

J-PARC 主リングでのデバンチしたビームに対する 微分特性 BPM での横方向フィードバックの検討 TRANSVERSE FEEDBACK FOR COASTING BEAM WITH DIFFERENTIAL RESPONSE BPM AT J-PARC

中村剛[#], 佐藤健一郎, 長尾大樹, 武藤亮太郎, 富澤正人
Takeshi Nakamura[#], Kenichirou Satou, Daiki Nagao, Ryotaro Muto, Masahito Tomizawa
High Energy Accelerator Research Organization (KEK) / J-PARC

Abstract

The coasting beam transverse instability is observed at the de-bunching stage in the slow extraction operation, and the instability would be a possible limitation factor of the stored beam current. Transverse feedback as in operation for the bunched beam is a solution to cure the instability. However, the beam position monitor for the feedback is shorted strip-line type, therefore, has differential response to the beam position and the direct application to the de-bunched beam or coasting beam is not easy. To overcome this problem, we propose the running average with one revolution period to get the difference of the beam position during one revolution and apply corresponding FIR filter to get the kick signal. In this report, the method and additional treatment of the data to remove unnecessary low frequency signal that is suffered from low frequency noise.

1. はじめに

J-PARC の主リング (MR) における遅い取り出し (SX) では、高い時間デューティのビームを MR から取り出し利用者に供給している。高い時間デューティは、バンチに対して時間方向に収束力を発生している RF 加速を切ることにより、バンチを時間方向に拡散させて(デバンチ)、ビームをいわば DC 化し (コースティングビーム)、それを徐々に取り出すことで生成している。

しかし、バンチの拡散中にビームに垂直方向のベータトロン振動が発生し、ビーム損失につながる現象が観測された(Fig. 1)[1]。これは MR の slippage factor が正のため、縦方向のビーム結合インピーダンスのインダクタンス成分が縦方向不安定性の一種であるマイクロバンチング、すなわち時間領域において楕状の密度変調を引き起こし、それが発生する高周波電磁場の刺激により壁面より電子がたたきだされ電子雲を形成、そして、電子雲の分布がビームの横方向振動により乱され、その乱れがビームの振動を更に励起する、というメカニズムと考えられている。この現象の除去には、機器のインピーダンスの低減やビームパイプの壁面を2次電子の生成を低減するための処理など、大きな改変が必要となる。

現在、この不安定性に対して、その原因であるマイクロバンチングが起こりにくいものにデバンチ時のバンチの縦方向位相空間での分布を RF 加速の調整により設定し、その成長を抑制している[1]。

一方、横方向不安定性を直接に抑制する手法としてバンチ化されたビームでの横不安定性抑制において実績をもつフィードバックの適用を考えることにした[2-6]。

フィードバックではビームをある程度の時間間隔で切り分けて、切り分けられたそれぞれの部分を個別に処理する。この切り分けられた部分をスライスとよぶ。フィードバックは、各スライスについて、それぞれターンごとの位置

を検出し、その履歴からそのスライスに必要なキックを計算している。

デバンチしたビームに対する横方向フィードバックでは、ビーム位置モニタ(BPM)として電極に対して高インピ

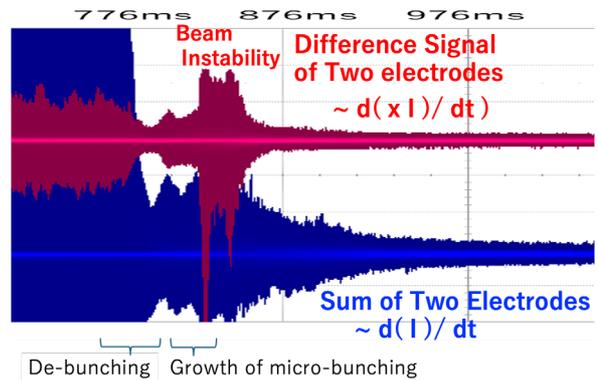


Figure 1: Beam instability signal in difference signal (“A-B” in Fig. 2) and sum signal (A+B) of two electrodes. A-B is proportional to $d(xI)/dt$ and A+B is to dI/dt where x and I are position and current.

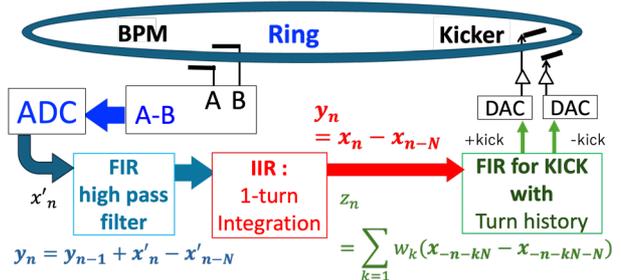


Figure 2: Block diagram with high pass filter, 1-turn integration and kick calculation.

[#] nkmr@post.kek.jp

ードダンスのアンプを直結することによりビームと静電結合させる手法をとることで振動するビームの位置に比例する信号を取得したが [5, 6]、MR では、アンプ等は放射線損傷のおそれがあることから短絡されたストリップライン[7]をもちいている。そのため BPM の信号は、時刻 t で BPM を通過するビームの平均位置 $x(t)$ と電流 $I(t)$ の時間微分に比例する信号となっている。すなわち、BPM 信号から直接に位置情報が得られるわけではない。バンチ化されているビームについては、各々のバンチについて、ビームが無いバケットの間の点から積分を開始すれば各バケット区間内の $x(t)I(t)$ の分布が構築できるがデバンチしたビームではビームが無い点が失われているので、この方法は使えない。これに対してリング一周の区間でのランニングアベレージを取れば各スライスでの前の周回との位置の差分を得ることに気づいたので、今回はまず、これを用いて原理的にはフィードバックが構築できることを示す。一方、積分は低周波ノイズを強調するので、実際の信号ではこれが大きな問題となるが、今回の不安定性は高周波で発生することを利用して、このような低周波ノイズを除去する手法を提案する。これらを取り入れたフィードバックの概念図を Fig. 2 に示している。開発中のフィードバック用の信号処理装置[3, 4]では対応する FPGA プログラムを作成すればこの処理は実現可能なハードウェアであると考えている。

2. 微分特性をもつ位置モニタ信号と周回移動平均

MR で用いている、片方が短絡されたストリップラインからの信号は、ストリップラインの長さが注目している最大周波数の波長より十分に短い場合には

$$S(t) = \frac{d(x(t)I(t))}{dt} \quad (1)$$

と近似することができる。バンチ化されたビームでは、バケットの間のビームが無い時刻 $t = 0$ 、 $I(0) = 0$ から積分を開始していくことにより

$$\int_0^t \frac{d(x(t')I(t'))}{dt'} dt' = x(t)I(t) - x(0)I(0) = x(t)I(t) \quad (2)$$

となりバケット内での $x(t)I(t)$ が構築できる。しかしデバンチしたビームでは $I(t) = 0$ となる点がないことから、この方法は使えない。

一方、リング一周の時間 T_0 での積分は

$$\int_{t-T_0}^t \frac{d(x(t')I(t'))}{dt'} dt' = x(t)I(t) - x(t-T_0)I(t-T_0) \quad (3)$$

となる。この処理により得られる $I(t)$ 、 $I(t-T_0)$ は同じスライスの周回ごとの値であり、 N_T が 10 程度、すなわち 10 周回程度ではこれらの値が変化しないとする。すなわち、これを I とおけば

$$x(t)I(t) - x(t-T_0)I(t-T_0) = (x(t) - x(t-T_0))I \quad (4)$$

となり、周回ごとに、前のターンでの値との差分に比例した信号

$$x(t) - x(t-T_0)$$

が得られる。

一周の積分 Eq. 3 は、BPM を連続して通過していくスライスごとにそれぞれ行うことから、いわゆるランニングアベレージを取ることに相当するので、フィードバックの ADC でサンプルされたデータ

$$x_1, x_2, x_3, \dots$$

に対しては、たとえば FIR フィルタ

$$y_n = y_{n-1} + x_n - x_{n-N} \quad (5)$$

で容易に計算できる。ここで、 N は 1 周回分のサンプル数である。

3. 位置の周回での差と FIR フィルタによるキック生成

一般的なフィードバックであれば各スライスのターンごとの位置 $x(t)$ 、 $x(t-T_0)$ 、 $x(t-2T_0)$ 、 \dots 、 $x(t-N_T T_0)$ からフィードバックのキックを計算するが、今回はその差分の履歴からの計算となる。差分と位置との位相、振幅を比較しよう。まず

$$x(t) = \cos(\omega_\beta t + \phi) + C = \cos\psi + C \quad (6)$$

としておく。ここで $\psi = \omega_\beta t + \phi$ 、 $\omega_\beta = \omega_0 \Delta v$ 、 $\omega_0 = 2\pi/T_0$ であり、また Δv はチューンの小数部である。この 1 ターン前の位置は

$$x(t-T_0) = \cos(\omega_\beta(t-T_0) + \phi) + C = \cos(\psi - 2\pi\Delta v) + C \quad (7)$$

となるので、差分は

$$x(t) - x(t-T_0) = \cos\psi - \cos(\psi - 2\pi\Delta v) = (1 - \cos 2\pi\Delta v) \cos\psi - \sin 2\pi\Delta v \sin\psi = A \cos(\psi + \zeta) \quad (8)$$

$$\tan\zeta = \frac{\sin 2\pi\Delta v}{1 - \cos 2\pi\Delta v} \quad (9)$$

$$A = \sqrt{(1 - \cos 2\pi\Delta v)^2 + \sin^2 2\pi\Delta v} \quad (10)$$

となる。Equation 8 と Eq. 1 と比較すると、位相が ζ 加わり、振幅が A 倍されている。

従来のフィードバックでは、各スライスでの位置の履歴を入力とする FIR フィルタにより位置の振動に対してある位相を加えてキック信号を生成しているが、差分用の FIR フィルタでは、位置の振動に与える位相から $-\zeta$ を引いた位相を与える FIR フィルタとすればよく(Fig. 3)、このような FIR フィルタの生成、適用は容易である。ゲインの調整は FIR フィルタの係数に定数をかけておけば良い。

この手法はバンチ化されたビームにも適用可能ではあるが、後述のように長い積分時間にもない強調される低周波ノイズの影響が大きいことから、バンチ化されたビームにはバケット毎の積分が適していると考えている。

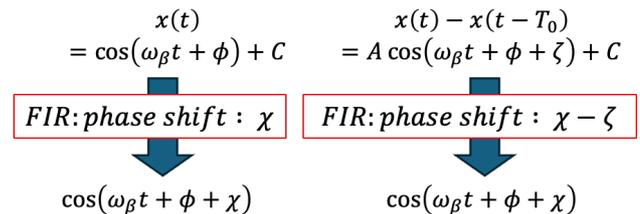


Figure 3: FIR filter for $x(t)$ (left) and $x(t) - x(t-T_0)$ (right). The difference is just the phase shift produced by FIR filters.

4. ビーム信号に含まれる低周波ノイズへの対応

今回の処理では、リング一周にわたっての積分となるので、低周波の信号が強く強調される。実際のビームの信号では、低周波ノイズが混入しているので、この寄与が非常に大きい。ビーム不安定性が発生している際の実際の信号をもちいて周回積分の処理を行ったところ、低周波のノイズがベースラインを大きく変動させ、実際のビーム振動は、その上での小さなスパイクとして見えている状況であった。その際のスペクトルを Fig. 4 に示す。

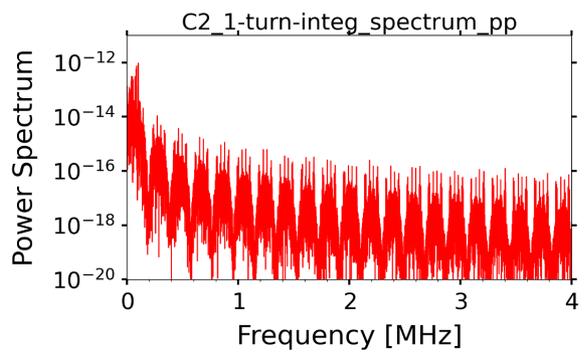


Figure 4: Spectrum of running averaged signal.

ところで、今回問題としている不安定性は、理論的には数十 MHz 以上で発生し、今回の実測でも数十 MHz 以上の高周波で発生している。そこで、低周波の信号は不安定性の検出・抑制には不要と考え、それを除去する方法を検討した。今回行った方法は、検出している信号のタイミングの周りの信号データにガウシアンを重みをつけて足し合わせ高周波信号成分をまず除去するフィルタを作る(Gaussian averaging と呼んでおく)。そして、そのデータを元の信号から引き算することで低周波を阻止するフィルタを作成した。これによりデータ遅延の周波数依存性や、ゲインリップルなどもないスムーズは応答の低域フィルタが生成できた。ここで、”遅延もなく”という状況は、キックはデータ取得のあとリング1周回ほどビームを待ってからキックを与えているので、その一周の時間をバッファとして遅延補正が可能という意味である。

このフィルタを式で書くと、

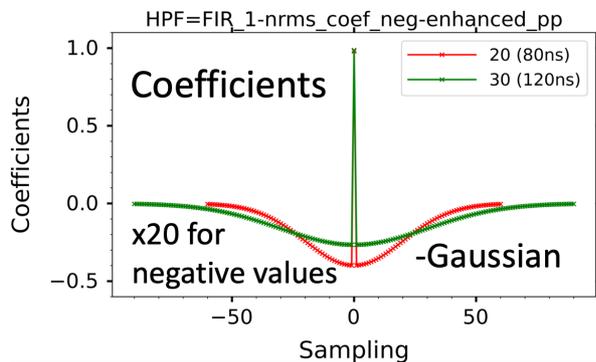


Figure 5: FIR coefficients for high pass filter to remove baseline motion by noise. Two different rms values of Gaussian is shown.

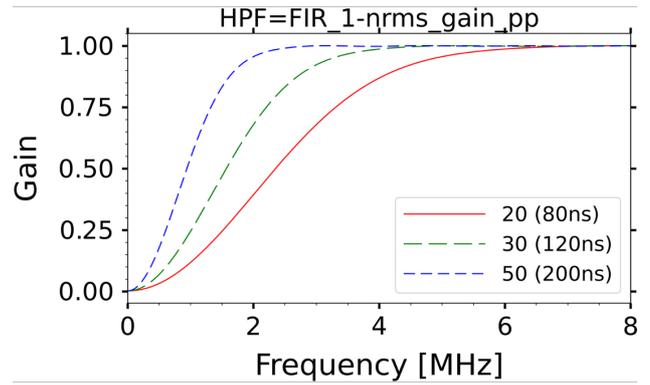


Figure 6: Frequency response of FIR filter for high pass filter shown in Fig. 5.

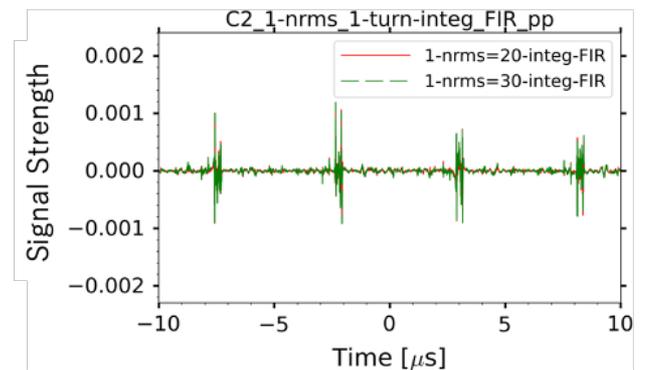
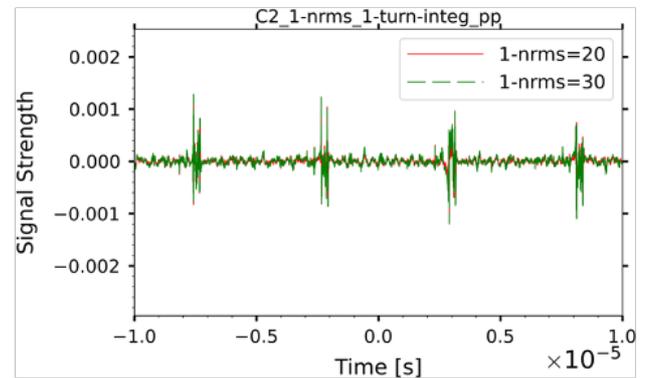
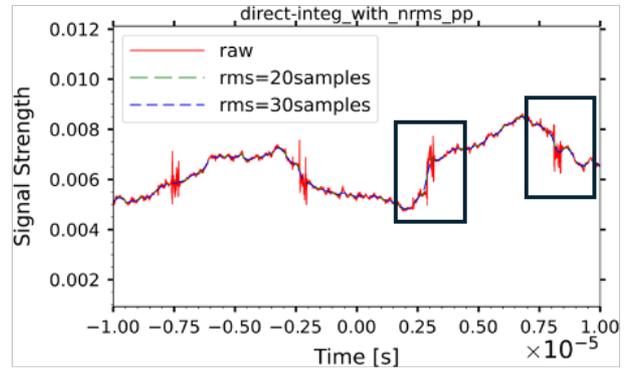


Figure 7: Top: Running averaged data without high pass filter, and data with Gaussian averaged are shown, middle: with high pass filter, bottom: high pass filter + FIR filter for kick (Shown in Fig. 2).

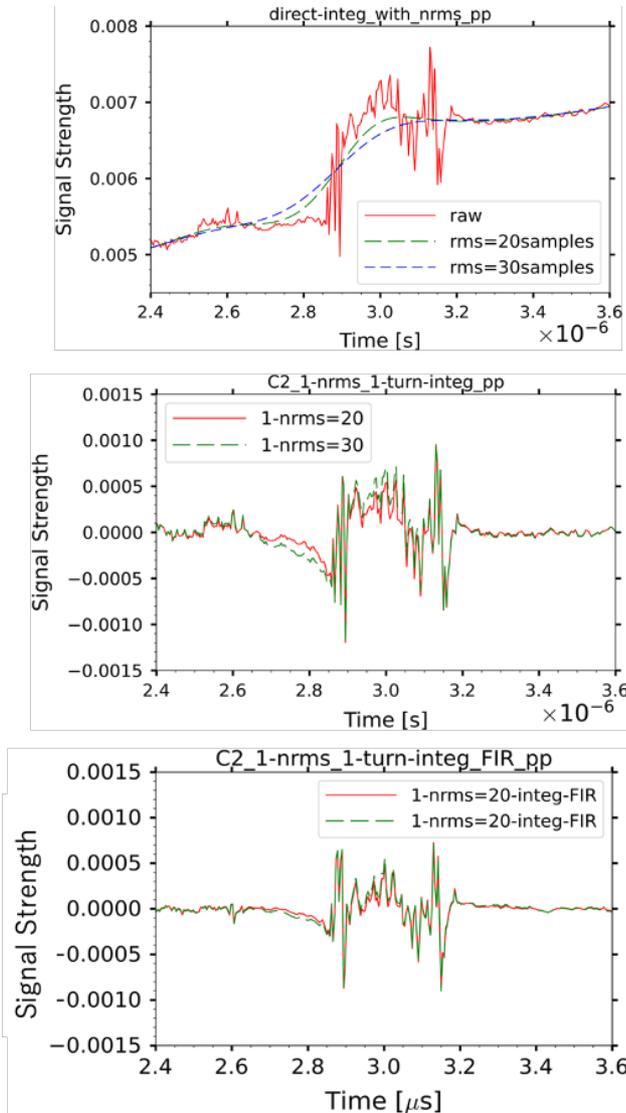


Figure 8: Part of the signal shown in a left square box in Fig is shown. Top: No high pass filter, and data with Gaussian averaged are shown, middle: with high pass filter, bottom: high pass filter + FIR filter for kick (Shown in Fig.2).

$$s_n = \sum_{k=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}} a_k x_{n-k-\frac{N}{2}} \quad (11)$$

となり、フィルタの係数 a_k および周波数は Fig. 5 および Fig. 6 に示されている。

不安定性が強く発生している領域での差分の信号に対して行った、それぞれの処理の効果を Figs. 7-9 に示す。これらの図において一番上の図は積分だけを行った結果であり、ベースラインの振動が大きいことがわかる。下がるにつれて、high pass filter の適用後、キック信号生成の FIR フィルタの適用後、となる。

Figure 8 および Fig. 9 は、Fig. 7 で示された領域のうち、四角で囲まれている領域を拡大したものであり Fig. 8(左側の箱) および Fig. 9(右側の箱) である。

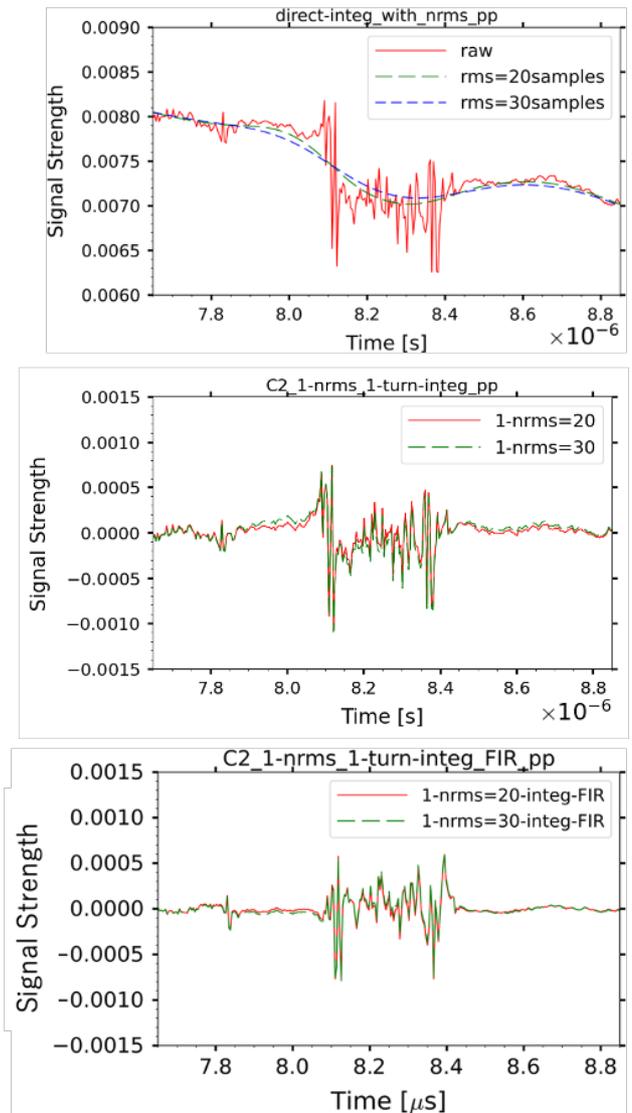


Figure 9: Part of the signal shown in a right square box in Fig is shown. Top: No high pass filter, and data with Gaussian averaged are shown, middle: with high pass filter, bottom: high pass filter + FIR filter for kick (Shown in Fig.2).

これから不安定性が生成している振動は高周波であり、今回の低周波領域の引き算は、不安定性の信号を抑制することなくベースラインを引き算可能であり、純度のよいキック信号が生成されたと考えている。

なお、遅い取り出しは最大エネルギーである 30 GeV で行われているので、周回周波数は固定であるため、信号処理は容易となっている。

5. まとめ

J-PARC MR でのデバンチしたビーム(コースティングビーム) において発生する横方向不安定性を抑制するための横方向フィードバックを、既設の微分特性をもつ BPM をもちいて実現する方法を検討した。

結果として、BPM 信号の周回でのランニングアベレージがビーム位置の周回ごとの差分に比例する情報となる

ので、それに対応する位相をもつ FIR フィルタを用いればフィードバックが成立することを見出した。

しかし積分は低周波でのノイズを強調するので、取得したビーム信号では、それが大きな問題となった。一方、不安定性の信号は高周波であることを理論、実験が示唆しているので低周波を除去したフィルタをもちいることで不安定性による振動を抽出する手法が有効であることを見出した。

以上により、観測された高周波での不安定性に対してこのフィードバックの手法は適用可能と考えている。

参考文献

- [1] M. Tomizawa *et al.*, “Slow Extraction Operation at J-PARC Main Ring”, Proc. of HB2021, p.219.
- [2] K. Nakamura *et al.*, “Intra-bunch Feedback System for the J-PARC Main Ring”, THOAA03, the Proc. of IPAC2014, 2014.
- [3] T. Nakamura *et al.*, “J-PARC 主リングでの RFSoc ベースのイントラバンチフィードバックの開発: 設計と初期評価”, FRP015, Proc. of the 21st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ24), Oct. 2024.
- [4] T. Nakamura *et al.*, “J-PARC 用イントラバンチフィードバックの開発: 試作機と実機の試験”, FRP075, Proc. of the 22nd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ25), Oct. 2025.
- [5] T. Nakamura *et al.*, “Digital Feedback for Transverse Coasting Beam Instability at S-LSR”, TP56, Proc. of PASJ06, 2006.
- [6] T. Shirai *et al.*, “Cooling Stacking Experiment at HIMAC”, THPMCP010, Proc. of COOL09, 2009.
- [7] K. Nakamura *et al.*, “Fabrication of Tapered Coupler for Intra-bunch Feedback System in J-PARC Main Ring”, SAOM03, Proc. Of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2014), Aug, 2024.