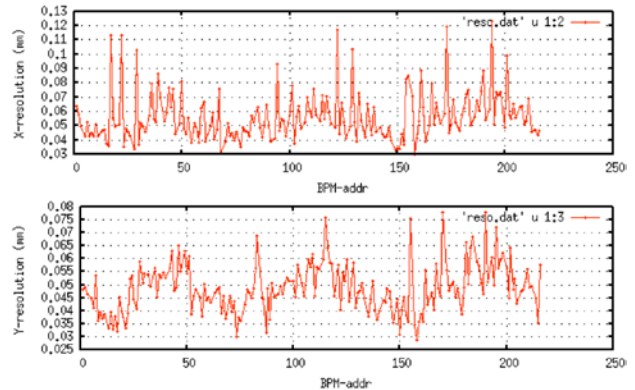


Figure 13: Position resolution measured with COD mode, 2.55×10^{13} protons / 2 bunches at shot 300743 in RUN 49. Data were acquired with 3 GeV DC mode. The upper (lower) plot shows the resolution of the x (y) direction.

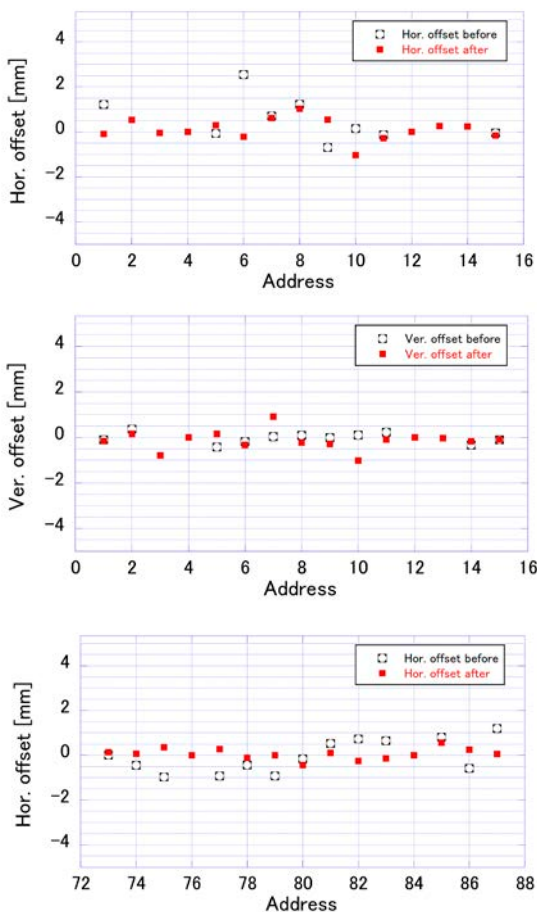


Figure 12: Results of the Beam Based Alignment.

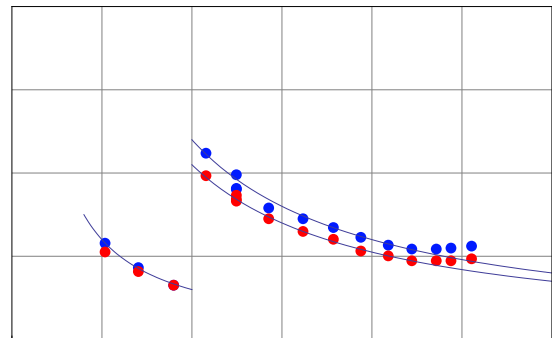


Figure 14: Position resolution at various beam intensities. Data were acquired with two bunches, 3 GeV DC mode. The external LPF is ON at the intensities $> 1.0 \times 10^{13}$ ppp, and OFF at the intensities $< 1.0 \times 10^{13}$ ppp. The solid lines are fits with inverse proportional to the intensity. Blue (red) dots are for the x (y) direction.

参考文献

- [1] T. Toyama, et al., "PERFORMANCE AND UPGRADE OF BPMS AT THE J-PARC MR", Proceedings of IBIC2012 in Japan, Tsukuba, Ibaraki, Japan, 2012, p.107 (MOPA26). There are two errata. The first is "Adopting LPF with the cut-off of 796kHz, we obtain the signal voltage for the BPM circuit as 9.25 V at maximum with a 10 dB attenuator" in p.107. Correctly the voltage of 9.25V corresponds to the one without the 10 dB attenuator. With the 10 dB attenuator the maximum is about 3 V. The second is "The goal for the attached ATT-LPF is set at < 0.02 dB (~ 0.2 mm) for each pair" in p.109. The goal value should be corrected as 0.2 dB (~ 2 mm). The balance of each pair fell within 0.07 dB.
- [2] T. Toyama, et al., "Operating experiences of the J-PARC MR BPMS", Proceedings 6th Annual Meeting of Part. Acc. Soc. of Japan, JAEA, Tokai, Naka-gun, Ibaraki, Japan (2009), 250 (in Japanese).