

位相変調を用いたコヒーレントなシンクロトロン振動の抑制

SUPPRESSION OF COHERENT SYNCHROTRON OSCILLATION USING PHASE MODULATION TO RF ACCELERATING VOLTAGE

大島隆^{#,A,B)}, 前坂比呂和^{B,A)}, 岩井瑛人^{A,B)}, 稲垣隆宏^{B,A)}

Takashi Ohshima^{#,A,B)}, Hirokazu Maesaka^{B)}, Eito Iwai^{A,B)}, Takahiro Inagaki^{A,B)}

A) Japan Synchrotron Radiation Research Institute

B) RIKEN SPring-8 Center

Abstract

We tested a new feedback control system which suppressed a coherent synchrotron of the stored beam at the SPring-8 storage ring. Currently a feedback control system to suppress this oscillation is based on a Frequency Modulation (FM) to the master oscillator of the storage ring, where the FM depth is proportional to the beam phase. Because the signal from the master oscillator is also used for a beam position system and high power laser system, this feedback control system may deteriorate the performance of other systems by increases the phase noise. To overcome this situation, a new feedback control system is developed where a Phase Modulation (PM) to the acceleration voltage of one of four RF station is used. The PM depth is proportional to the horizontal beam position at a dispersive section. A beam test showed that the new system suppressed the coherent synchrotron oscillation by 20 dB for beam phase, which were 4 dB better value than that of the existing system.

1. はじめに

第3世代放射光施設 SPring-8 では蓄積ビームのコヒーレントなシンクロトロン振動をマスターオシレータに対する FM 変調で抑制するシステムが運用されている[1]。コヒーレントなシンクロトロン振動は、全電子バンチのエネルギーや到達位相がシンクロトロン振動数で同期して振動する現象である。この振動振幅が大きいと、放射光の中心エネルギーの変動や、蓄積ビームの不安定性を抑制する Bunch by Bunch Feedback (BBF) system の信号処理回路のダイナミックレンジを狭くするなどの悪影響を与える場合がある。そのため、この振動を抑制するシステムが運用されている。現システムではシンクロナス位相からのずれ時間 τ を検出し、リングを周回する電子ビームのエネルギーを決定しているマスターオシレータの周波数に対して変調を行うことによりその振動の抑制を実現している。しかし、マスターオシレータからの信号は、放射光実験で使用する単パルス大強度レーザーや BPM による COD 測定などにおいて基準となる信号であり、ここに対して変調を印加することは位相雑音を増加させることになり、前記のシステムの精度の悪化を引き起こす可能性がある。また、次期計画である SPring-8-II ではエミッタンスが現在より数十分の1となりさらなるビーム安定性が要求されることから位相雑音を増加させることは望ましくない。

そこで、基準 RF 信号の位相雑音精度は保持したまま、コヒーレントなシンクロトロン振動の抑制を行う方法を検討した。ビームの規格化エネルギー偏差 $\delta = (p-p_0) / p_0$ とシンクロナス位相の基準粒子から

のずれ時間 τ との間には、 $d\tau/dt = -\alpha\delta$ の関係があり、 δ と τ の間には 90 度の位相差がある。我々は δ を測定し、RFステーションの加速電圧に位相変調を印加する方式を採用した。 δ の検出には、エネルギー分散部の水平位置信号を用いた。位相変調は RF ステーションの加速空洞の電圧安定化フィードバックシステム[2]の位相目標値に変調をかけることで実現することとした。

今回の報告では試験のセットアップ、結果および今後の予定について報告する。

2. シンクロトロン振動

シンクロナス位相の基準粒子からのずれ時間 τ の充たす式は近似的に Eq. (1) のように表すことができる[1]。

$$\frac{d^2\tau}{dt^2} + 2\alpha_e \frac{d\tau}{dt} + \omega_s^2\tau = \omega_n\Psi \quad (1)$$

ここで α_e はダンピングに関連する因子、 ω_s はシンクロトロン振動数、 $\omega_n\Psi$ は高周波加速電場の位相に対する外乱を表す。ここに、エネルギー偏差 δ に比例した位相変調を印加した場合の式は近似的に Eq. (2) のように表すことができる。

$$\frac{d^2\tau}{dt^2} + 2\alpha_e \frac{d\tau}{dt} + \omega_s^2\tau = \omega_n(\Psi + Z\delta) = \omega_n\left(\Psi - \frac{Z}{\alpha} \frac{d\tau}{dt}\right) \quad (2)$$

τ および $\omega_n\Psi$ が $e^{i\omega t}$ の形で表される場合、Eq.(2)は Eq. (3)、Eq. (4)の形になり、フィードバック制御の利得 Z を大きくすると振動振幅が低減されることがわかる。

[#]ohshima@spring8.or.jp

$$-\omega^2 \tau + 2\alpha_e i \omega \tau + \omega_s^2 \tau = \omega_n \left(\Psi - \frac{Z i \omega}{\alpha} \tau \right) \quad (3)$$

$$\tau_0 = \frac{\theta}{(\omega_s^2 - \omega^2) + \left(\frac{-Z \omega_n \omega}{\alpha} + 2\alpha_e \right) \omega i} \quad (4)$$

3. 試験のセットアップ

3.1 ビームエネルギーの測定

電子ビームのエネルギーは、02セルのBPM3を使用した。この位置での水平方向のエネルギー分散は0.168 mである。BPMシステムは4つのボタン電極からの信号をMTCA.4規格の信号処理回路で処理し水平および垂直の位置を算出する[3]。Figure 1にブロック図を示す。BPMで検出した水平方向の位置情報は、Small Form-factor Pluggable (SFP) 光伝送モジュールで光信号に変換されてRFステーションの位相調整室まで伝送される。データはターン毎208 kHzのレートで24 bitの分解能で伝送される。

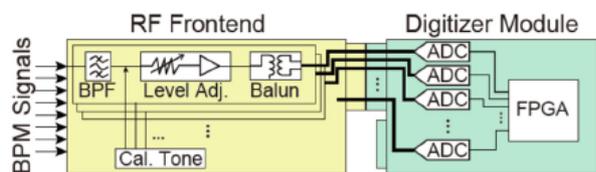


Figure 1: Block diagram of a Beam Position Monitor.

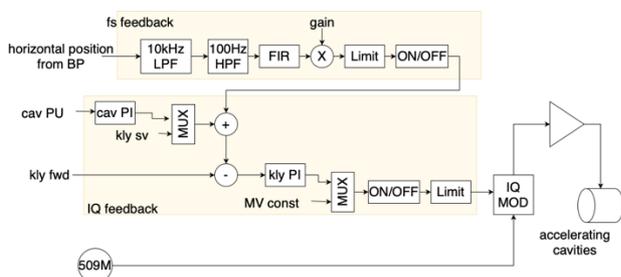


Figure 2: Block diagram of suppression of the coherent synchrotron oscillation using phase modulation at the RF station.

3.2 RF 加速電場の変調

電子ビームのエネルギー情報をもとにRF加速電場に変調をかけて、コヒーレントなシンクロトロン振動の抑制を行う。変調量は大きくないので、4つのRFステーションのうち、3箇所に対しては変調は印加せず、1箇所(Aステーション)においてのみ、上記の抑制プロセスを起動することにした。

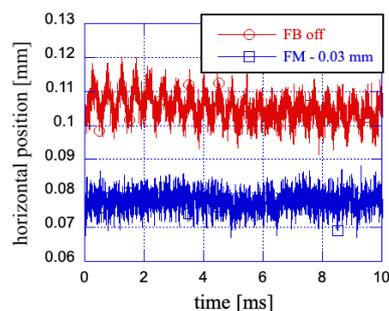
BPMで検出する水平方向の情報には、シンクロトロン振動以外に、冷却水の振動や地面の振動など該当する振動(100 Hz以下)や、ビームのベータトロン振動(およそ30 kHz近傍)の情報も含まれている。そこで、エネルギー振動成分を抽出するために、

ビーム信号はカットオフ周波数100 Hzの高域通過IIRフィルタ、周波数10 kHzの低域通過IIRフィルタを通過させた。その後、比例利得を乗じたのち、加速空洞の位相フィードバックの設定目標値に加算することにした。比例利得の値の変更、フィードバック制御のON・OFFは遠隔で制御可能である。Figure 2にブロック図を示す。

4. 測定結果

BPMでエネルギー振動の測定が可能かどうかの確認をまず行った。Figure 3 a)にBPMで計測した水平方向の位置のトレンド、b)にそのFFTスペクトラムを示す。従来のFM制御方式のコヒーレントなシンクロトロン振動のフィードバック制御をオフした条件では時間領域でおよそ0.5 ms周期の変動が、周波数領域では2.2 kHzのピークが見られた。振動振幅のピークは $\delta = 10 \mu\text{m} / 0.168 \text{ m} \sim 6 \times 10^{-6}$ に対応する。ここで、周波数スペクトラムへの変換にはターンごとのビーム位置データ65536点についてFFT変換とスムージングを施した結果を示している。このピークは、フィードバック制御をオンにした条件ではその振幅が抑制されていて、確かにコヒーレントなシンクロトロン振動成分であることがわかった。

a)



b)

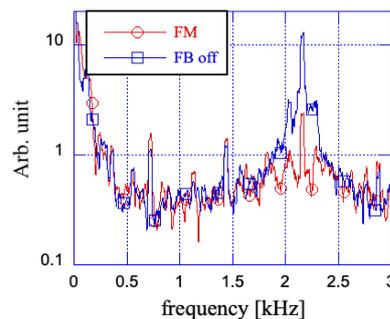


Figure 3: The trend (a) and spectrum (b) of the measured horizontal beam position at dispersive section. The open circle and open square line show data with and without FM feedback control, respectively.

エネルギー振動の測定が可能であることがわかったので、次に、FM制御方式のフィードバック制御

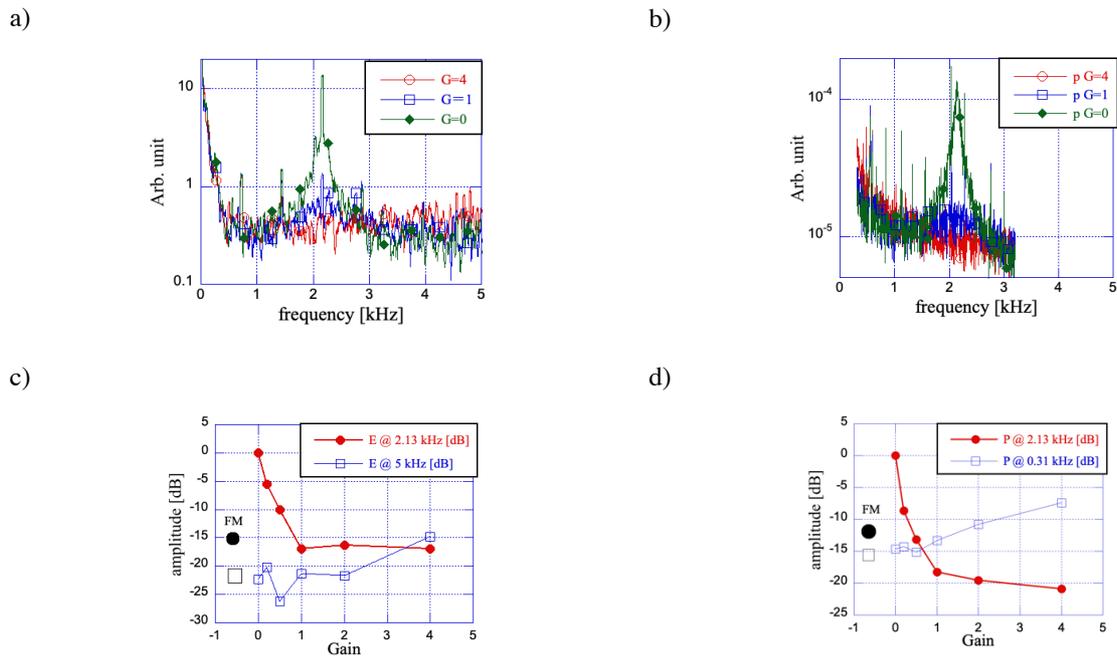


Figure 4: The spectrum of the energy oscillation (a) and the phase oscillation (b) with changing the feedback control gain. The amplitude near 2kHz peak is shown with filled circle for the energy spectrum (c) and for the phase spectrum (d).

は停止して、位相変調によるコヒーレントなシンクロトロン振動のセットアップを用いてビームの振動の抑制をおこなった。フィードバック制御のゲインを変えて測定したエネルギー振動のスペクトラムを Fig. 4 (a)に、位相振動のスペクトラムを Fig. 4 (b)に示す。ゲイン 0 では 2 kHz 付近にピークが見られていたが、ゲインを高くすると、そのピークの振幅は低下した。フィードバックゲインとピーク近傍のエネルギー振動振幅の関係を Fig. 4 (c)に、位相振動振幅との関係を Fig. 4 (d)に示す。ゲインを高くすると 2 kHz の振動振幅が低くなる傾向が見られたが、5 kHz 付近のエネルギー振動振幅や 0.3 kHz 付近の位相振動振幅が増加する傾向が見られた。これは雑音を増幅することによって人工的な振動が重畳されていることを示している。実運用ではコヒーレントなシンクロトロン振動振幅の抑制と雑音増幅とのバランスを考えて、ゲイン 2 程度の値を選択する予定である。Figure 4 (c), (d)には FM 変調方式での 2 kHz での抑制量 (黒丸) と 5 kHz または 0.3 kHz での抑制量 (白四角) も併せて示した。コヒーレントなシンクロトロン振動振幅の抑制量はエネルギー変動に対して約 16 dB、ビーム位相変動に対して約 20 dB が得られ、今回採用した位相変調方式が FM 変調方式よりも 4 dB 優れていることがわかった。

5. まとめ

我々は RF ステーションの加速電圧に位相変調を与える方式の開発を行った。試験の結果、コヒーレントなシンクロトロン振動振幅の抑制量はエネルギー変動に対して約 16 dB、ビーム位相変動に対して約 20 dB が得られ、RF 基準信号の位相雑音を増や

すことなく FM 変調の抑制状態よりさらに低い振動レベルに抑えられることを確認できた。今後、位相変調方式の実運用に向けて準備を進める予定である。

謝辞

フィードバックシステム構築に関しては多くの方々に協力をいただいた。すべてを網羅することはできないが、LLRF システムのモジュール製作に協力いただいた三菱電機特機システムの岩城氏、漁師氏、現場での測定を実施したスプリングエイトサービスの運転員の方々に感謝の意を表す。

参考文献

- [1] T. Ohshima and N. Kumagai, "Suppression of Coherent Synchrotron Oscillation of the SPring-8 Storage Ring", Proc. of the 19th Particle Accel. Conf., 2001, p.1975.
- [2] T. Ohshima *et al.*, "Development of a new LLRF system based on MicroTCA.4 for the SPring-8 storage ring", Proc. of IPAC2017, 2017, p.3996.
- [3] H. Maesaka *et al.*, "SPring-8/SACLA における高周波制御とビーム診断での MTCA.4 の活用", presentation at the MTCA workshop for accelerator and physics in Japan, Oct. 26-28, 2021.