

J-PARC MRにおける新規チューンメータ開発 DEVELOPMENT OF A NEW TUNE METER IN J-PARC MR

長尾大樹^{*,A)}, 中村剛^{A)}, 佐藤健一郎^{A)}, 岡田雅之^{A)}, 外山毅^{A)}

Daiki Nagao^{*,A)}, Takeshi Nakamura^{A)}, Kenichirou Satou^{A)}, Masashi Okada^{A)}, Takeshi Toyama^{A)}
^{A)} KEK

Abstract

At J-PARC MR, an upgrade toward a beam power of 1.3 MW is being pursued. For high-intensity operation, it is essential to enable long-term observation of tune variations to monitor the effects of ripple noise and tracking errors from magnets during continuous operation. Currently, tune measurements are performed only during test operation, where high-intensity beams cannot be used, and each measurement requires a few minutes, making it impractical during continuous operation. Therefore, an upgrade of the tune meter is underway. The main challenges are: (1) improving tune measurement accuracy during acceleration, (2) increasing data transfer and processing speed, and (3) accommodating the beam intensity during continuous operation. In the new system, ADC sampling is synchronized with the RF frequency to improve both measurement accuracy during acceleration and data processing speed. A method for evaluating synchronization errors of the ADC clock has been established. Furthermore, it has been confirmed that this approach suppresses the uncertainty in measured tune values caused by the revolution frequency variation during beam acceleration.

1. はじめに

J-PARC Main Ring (MR) では最大ビーム強度を 1.3 MW にアップグレードすることを目指している。ビーム強度向上のため、ベータトロンチューン（以下単にチューンとする）に対しても、変動する電源リップルの振動の測定、電源操作による光学補正、また長期的なビームの性質変容を追跡するため、定常運転時にも常時測定が可能なシステムが求められている [1]。

現在 MR においては、エキサイタを使用しない場合には入射エラーによる振動でのみチューンが観測でき、加速とともに速やかに減衰し見えなくなる。また、現行のチューン測定システムでは入射から取り出しまでの運転サイクル 1 回分 (1-shot) の測定結果を得るまでに数分の時間を要し、定常運転中のチューン変動を連続的に測定することはできない。したがって現在 MR でチューンを調べる際は、調整運転時にのみエキサイタ [2] により振動を励起しながら 1-shot ずつ測定を行っており、また調整運転中はビームロスによる機器の放射化の抑制やダンプ容量の制限などから、定常運転時の 1/10 相当のビーム強度で測定している。

そこで本研究では、ビームコミッショニングの要求から現在のチューン測定システムをアップグレードするための方針を決定し、また中核となるビーム同期サンプリングについての評価を行った。

2. 現行チューンメータ

現在用いられているチューン測定システムを Fig. 1 に示す [3]。先述した通り、本システムでの測定には数分の時間を要する。加えて加速とともにピーク位置が変動する測定システムは、window 幅内で周回周波数 f_{rev} および RF 周波数 $f_{rf} = 9f_{rev}$ が変動してしまう。本システムでの解析結果の一例を Fig. 2 に示す。解析の window 幅は 800 μ s であり、この間に測定対象領域である $3f_{rf}$

のピークは最大 1 kHz 変動する。これはピークの幅として現れる。

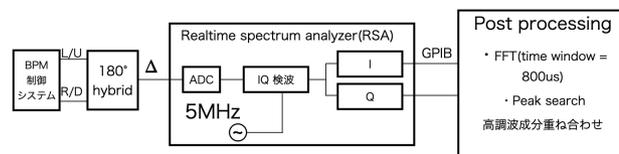


Figure 1: Block diagram of the current tune meter in J-PARC MR.

以上の点を踏まえて、新たに設計するチューン測定システムでは、1) チューン決定精度 2) データ転送・処理速度 3) ビーム強度の 3 点に対して改良を加える。

はじめに 1) のチューン決定精度について、加速中に周回周波数が変動することによりピークが幅を持つことに対しては、サンプリング周期を周回周波数に同期することで対策する。この方法で BPM 信号を取得した場合、周回周波数の定数倍でノルマライズされることになり、 f_{rev} の通倍波成分は加速によらず一定の値となる。そのため原理的に上記のような幅を持つことはない。本稿ではこの手法について論じる。

次に 2) データ転送・処理速度について測定にかかる時間の問題についてはデータ転送経路上にボトルネック (~ 1 Mbps) が存在すること、複雑な解析アルゴリズムが必要となることの 2 点によるものであると考えられる。現在の MR における 1 サイクルは速い取り出しで 1.36 s であり、定常運転時の 1-shot 毎の測定を可能にするためにはデータの取得・転送・解析のサイクルにかかる時間をそれ以下に収める必要がある。そのため新たな DAQ システムには 1 Gbps 以上の転送レートが求められる。また解析アルゴリズムについては、加速とともに変動する f_{rf} に対して都度ピークサーチによる追従が不可欠であるため、計算負荷が非常に膨大となっているためであると考えられる。こちらについては、先述したサンプリング周期を同期する手法を用いて始めから f_{rev} でノルマ

* dnagao@post.kek.jp

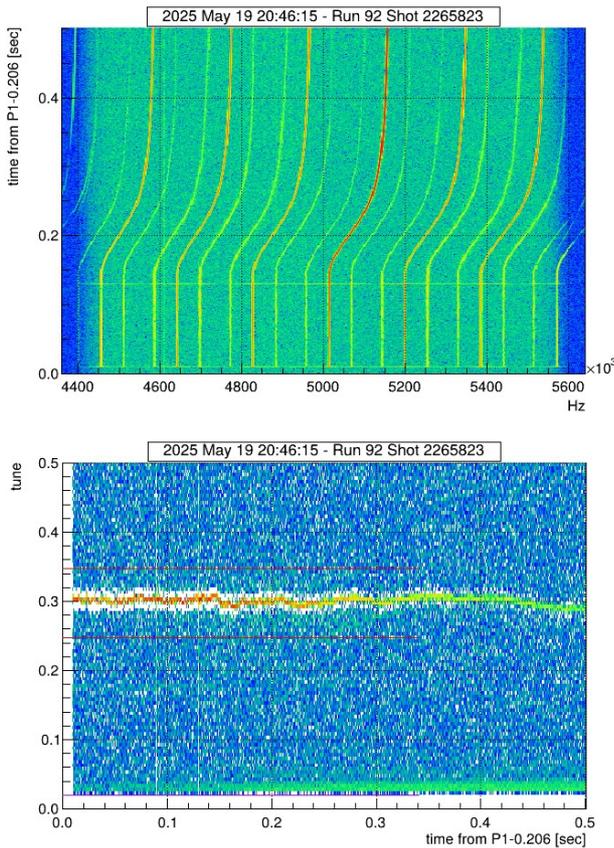


Figure 2: A sample tune analysis by the current tune meter.

ライズされた測定結果を得ることで、全測定点からピークサーチしなければならなかった既存の解析から大幅に計算量を減らすことができ、結果として解析時間も大きく短縮できる見込みである。

最後に 3) について、1 章で述べたように、MR では加速開始以降はエキサイタによる振動励起によってチューンを測定しているが、エキサイタの使用は低強度ビームに限られており、大強度ビームに対するエキサイタの最適化は行われていない。定常運転時のチューン測定に当たっては今後、大強度に対して許容されるキック量を見積りビーム試験を行う必要がある。

3. 新システム概要

新システムの概要を Fig. 3 に示す。BPM 制御システム [4] からの信号の差分を得るところまでは既存のシステムと共通である。新システムはベンチテストの段階であるため、I/Q 検波をアナログ回路を用いて行っている。ここで重要となるのが、検波の際 LO に与える信号も f_{rev} に同期している必要があるという点である。そのため今回のセットアップでは、LLRF から $\cos 3f_{RF}$ の波形を受け取り、 90° Hybrid によって $\sin 3f_{RF}$ とに分割し、アナログミキサによって検波を行っている。

本システムでの測定結果の一例を Fig. 4 に示す。ビームが加速され始めてからもピークの位置が一定していることがわかる。この測定においてはエキサイタは使用していないが、入射後から加速を開始してしばらくの間、

入射エラーによりベータトロンチューンが確認できる。このとき、横軸が始めから f_{rev} で規格化されているため、 f_{rev} ピークとサイドバンドとの差がそのままチューンとなっており、計算量の軽減に寄与することが期待される。

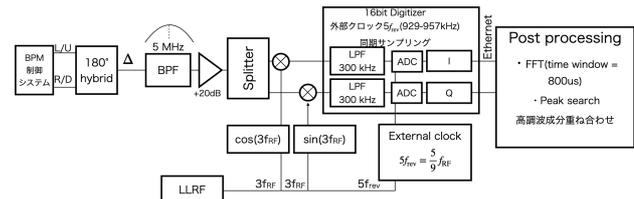


Figure 3: Block diagram of the new tune meter system.

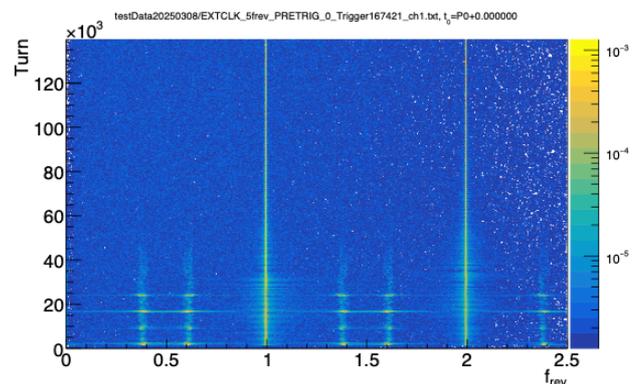


Figure 4: An example of tune measurement by new tune meter system. The first two bunches are induced at 1,858 turn and acceleration is start from 26,000 turn. Note that this spectrum is downconverted by $3f_{RF} = 27f_{rev}$ for this setup.

4. サンプリング同期

本システムでは、ADC サンプリングクロックの RF クロックに対する同期ずれが誤差要因となる。このため、入射から 1.2 s の領域の波形を解析し、 f_{rev} ピークの幅の広がりを見ることでこの同期精度を評価した。Figure 5 にその結果を示す。この時 f_{rev} ピークを gaussian でフィッティングした時、 $\sigma = 5 \times 10^{-6} f_{rev}$ であった。これは周波数分解能 $\Delta f = 5 \times 10^{-6} f_{rev}$ と同程度であり、チューン測定値に対する系統誤差としては無視できるほど小さい。将来的に別の ADC を用いることになった時にも、同様の方法で評価が可能である。

5. 加速中の周回周波数変動

続いて、加速中の周回周波数変動による f_{rev} ピークの広がり进行评估する。Figure 6 に、1 サイクル内の f_{RF} 及びその微分を示す。単位時間辺りの RF 周波数変動が最大となるのは、最初の入射から約 200 ms 後であることがわかる。SX 調整運転時のある 1-shot を現行および開発中のシステムそれぞれで記録した波形から、加速が最大となる時間領域 (200 ms) および周回速度が一定して

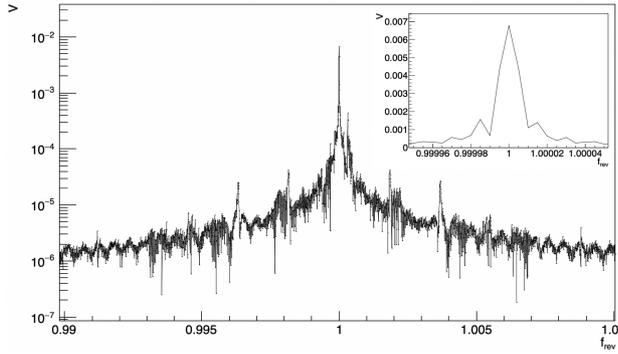


Figure 5: The frequency spectrum of 1.2 s. The inset is a zoom on the $1 \times f_{\text{rev}}$ peak. Note that the vertical axis of inset is linear scale. The sidebands at $1 \pm 0.002f_{\text{rev}}$ and $1 \pm 0.004f_{\text{rev}}$ are considered the synchrotron oscillation before acceleration.

いるフラットトップ領域 (1192 ms) の 3.2 ms 分の長さのデータを用いた。現行システムで取得された波形データは Blackman 窓関数をかけた後、データ点数が 20 倍になるようゼロパディングされる。そのため、開発システムデータに対して同様に Blackman 窓関数をかけたが、ゼロパディングについては行っていない。以後、現行システムで測定した加速中・フラットトップでのデータをそれぞれ $D_{\text{Acc}}^{\text{Asyn}}$ 、 $D_{\text{FT}}^{\text{Asyn}}$ 、開発中のシステムで同様に測定したものをそれぞれ $D_{\text{Acc}}^{\text{Sync}}$ 、 $D_{\text{FT}}^{\text{Sync}}$ と表記する。

ここで、窓関数をかけることにより 1) 周波数スペクトルのメインローブの幅が広がり、2) 原信号が時間依存性を持つ場合に窓関数によって周波数分布が歪められることが考えられる。

まず 1) について、メインローブの幅を FWHM で比較すると、方形窓と Blackman 窓の場合をそれぞれ $\text{FWHM}_{\text{rect}}$ 、 $\text{FWHM}_{\text{Blackman}}$ として $\text{FWHM}_{\text{Blackman}}/\text{FWHM}_{\text{rect}} = 1.9$ となる。

次に 2) について、加速領域データに関して全体の中で十分短い時間であると考えられるので、3.2 ms 内の周回周波数は時間に対し線形に増加する関数と近似することができる。この時、波形データに対して窓関数を用いることは、本来 3.2 ms の幅の中で一定の割合で変動する周回周波数に対し窓関数の形に相当した重みづけを行うことになる。例えば Blackman 窓を用いた場合、関数が最大となる 201.6 ms での周波数成分 (187.6 kHz) に対して関数の端点でありほぼ 0 となる 200 ms での周波数成分 (187.5 kHz) の振幅は大きく抑制されてしまう。今回のように周波数変動が一様であると扱える場合は重み付け後の周波数スペクトル形状は窓関数に一致すると考えられ、区間 [0,1] における Blackman 窓関数の標準偏差は $\sigma_{\text{Blackman}} = 0.103$ である。一方同じ長さの方形窓の場合は $\sigma_{\text{rect}} = 1/\sqrt{12} = 0.289$ である。なお、この影響を受けるのは $D_{\text{Acc}}^{\text{Asyn}}$ のみであり、 $D_{\text{Acc}}^{\text{Sync}}$ は RF 同期サンプリングの手法上影響を受けない。

1 と 2 を合わせて考えると、Blackman 窓関数を用いることにより $D_{\text{Acc}}^{\text{Asyn}}$ データの周波数ピークの偏差は 0.677 倍になり、その他のデータは 1.9 倍に広がる。後で計算される σ はこれらの効果を補正した値を示すこ

ととする。

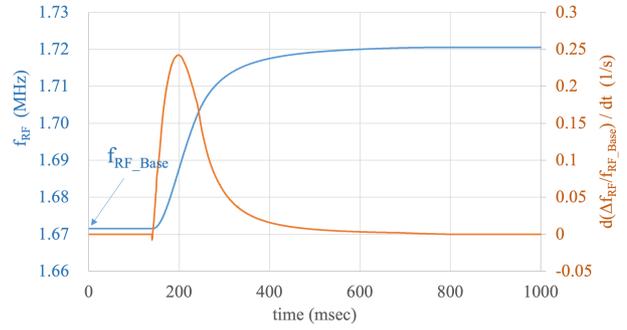


Figure 6: RF frequency acceleration. Blue line (vertical left axis) shows f_{rf} and red line shows the differential of f_{rf} normalized by initial f_{rf} as shown with $f_{\text{rf,Base}}$ in the figure.

Figure 7 に現行システムでの解析結果を、Fig. 8 に新システムでの解析結果をそれぞれ示す。ここで、ダウンコンバートしている新システムと比較するため、サンプリング同期を行っていない Fig. 7 に対しても周回周波数で規格化し、28 倍通倍波が $1 \times f_{\text{rev}}$ となるように測定データの周波数 f を $f_{\text{norm}} = f/f_{\text{rev}} - 27$ と変換した。また、それぞれの分布で $1 \times f_{\text{rev}}$ の値が 1 となるように縦軸をスケールした。

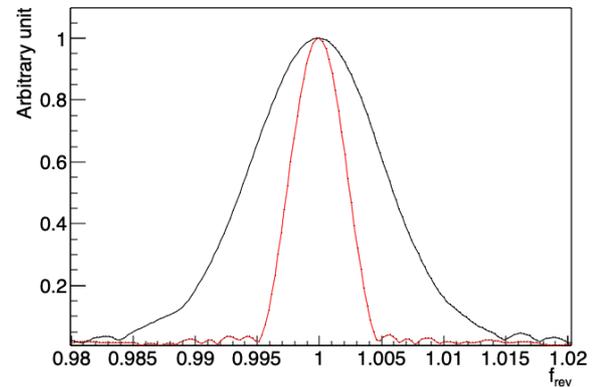


Figure 7: Frequency spectra at f_{rev} peak by current tune meter. Black and red lines are at acceleration and flat top, respectively.

$D_{\text{Acc}}^{\text{Asyn}}$ および $D_{\text{FT}}^{\text{Asyn}}$ から計算された周波数スペクトルを gaussian でフィットしたところ、それぞれ $\sigma_{\text{Acc}}^{\text{Asyn}} = (8.2 \pm 0.03) \times 10^{-3} f_{\text{rev}}$ と $\sigma_{\text{FT}}^{\text{Asyn}} = (1.1 \pm 0.01) \times 10^{-3} f_{\text{rev}}$ であった。一方 $D_{\text{Acc}}^{\text{Sync}}$ 、 $D_{\text{FT}}^{\text{Sync}}$ ではそれぞれ $\sigma_{\text{Acc}}^{\text{Sync}} = (1.0 \pm 0.1) \times 10^{-3} f_{\text{rev}}$ 、 $\sigma_{\text{FT}}^{\text{Sync}} = (1.0 \pm 0.2) \times 10^{-3} f_{\text{rev}}$ であった。これらの σ を σ_{meas} とした時、

$$\sigma_{\text{meas}}^2 = \sigma_{\text{FFT}}^2 + \sigma_{\text{Acc}}^2 + \sigma_{\nu_s}^2 \quad (1)$$

のように表すことができる。ここで σ_{FFT} 、 σ_{Acc} 、 σ_{ν_s} はそれぞれ FFT 分解能、加速による f_{rev} の変化、シンクロトロン振動による分散である。このうち、 σ_{FFT} に関

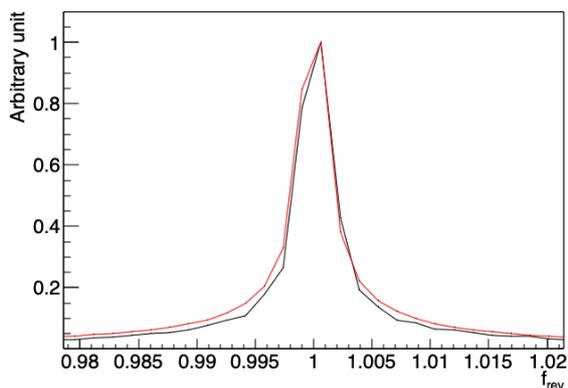


Figure 8: Frequency spectra at f_{rev} peak by new tune meter. Black and red lines are at acceleration and flat top, respectively.

しては同じ長さの波形を解析しているため全てのデータで同じである。また、シンクロトロン振動によるサイドバンドはクロック同期の有無に依らないため、現行システムと新システムで同等の影響であると考えられる。したがって現行システムの σ_{meas} の違いは主に σ_{Acc} によるものであると言える。現行システムでは加速中の f_{rev} ピークがフラットトップでの幅より 8 倍近く広がっているのに対して、新システムでは加速中・フラットトップを問わず同じ幅であり、クロック同期測定によって周回

速度によらずチューンが測定できることがわかる。

6. まとめ

J-PARC MR で利用される新チューンメータを開発中である。本システムは定常運転中に 1-shot 毎のチューンを測定することを目指している。このためにチューン決定精度、データ転送・処理速度、ビーム強度の 3 点に対して改良を行う。チューン決定精度やデータ処理速度向上にかかわる手法として、波形サンプリングクロックを RF 周波数と同期した測定システムを開発した。この手法により、ビーム加速中の測定でのチューン決定精度が従来のシステムより改善していることを確認した。

参考文献

- [1] T. Asami *et al.*, “TUNE MEASUREMENT FROM CLOSED ORBITS IN THE J-PARC MAIN RING”, Proceedings of the 22nd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, this meeting.
- [2] T. Toyama *et al.*, “THE KICK ANGLE CALIBRATION OF THE EXCITER IN THE J-PARC MR”, Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan.
- [3] S. Yamada, “A Novel Analysis of Time Evolving Betatron Tune”, in *Proc. ICALEPCS'13*, San Francisco, CA, USA, Oct. 2013, paper THPPC034, pp. 1157–1159.
- [4] T. Toyama *et al.*, “PERFORMANCE AND UPGRADE OF BPMS AT THE J-PARC MR”, Proceedings of IBIC2012, Tsukuba, Japan, MOPA26, p.107.