

J-PARC 主リングにおける縦方向バンチ結合振動フィードバックシステム THE FEEDBACK SYSTEM FOR THE LONGITUDINAL COUPLED BUNCH OSCILLATION IN J-PARC MR

杉山泰之 *^{A)}、吉井正人 ^{A)}、大森千広 ^{A)}、長谷川 豪志 ^{A)}、原 圭吾 ^{A)}、古澤 将司 ^{A)}、
田村 文彦 ^{B)}、山本 昌亘 ^{B)}、野村 昌弘 ^{B)}、島田 太平 ^{B)}

Yasuyuki Sugiyama*^{A)}, Masahito Yoshii^{A)}, Chihiro Ohmori^{A)}, Katsushi Hasegawa^{A)}, Keigo Hara^{A)}, Masashi Furusawa^{A)},
Fumihiko Tamura^{B)}, Masanobu Yamamoto^{B)}, Fumihiko Tamura^{B)}, Masahiro Nomura^{B)}, Taihei Shimada^{B)}
^{A)}J-PARC/KEK, ^{B)}J-PARC/JAEA

Abstract

The J-PARC Main Ring (MR) delivers 2.6×10^{14} protons per pulse, which corresponds to the beam power of 500 kW, to the neutrino experiment as of May 2018. The longitudinal coupled-bunch instabilities were observed in the MR for the beam power beyond 470 kW. To mitigate them for higher beam intensities, we have developed a longitudinal mode-by-mode feedback system. The feedback system consists of a wall current monitor, a FPGA-based feedback processor, RF power amplifiers, and a RF cavity as a longitudinal kicker. We report the preliminary beam measurement results to suppress the beam oscillation with the developed feedback system.

1. はじめに

1.1 J-PARC MR

J-PARC の主リング (MR) シンクロトロン [1] では 30 GeV まで加速した陽子をニュートリノおよびハドロンの実験施設へと供給している。Table 1 にニュートリノ実験に対する速い取り出し運転モードにおける MR 及びその RF 加速システムの運転パラメータを示す。速い取り出しにおいては、 2.6×10^{14} ppp の陽子を加速して 2.48 s 繰り返しで取り出すことで 2018 年 5 月に取り出し強度 500 kW を達成している。

Table 1: Parameters of the J-PARC MR and its RF system for the FX

parameter	value
circumference	1567.5 m
energy	3–30 GeV
beam intensity	(achieved) 2.6×10^{14} ppp
beam power	(achieved) 500 kW
repetition period	2.48 s
accelerating period	1.4 s
accelerating frequency f_{RF}	1.67–1.72 MHz
revolution frequency f_{rev}	185–191 kHz
harmonic number h_{RF}	9
number of bunches N_b	8
maximum rf voltage	320 kV
No. of cavities	7 (h=9), 2 (h=18)
Q-value of rf cavity	22

470 kW を越えるビーム強度ではビーム加速後半にバンチ結合 (Coupled Bunch, CB) 振動が観測され [2,3]、500 kW を越えるビーム強度での安定的な加速にはこれに対する対処が必要となった。

* yasuyuki.sugiyama@kek.jp

1.2 バンチ結合振動モード

加速ハーモニック数が M の場合には M 個のバンチ結合振動モードが存在する。バンチ結合振動はビーム信号の周波数スペクトルにおいては周回周波数 f_{rev} のハーモニクスサイドバンドとして現れる [4]。加速ハーモニクスまでの範囲の周波数に注目すると、モード n の振動成分が現れる周波数は

$$f_n^{USB} = n f_{rev} + m f_s \quad (1)$$

$$f_n^{LSB} = (M - n) f_{rev} - m f_s \quad (2)$$

となる。ここで、 n は振動モード、 f_s はシンクロトロン振動周波数である。また、 m は振動の種類を表し、 $m = 1$ の場合は二極振動、 $m = 2$ の場合は四極振動に相当する。MR の場合には、 $M = 9$ となり、図 1 に示すような振動モードが存在する。同じハーモニック成分であっても上側波帯 (Upper Side Band, USB) と下側波帯 (Lower Side Band, LSB) では対応するバンチ結合振動モードが異なる事が分かる。

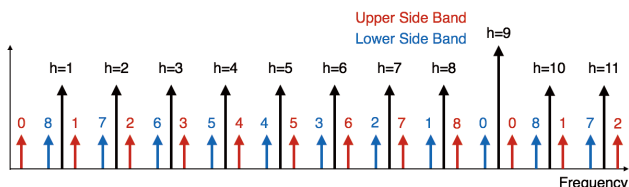


Figure 1: The spectra of the synchrotron sidebands corresponding to the coupled bunch oscillation mode for the J-PARC MR [3].

バンチ結合振動解析 [2,3] から、バンチ結合振動のうちモード $n = 8$ に相当するハーモニック数 $h = 8, 10$ の成分が最も振動が顕著である事が分かっており、これらのモードの振動を抑制する事が 500 kW を越える大強度での安定的なビーム加速には不可欠である。

2. 縦方向バンチ結合振動フィードバックシステム

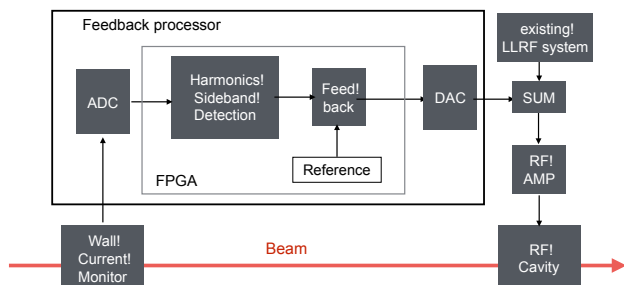


Figure 2: Block diagram of the longitudinal mode-by-mode feedback system [5].

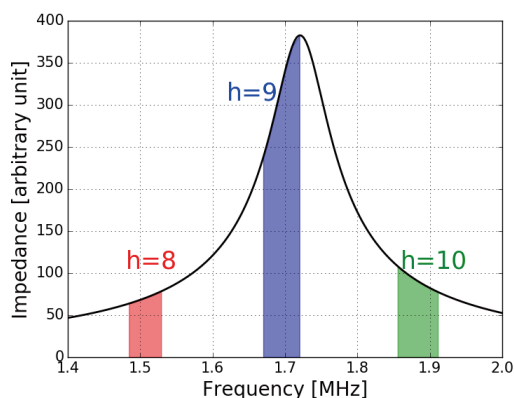


Figure 3: The frequency response of the impedance of the RF cavity.

縦方向バンチ結合振動の対策として、バンチ結合振動を検知し抑制するフィードバックシステムを開発した [5]。図 2 に開発した縦方向バンチ結合振動フィードバックシステムの概略図を示す。フィードバックシステムは壁電流モニター (WCM) [6]、フィードバック制御モジュール、RF アンプおよび縦方向キッカーから構成される。フィードバック制御モジュールではビーム信号のバンチ結合振動成分のみを抽出してフィードバック制御を行う。

フィードバック信号をビームに与える縦方向キッカーには、加速に用いている既存の RF 空洞を用いている。これは、図 3 に示すように加速用 RF 空洞のインピーダンスがバンチ結合振動の顕著であった $h = 8, 10$ をカバーしており、フィードバックに必要なキック電圧の生成が可能であるためである。

3. フィードバック制御モジュール

図 4 に開発した縦方向バンチ結合振動フィードバック制御モジュールを示す。フィードバック制御モジュールは MicroTCA.4 規格に基づいており、三菱電機特機システムが製造した汎用 AMC (Advanced

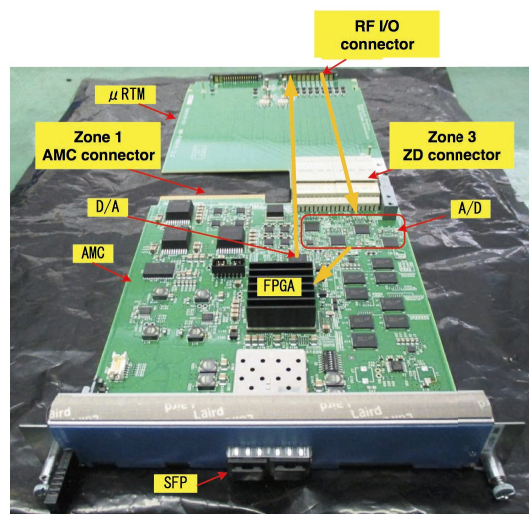


Figure 4: Pictures of the longitudinal mode-by-mode feedback processor. [7]

Mezzanine Card) [7] と RF 信号入出力用の Rear Transition Module (RTM) から構成されている。AMC は 8 チャンネル分の ADC と 2 チャンネル分の DAC、そして信号処理用の FPGA を備えている。FPGA としては Xilinx 社製 Zynq SoC FPGA を用いており、Zynq の CPU 上で EPICS-IOC を動作させる事で、モジュールの遠隔操作を可能としている。

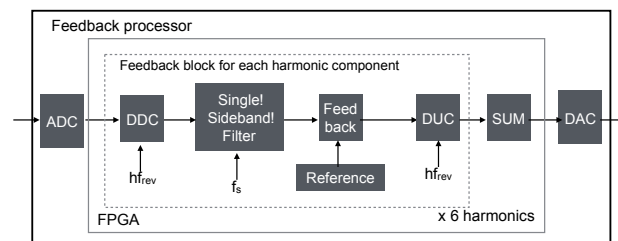


Figure 5: Block diagram of the longitudinal mode-by-mode feedback processor [5].

図 5 にフィードバック制御モジュールにおける信号処理のロジックブロック図を示す。まず、ADC によってデジタル化されたビーム信号から所望のハーモニク成分のベースバンド信号を直交検波する。検出されたベースバンド信号に対しシンクロトロン振動成分の検波を行い、フィードバック部への入力としている。シンクロトロン振動成分の検波には single sideband filter (SSBF) [8] を用いて、異なる振動モードに対応する USB と LSB を分離してフィードバックできるようにしている。フィードバック処理としては比例制御 (P 制御) と積分制御 (I 制御) を実装した。フィードバック処理の出力信号は各ハーモニク成分の RF 信号へと変調されてゲイン補正などを行った後に DAC を用いてアナログ信号として出力される。フィードバック制御モジュールは 6 つのハーモニク成分を同時に処理可能で、それらの出力信号の和が DAC から出力される。

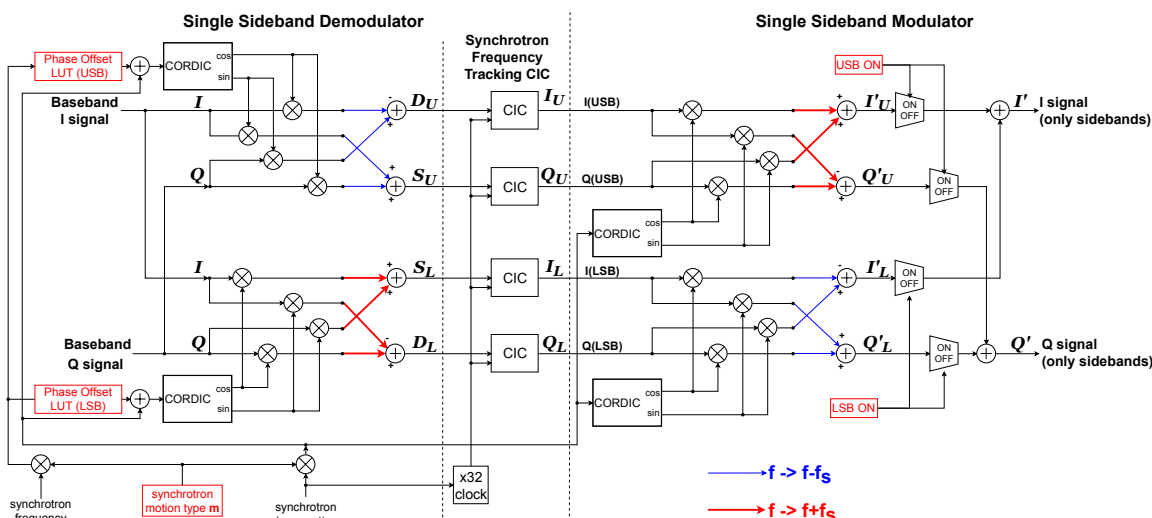


Figure 6: Block diagram of the Single Sideband filter block [5].

3.1 Single Sideband Filter

図6に、フィードバック制御モジュールに実装したSSBFのブロック図を示す。

ベースバンドIQ信号に対して $\sin m\omega_s t$, $\cos m\omega_s t$ をかけて和差を取ると S_U, D_U, S_L, D_L が得られる。ここで、 m は振動の種類であり、 $m = 1$ が二極振動に相当する。 ω_s はシンクロトロン振動数 $\omega_s = 2\pi f_s$ である。 $D_U(S_L)$ や $S_U(D_L)$ では、振動の種類が m であるUSB(LSB)の成分のみがDC成分となり、その他の成分は $f = mf_s$ の通倍波のサイドバンドとなって現れる。 $D_U(S_L)$ や $S_U(D_L)$ をLPF (Low Pass Filter)に通す事で、所望の振動の種類に対応したUSB(LSB)のIQ信号 $I_U(I_L), Q_U(Q_L)$ が得られる。

振動成分検出用狭帯域LPFとしては、シンクロトロン周波数追従CIC (Cascaded Integrator and Comb) フィルタを用いている。MRでは加速中にシンクロトロン周波数が大きく変化するため、通常の固定帯域のCICを用いてしまうと除去したいサイドバンド成分に対する除去能力がシンクロトロン周波数の変化に応じて変わってしまう恐れがある。これに対し、シンクロトロン周波数追従CICフィルタでは、CICフィルタのノッチの位置が f_s の整数倍の位置に常に来るため、不要なサイドバンド成分を常に除去しつつ、所望の成分のみを抽出することができる。この機能は、 $32f_s$ をCICフィルタの動作クロックとして使い、その32clock分をCICフィルタにおける遅延設定値とすることで得られる。

LSB及びUSBのIQ信号は、再び $\sin m\omega_s t$, $\cos m\omega_s t$ をかけて和差を取ることによって、周回周波数ハーモニック成分へと変調され、フィードバック入力として用いられる。フィードバックに使うサイドバンドは個別に選択可能になっている。

シンクロトロン振動成分の復調・変調に用いる $\sin m\omega_s t$, $\cos m\omega_s t$ の信号のうち、復調に用いる信号の位相はLUT(Look Up Table)をもちいて調整ができ、このLUTを用いてビームを含めたシステム全体

のシンクロトロン振動の位相の変化を補正を行う。

4. フィードバック試験

開発したバンチ振動フィードバックシステムの動作を実際のビームを用いて確認した。ビーム試験においては、MRのリング中に設置された加速に用いていない予備のRF空胴を用いてビームの励振及びフィードバックを行った。フィードバック試験に用いる空胴に対してはフィードバックによる効果のみを測定するために既存のLLRFシステムによるフィードフォワード制御[9]を無効としている。

4.1 位相LUT調整

フィードバックループを閉じる為には、フィードバックシステムから加速空胴までのケーブルでの遅延やフィードバックモジュール内の信号処理の遅延、フィルタ特性などによる位相変化を補正する事が必要となる。フィードバックシステムを用いてビームを励振し、励振に用いた位相とビーム信号から測定した振動位相を比べてシステムでの位相差を検出した。位相差測定には二極振動のない安定なビームとして13kWのビームを用いた。加速空胴を用いて2.5kVのキック電圧を $h = 8$ のUSBにおいて発生させて、ビームに対してモード $n = 8$ のバンチ結合振動を誘起した。

測定されたシステムの位相差を位相LUT調整前後で比べた物が図7である。位相変化を補正していない状態ではシステム一周で100度ほど位相がまわっている。シンクロトロン周波数は加速開始から0.3s以降は単調減少するのに対して位相差が増減を繰り返している事から、この位相変化はケーブルでの遅延よりむしろフィードバックモジュール内の信号処理やフィルタの特性によるものだと考えられる。測定したシステムでの位相変化を元に、位相補正LUTをシンクロトロン周波数の関数として作成した。位相補正LUT調整後はシステムでの位相差が10度以下に抑えられている事が分かる。

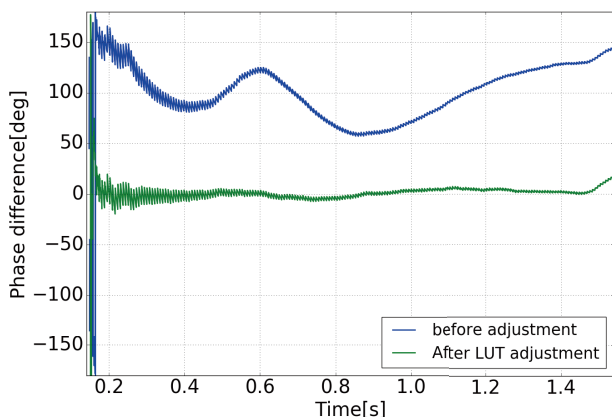


Figure 7: Phase adjustment with LUT.

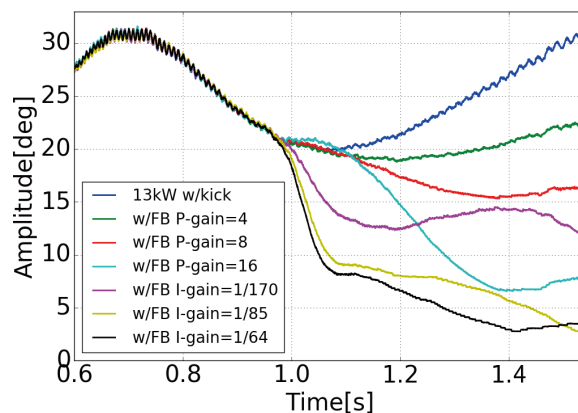


Figure 8: Oscillation amplitude of the CB mode $n = 8$ for the excited 13 kW beam with and without FB.

4.2 励振試験

位相補正 LUT 作成時と同様に強度 13 kW のビームに対してキック電圧を与えてバンチ結合振動を励起し、それに対してフィードバックを有効にしてビームの振動振幅の変化を調べた。

フィードバックの有無、そして PI 制御それぞれのゲインの変化に伴うバンチ結合振動モード $n = 8$ の振幅の変化を図 8 に示す。フィードバックは加速開始から 0.95 s 以降に有効にしている。フィードバックを有効にする事で、P 制御及び I 制御によってビームのバンチ結合振動が抑えられている事が確認できる。特に、P 制御に比べて I 制御の方が速やかに振動を抑制できているが、これはフィードバックシステム内の遅延が比較的大きいため、P 制御ではあまりフィードバックゲインが取れていない事が原因と考えられる。

図 9 にフィードバックの有無でのマウンテンプロットの比較を示す。フィードバック無しの状態では加速終盤まで各バンチが大振幅で揺れているのに対し、積分制御によるフィードバックを有効にすることで速やかに各バンチの振動が抑制されている事が分かる。

4.3 強度の変化に対する応答

ビーム強度と P 制御ゲインを変化させて、ビームの振動振幅の変化を調べた。ビーム強度の増大に伴って同じ振動振幅でも信号強度が大きくなるため、その分 P 制御ゲインが小さな値でも同様の結果が得られると期待される。図 10 にビーム強度と P 制御ゲインの変化によるビームのモード $n = 8$ の振動振幅の変化を示す。ビーム振動は 2.5 kV のキック電圧を加速開始 0.2 s 以降から与える事で誘起した。フィードバックは加速開始 0.95 s 後以降から有効としている。フィードバックの際の位相補正 LUT は強度 13 kW のデータで作成した物を用いた。強度 13 kW においては P 制御ゲインが 8 の際に振動が半分まで抑制できているが、強度を 26 kW、52 kW と増やして行くにつれ、P ゲインがそれぞれ、4、2 の場合に振動が半分に出来ている。これにより、13 kW のデータに基づく LUT を用いて他の強度でもフィードバックが動作する事、ビーム強度の増加に応じてシステム全体の実効的なゲインが増えている事が確認できた。

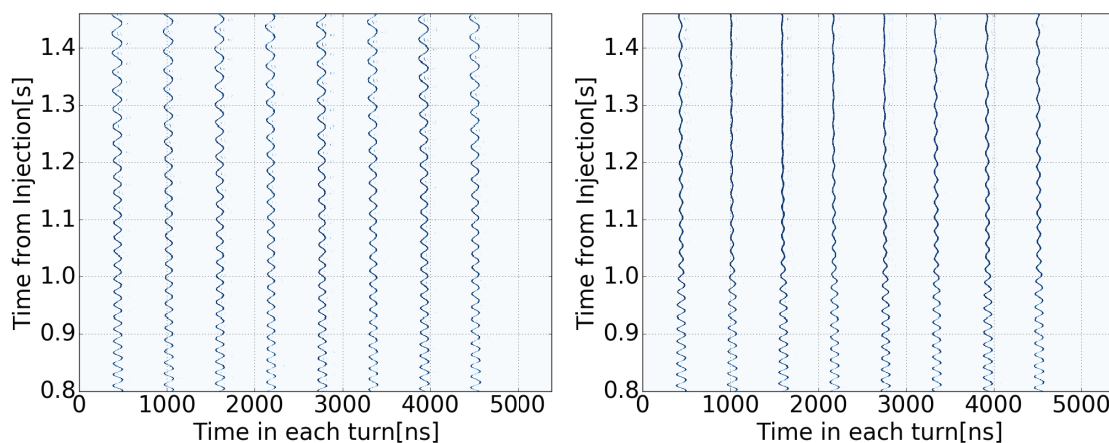


Figure 9: Mountain plot of excited 13 kW beam without FB (left) and with FB (right) of I-gain=1/64.

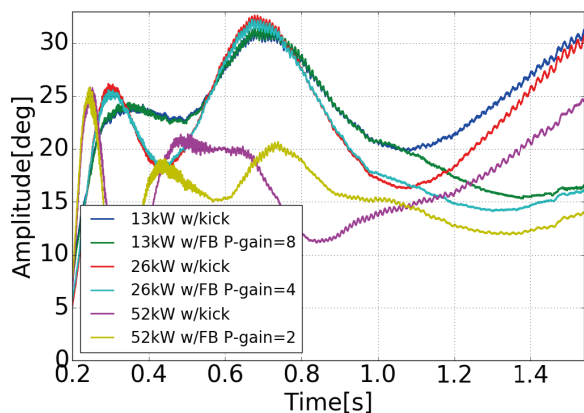


Figure 10: Oscillation amplitude of the CB mode $n = 8$ for excited beam with and without FB (P-control) for various beam power.

4.4 自発振動抑制試験

13 kW 以上のビーム強度においては外部からのキックなしでも自発的にバンチ結合振動が観測されたため、フィードバックを有効にしてこの振動が抑制できるかを調べた。図 11 にフィードバックの有無でのバンチ結合振動モード $n = 8$ の振幅の変化を示す。26 kW 及び 52 kW においては加速前半から振動が大きく、強度が増えるにつれて振動が大きくなっている。100 kW 及び 150 kW においては、加速前半に二次高調波を用いたために振動振幅が抑えられているが、150 kW では加速後半で振幅が増大している。加速開始 0.2 s 以降からフィードバックを開始以降は振動振幅をほぼ 1 度以下に抑えられている事が分かる。

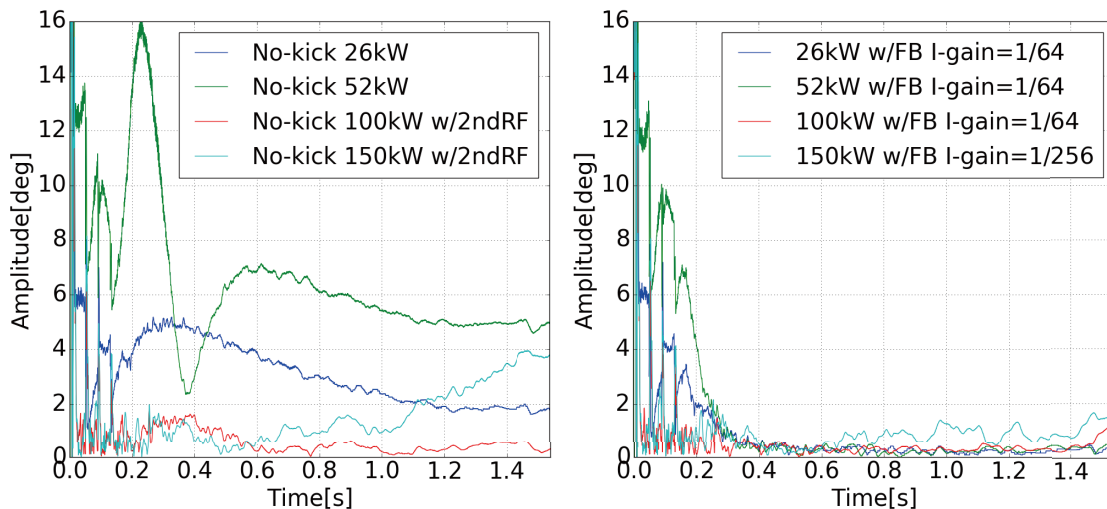


Figure 11: Oscillation amplitude of the CB mode $n = 8$ for the beam without FB (Left) and with FB (right) of I-control for various beam power.

5. まとめと展望

J-PARC MR におけるバンチ結合振動を抑制するために、バンチ結合振動フィードバックシステムを開発した。開発したシステムを用いてビーム試験を行い、フィードバックシステムの動作を確認した。ビーム振動を誘起させ、それを用いて位相補正 LUT の調整やフィードバックの動作確認を行った。その結果、ビーム強度 13 kW で作成した LUT を用いたフィードバックによるビーム強度 150 kW までの範囲におけるバンチ結合振動の抑制が確認できた。

今後は更なる大強度でのフィードバックに向けたシステムの調整を進め、500 kW を越える強度でのバンチ結合振動の少ない安定なビーム供給を目指す。大強度での調整を行うためのフィードバックモジュールの改善としては、振動成分を復調した後に変調せずにそのまま直接フィードバック入力とする改良を検討している。

参考文献

- [1] T. Koseki *et al.*, Prog. Theor. Exp. Phys. 2012 (2012) 2B004.
- [2] Y. Sugiyama *et al.*, Proc. 14th Annu. Meet. Part. Accel. Soc. Japan, pp. 1072–1076, 2017.
- [3] Y. Sugiyama, F. Tamura and M. Yoshii, Proc. Int. Beam Instrum. Conf. 2017, pp. 225–228, 2017.
- [4] F. Pedersen and F. Sacherer, IEEE Trans. Nucl. Sci. 24 (1977) 1396.
- [5] Y. Sugiyama, F. Tamura and M. Yoshii, Conf. Rec. - 21st IEEE Real Time Conf. Colon. Williamsburg, USA, 2018.
- [6] T. Toyama *et al.*, Proc. 2005 Part. Accel. Conf., pp. 958–960.
- [7] M. Ryoshi *et al.*, Proc. 12th Annu. Meet. Part. Accel. Soc. Japan, pp. 818–822, Tsuruga, 2015.
- [8] B. Kriegbaum and F. Pedersen, IEEE Trans. Nucl. Sci. 24 (1977) 1695.
- [9] F. Tamura *et al.*, Phys. Rev. Spec. Top. - Accel. Beams 16 (2013) 051002.