

J-PARC MR のための 16 電極モニターの開発

DEVELOPMENT OF 16 ELECTRODES BEAM-SIZE MONITORS FOR J-PARC MR

田島正規^{*A)}、中家剛^{A)}、外山毅^{B)}、小関忠^{B)}
Masanori Tajima^{*A)}, Tsuyosi Nakaya^{A)}, Takashi Toyama^{B)}, Tadashi Koseki^{B)}
^{A)}Kyoto University

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

Abstract

For J-PARC, 16 electrodes beam-size monitors are developed aiming at measuring the beam sizes of high intensity beams up to 1.38 MW in 1.16 s cycle operation of the MR. Furthermore, with high accuracy measurements of beam-sizes, the injection mismatch from the RCS is to be decreased. In the beam test in February 2019, the signal-noise ratio (SNR) of this monitor in bunch-by-bunch measurements was nearly 40 dB and lower than the design value 50dB. To improve the SNR, we are considering to develop new LPFs for anti-aliasing. In addition, the second monitor will be installed in August 2019 and tested with beams in November.

1. はじめに

MR からビームを供給している T2K 実験では大強度ビームを必要としている。このために MR では加速サイクルを 2.37 s から 1.16 s に短縮することで、現在の 490 kW から 1.38 MW (protons/bunch では 4.1×10^{13} に相当) へのビーム強度の増強を予定している。これを達成するにはビームロスの低減及びそのメカニズムの理解が課題であり、このためにはビームプロファイルの測定が重要となる。現在、MR ではプロファイルモニターとして、イオンプロファイルモニター [1] とワイヤーモニター [2] がインストールされているが、両者ともビームが大強度のときの測定に課題を抱える。前者では大強度になるにつれて、イオン同士、およびビームの空間電荷効果が顕著になりプロファイルに影響を与えており、後者ではワイヤーがビームによって焼き切れる問題が生じている。このために、われわれは高強度下のビームサイズ測定を目標とし、ストリップライン式の 16 電極モニター (図 1) の開発を行っている。

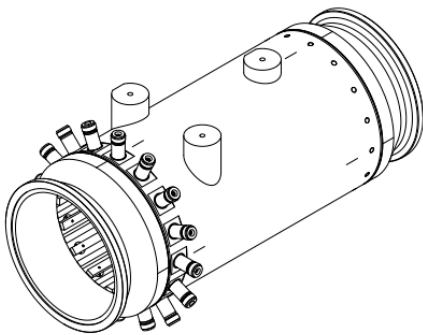


Figure 1: The drafting of 16-electrodes monitor by TOYAMA Co.,Ltd. The size is 500 mm length, 195 mm in outer diameter and 165 mm in inner diameter. Transverse moments of beam are calculated from induced voltages in 16 electrodes which are 320 mm long, 9.85 mm wide and 5.0 mm thick.

読み出し回路 [3] は FPGA (VC707) と ADC (DC18844A-A, 14-Bit, Input Range 2Vpp) から構成される。搭載の ADC のクロックは RF 周波数 (~ 1.7 MHz) の 52 逡倍信号に同期している。Bunch-by-bunch 処理にあたっては 52 samples から Goertzel アルゴリズムによって、RF の 2 倍高調波 ~ 3.4 MHz の信号振幅を導き、それ電圧値として、ビーム横方向のモーメントを算出する。

現在、1 台目は MR 入射部下流の 15 番地にインストール済み [4] で、2 台目は 2019 年 8 月下旬に 13 番地へのインストールを予定している。

2. 16 電極におけるプロファイル測定

ビームを相対論的に考えると、ビームによる電場は進行方向に対して垂直方向に集中する。このことから近似的に、ビームによって誘起される各電極の電圧は二次元の電場計算から得られる。これにより各電極の電圧 $V_i (i = 0, 1, \dots, 15)$ とビームの横方向モーメント $Q, Q \langle x \rangle, Q \langle y \rangle, Q \langle x^2 - y^2 \rangle, Q \langle 2xy \rangle, \dots$ の関係は以下のように書ける。

$$\begin{pmatrix} g_0 V_0 \\ g_1 V_1 \\ \vdots \\ g_{15} V_{15} \end{pmatrix} = A \times \begin{pmatrix} Q \\ Q \langle x \rangle \\ Q \langle y \rangle \\ Q \langle x^2 - y^2 \rangle \\ Q \langle 2xy \rangle \\ \dots \end{pmatrix} \quad (1)$$

ここで、行列 A は 16×16 行列で、 $g_i (i = 0, \dots, 15)$ は各電極固有のゲインである。行列 A は理想的には各電極の角度を用いた三角関数で表現できる、ここでは Wire Calibration によって値を求めている [3]。また、ゲインについては後のゲイン較正によって求める。本モニターは Dispersion 関数が 0 の位置にするため、四極モーメントはベータ関数 β_i とエミッタンス $\epsilon_i (i = x, y)$ を用いて以下のように書ける。

$$\begin{aligned} \langle x^2 - y^2 \rangle &= \langle (x - \langle x \rangle)^2 - (y - \langle y \rangle)^2 \rangle + \langle x \rangle^2 - \langle y \rangle^2 \\ &= \beta_x \epsilon_x - \beta_y \epsilon_y + \langle x \rangle^2 - \langle y \rangle^2 \end{aligned} \quad (3)$$

ベータ関数 β_i の値が明らかな 2 点で測定を行うことで、水平方向と垂直方向のエミッタンス ϵ_i を算出できる。

* tajima.masanori.76r@st.kyoto-u.ac.jp

3. 2019年2月のビームテスト

2019年2月9日にゲイン較正 (Beam Based Gain Calibration [5]) を目的としたビームテストを行った。これは新たな読み出し回路 [3] をインストールしたために行ったもので、ケーブルやコネクタによる各チャンネルのゲインのずれを補正するためのものである。ビーム設定は表1の通りである。Bump軌道によってモニター位置でのビーム軌道を変えて、軌道が安定する入射から1.5 s 後から、 ~ 8 ms の信号波形 (図2) を取得した。加えて同じトリガタイミングでRF稼働時のBackground測定を行った。

Table 1: Beam Parameter

Bunch	8
Thining Ratio	28 / 32
protons per pulse	5.87e+13
Beam Power	0.02 kW
MR Cycle	5200 ms
Acc. mode	3 GeV DC mode

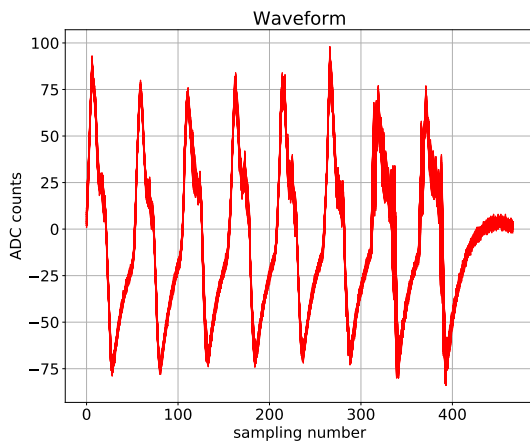


Figure 2: Waveform from ch.0 which is overwritten by turn. Clock synchronization between ADC and RF clock is confirmed. It seems that seventh and eighth bunches are unstable.

本測定では、Anti-Aliasing filter として、他モニターで使用されている Low-pass filters (LPFs) を使用した。この LPFs はカットオフ周波数が 800 kHz で、折り返し雑音のみならず解析領域の信号域まで減衰させてしまった。このため今回の解析では、本来の解析領域の周波数より低い RF 周波数の電圧値を用いた。

ビームをモニター中心に設定したときの turn 毎の 4 重極モーメント $\sigma_x^2 - \sigma_y^2$ (ノーマル成分から位置成分を引いたもの) を図3に示す。青線が bunch-by-bunch で処理したもので、赤線が 8 bunch に対して FFT を行いピークを信号値として計算したものである。さらに、4 重極モーメント $\sigma_x^2 - \sigma_y^2$ の平均と標準偏差及び SN 比¹を表2

にまとめた。8 bunch 平均では SN 比の向上がみられるが、これは FFT におけるサンプル数が9倍に増加したためと考えられる。

SN 比を算出する際のノイズには、Background 測定のものを用いた。Bunch-by-bunch 処理のノイズは ADC の最大電圧を 0 dB としたときの -89 dB に相当し、52 samples の 14-Bit ADC の理想的なノイズフロア²の -100 dB より 10 dB ほど大きい。これは ADC が理想的でないことによるデジタルノイズや RF の漏れ電場によるアナログノイズの影響と考えられる。

両者の 4 重極モーメント $\sigma_x^2 - \sigma_y^2$ ともに大きな統計的なばらつきがみられる、これは今回用いた LPFs による SN 比の悪化によるものと考えられる。実際に 16 電極モニターで turn 毎に各 bunch の 4 重極振動を測定するためには、このばらつきの低減と理解が重要課題となる。

Table 2: Quadrupole Moment and S/N

	$\sigma_x^2 - \sigma_y^2$ [mm ²]	S/N [dB]
1 Bunch	-29.3 ± 11.0	37.4 ± 1.0
8 Bunchs	-30.0 ± 3.2	50.7 ± 1.7

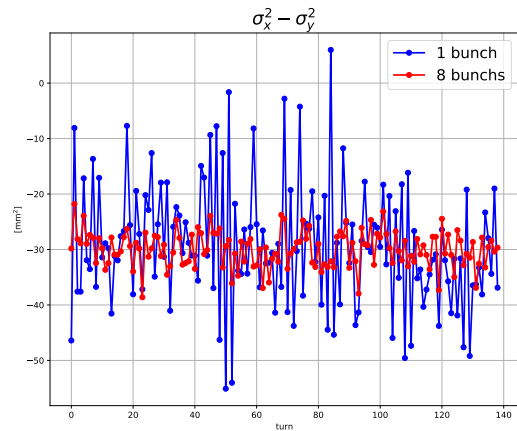


Figure 3: Quadrupole moment $\sigma_x^2 - \sigma_y^2$ by the turn in Beam Based Gain Calibration. Statistic error is bigger than machine error.

3.1 SN 比と四重極モーメントの関係

今回のビームテストの結果を理解するために、式 (1) から各電極の信号雑音比と 4 極モーメントのエラー関係 (図4) を計算した。青線、オレンジ線はそれぞれ 16 電極と 4 電極の場合を指している。16 電極は 4 電極に比較して、3dB 程雑音に強いことがわかる。図4の結果は計算値であるが、表2の標準偏差を誤差の範囲で説明できている。

¹ ビーム測定とバックグラウンド測定のとときの RF の 2 倍高調波領域 (~ 3.4 MHz) の振幅比を r とし、 $SNR = 20 \log_{10} r$ とし SN 比を求めた。

² M samples における N-Bit ADC の理想的なノイズフロアは $-(6.02 \times N + 1.76 + 10 \log_{10}(M/2))$ から計算できる。[6]

さらに図 5 に、四重極モーメント $\sigma_x^2 - \sigma_y^2$ と 95% エミッタンスのエラーの関係を示す。ここから **Bunch-by-bunch** 処理におけるエミッタンス ϵ の測定精度が利用運転強度におけるエミッタンス $\sim 10 \text{ mm}\pi\text{mrad}$ [2] の 5% に相当する、50 dB を当面の目標 SN 比とした。

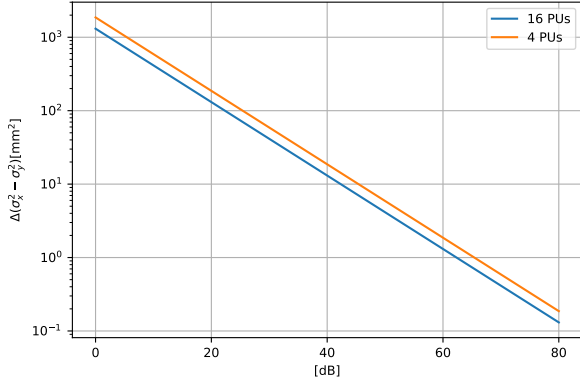


Figure 4: Calculation of relation between S/N of monitors and quadrupole moment when positions (x, y) and size (σ_x, σ_y) of beam are setting as $(0, 0)$ [mm] and $(5.5, 7.7)$ [mm].

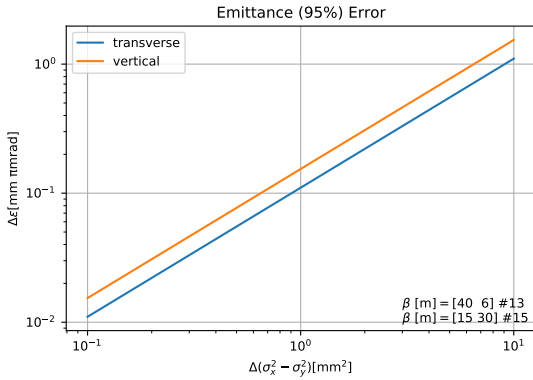


Figure 5: Calculation of relation between errors of $\sigma_x^2 - \sigma_y^2$ and emittance with beta functions in tune $(\nu_x, \nu_y) = (21.35, 21, 45)$.

4. SN 比の見積もり

今後新たな LPFs や減衰器を導入するにあたって、様々なビーム強度での SN 比を見積もった。

4.1 モニターの周波数特性

テーパ導波管 (図 6) [7] を用いて測定したモニターの周波数特性が図 7 である。ビーム 1 bunch による信号はモニターによって、低周波成分では 20 dB/dec. で減衰し、RF の 2 倍高調波 ($\sim 3.4 \text{ MHz}$) 付近にピークをもつ周波数スペクトラムになる。

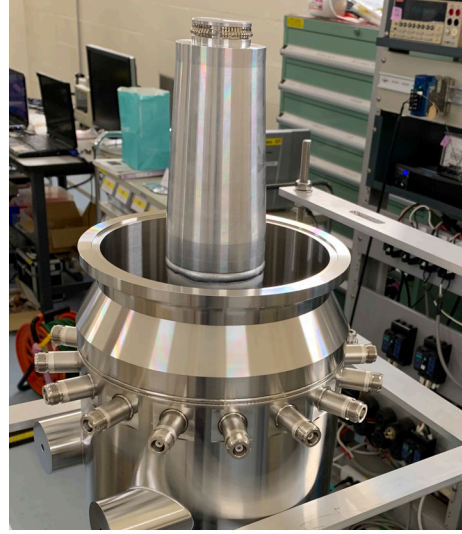


Figure 6: Sixteen-electrodes monitor with taper-pipe. (Only a part of inner conductor is seen.)

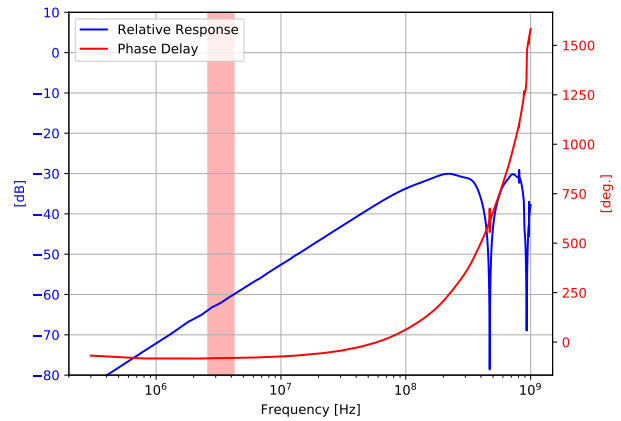


Figure 7: The response of 16-electrodes monitor measured with taper-pipe for impedance match. Blue line is relative response and red line is phase delay. The signal region around 3.4MHz is presented as red zone.

4.2 protons per bunch(p.p.b.) と SN 比

ビームの縦方向分布をガウシアンとして、モニターの周波数応答 (図 7) から出力波形の計算を行った。このとき縦方向の広がり (95%, ガウシアンにおける 2σ の領域) は 250ns(加速前) から 50ns(加速後) とした。各 p.p.b. に対する出力信号の peak-to-peak と bunch-by-bunch 処理時の SN 比の関係を図 8 に示す。プロットが帯状になっているのは縦方向の広がりの変化に対応したものである。また雑音には今回のビームテスト時のものを用いた。

4.3 LPFs

ADC のサンプリング周波数は約 88 MHz であるが、実際のビームの縦方向の分布はガウシアンとは限らないため、モニターで観測される周波数帯域は数 100 MHz ま

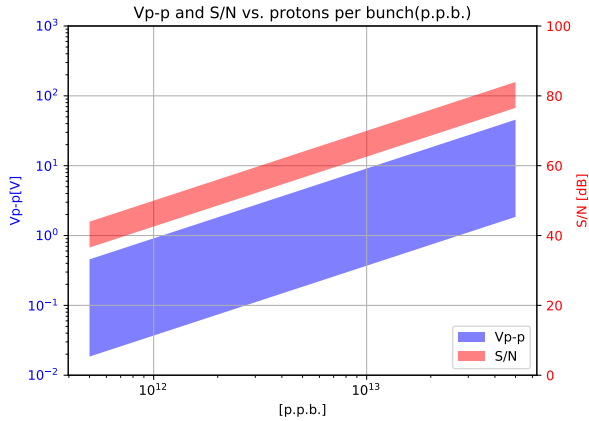


Figure 8: Calculation of peak-to-peak voltages and S/N. Blue zone presents peak-to-peak voltages from the monitor, Red zone presents S/N.

で及ぶため、高周波成分が折り返し雑音として信号領域 (3.4 MHz) に寄与を及ぼす。この寄与を小さくするために前回のビームテストではありあわせの LPFs を用いたが、見たい信号まで減衰させてしまった。このため、新たな LPFs (EF501 [8]) を導入することを検討している。この LPF はカットオフ周波数が 8.5 MHz で、信号領域と折り返し雑音領域の比が 40 dB 以上であるため、折り返し雑音は ADC のノイズフロアの領域まで落とせると考えられる。また位相の遅れによる波形のパイルアップもないことを確認した。

ただし、本 LPFs は通過帯域でも -30 dB の反射特性をもつ。反射波はモニター電極を反射し、再び LPF に戻るため、LPFs の前段に減衰器を置いて反射波を減衰させる必要がある。現在、減衰器として 15 dB のものを用いることを検討している。図 9 は、このときの各 p.p.b. に対する出力信号の peak-to-peak と信号雑音比の関係を示したものである。図 9 から目標 SN 比は p.p.b が約 10^{13} より上のとき達成される。

5. 系統誤差要因

主な系統誤差要因として、折り返し雑音と反射波の他にゲインエラーがあげられる。これを補正するのが、今回のビームテストの主な目的である。

5.1 ゲイン較正

ゲイン較正の手法は以下のとおりである。

まず Bump 軌道を用いてモニター地点でのビーム位置を変えて、十数回波形の測定を行う。波形全体の FFT に対して FFT を行い、RF 周波数におけるピーク電圧を全電圧で規格化したものを電圧値とした。そして、16 電極を偶数番目と基数番目の電極で 2 つに分割し、2 組の 8 電極の横方向モーメントを算出した。それらが、それぞれビームの形状をガウシアンとしたときに算出される値に一致するように Fitting を行うことで式 (1) のゲイン $g_i (i = 0, \dots, 15)$ を算出する。本手法は図 4 と同様の計算をしたシミュレーションでは、確かな精度にてゲイン推定できることを確認した。

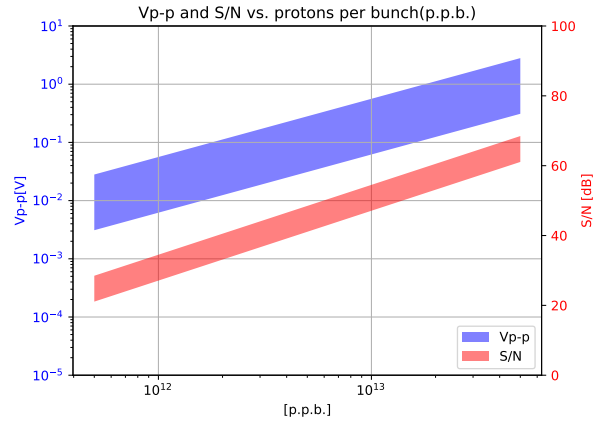


Figure 9: Calculation of peak-to-peak voltages and S/N from LPFs (EF501 [8]) and attenuation 15 dB. Blue zone means peak-to-peak voltages from the monitor and red one means S/N.

図 10 は、今回のビームテストにおける BBGC 前後の 2 組の 8 電極から算出される四重極モーメント差である。縦軸が $\sigma_x^2 - \sigma_y^2$ 、横軸が $2\sigma_x\sigma_y$ の差である。BBGC 前は 2 組の値が全く一致していないが、BBGC 後は二組の四重極モーメントの差が 0 に近づいていることがわかる。また他モーメントでも 0 への収束を確認した。このときの各チャンネルのゲインはそれぞれ $\pm 3\%$ の範囲に落ち着いた。

今後、SN 比と統計量の関係について検討していく予定である。

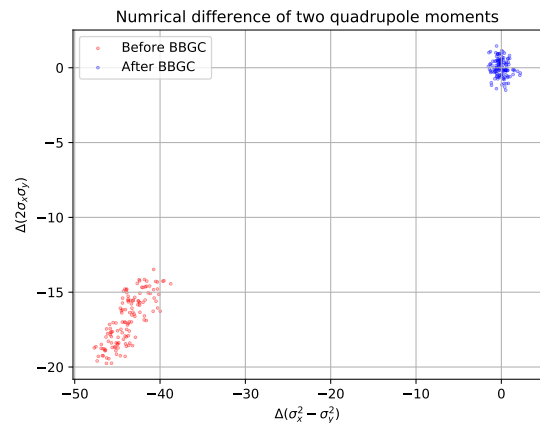


Figure 10: Numerical difference between two quadrupole moments which is calculated from two 8-electrodes monitors in 16-electrodes monitor. By BBGC, these differences get close to 0. There are 130 shots data.

6. まとめと展望

大強度 Beam-size モニターとして、16 電極モニターの開発を行っている。2 月のビームテストでは、bunch-by-bunch 測定における目標の SN 比より 10dB ほど低い

結果が得られた。これを改善するためにモニターの各プロトン数における SN 比の見積もりと新たな LPFs の導入の検討を行った。また前回のビームテストからゲイン較正手法の確立した。

今後、モニター地点におけるベータ関数のエラーとそのビームサイズ測定への影響と、16 電極モニターの入射ミスマッチ測定や *Adiabatic dumping*、チューンスプレット測定 [9] に対する感度をシミュレーションや今後のビームテストを通して見積っていく予定である。

謝辞

本研究は、課題研究番号 18H05535 新学術領域 研究「ニュートリノで拓く素粒子と宇宙」の助成を受けたものである。また実験に協力頂いた宇野氏や MR グループの方々に感謝します。

参考文献

- [1] Kenichirou Satou *et al.*, Development of IPM for J-PARC MR, Proceedings of Particle Accelerator Society Meeting 2009.
- [2] Susumu Igarashi *et al.*, BEAM PROFILE MEASUREMENT USING FLYING WIRE AT THE J-PARC MR.
- [3] W. Uno, Kyoto Univ., Master thesis (2017) (in Japanese).
- [4] Y. Nakanishi, Kyoto Univ., Master thesis (2016) (in Japanese).
- [5] Hironori Kuboki *et al.*, BEAM BASED GAIN CALIBRATION FOR BEAM POSITION MONITOR AT J-PARC MAIN RING, PASJ2015 WEOL02, Proceedings of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan.
- [6] K. Nakamura, Kyoto Univ., Master thesis (2014) (in Japanese).
- [7] https://www.analog.com/media/jp/training-seminars/tutorials/MT-001_jp.pdf
- [8] https://www.thorlabs.co.jp/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=8613
- [9] Yoshie Nakanishi *et al.*, MEASUREMENT OF BEAM RESPONSE FOR THE QUADRUPOLE KICKER WITH THE STRIPLINE PICKUP IN J-PARC MR, Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan.