

# 回折限界光源における縦方向不安定性評価を目的とした MBTRACK コードへの Direct RF feedback 機能の実装

## IMPLEMENTATION OF DIRECT RF FEEDBACK FUNCTION TO A BEAM TRACKING CODE MBTRACK

山本 尚人

Naoto Yamamoto\*

High energy accelerator research organization, KEK

### Abstract

For the design of future ring-based light sources, a macro-particle simulation code MBTRACK, which is a multi-bunch tracking code to investigate collective effects in circular accelerators, have been developed. A function of the direct RF feedback system has been implemented to the MBTRACK. A direct RF feedback system has been employed as an additional function of low level RF system in recent storage rings. The system reduces the cavity impedance as seen by the beam, and allows us to reduce the beam loading effect for maximizing the stored beam current. In this paper, the detail of the implemented function and a result of benchmarking tests for the static Robinson effect are reported.

### 1. はじめに

次世代放射光源加速器として世界中で 1 nmrad を大きく下回るような極低エミッタンスリングの設計・建設が進んでいる。これに対し KEK では特定の性能（例えば輝度）だけを究極にして他の特性を犠牲にするような方向ではなく、いろいろな特性を活かせる多様性（柔軟なパルス特性、広い波長領域、試料非破壊、多様な挿入光源に対応など）を確保できる次世代光源 [1] を検討している。

近年の加速器設計において計算機シミュレーション、特に粒子トラッキングにおけるリング内でのビーム安定性評価の重要性が増している。MBTRACK [2] はマルチバンチのマクロ粒子トラッキングコードであり、SBTRACK [3] を拡張して作られた。SBTRACK はリングを周回するバンチと wake field の相互作用を 6 次元位相空間でシミュレートする計算コードであり、様々な wake function のコンボリューションとして求めた wake potential とマクロ粒子との相互作用をリングの 1 周回毎にトラッキングする。ここで、wake function は任意のモデルを仮定して指定するだけでなく、別途インピーダンス計算コード等で計算した wake function を基本的な wake function の和として用いることも可能である。

特にフィルパターンにバンチギャップが存在したり、高調波空洞などのビーム負荷が重要となる系を考える場合、リング内に存在する高調波空洞も外部入力 RF とビーム自身が励振する RF とのベクトル和として計算することでより正確な評価が可能となる。MBTRACK では 2019 年にこの機能が実装され、縦方向のビーム不安定性や高調波空洞により導入される synchrotron tune spread を介した Landau 減衰がビーム安定性に及ぼす影響も評価可能となった [4]。

高周波空洞と周回粒子の相互作用を評価する場合、空洞のフィードバックの扱いが重要となる。こ

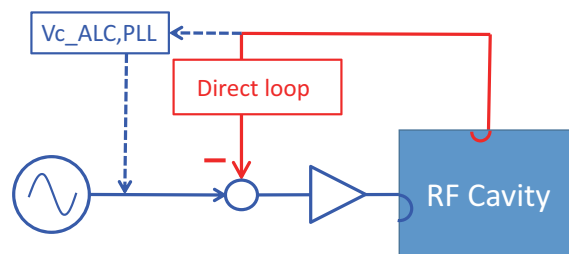


Figure 1: Schematic of direct RF feedback system.

れまで空洞のフィードバックとしては、一般的には空洞ピックアップ信号を処理して実装される RF 振幅・位相の安定化を適当な平均時間とフィードバックゲインを与えたモデルで表現していたが、今回は新規にダイレクト RF フィードバック [5] の実装を試みた。本論文では、ダイレクト RF フィードバックの実装とベンチマーク計算の結果について報告する。

### 2. ダイレクト RF フィードバック

ダイレクト RF フィードバックは高周波空洞からピックアップした RF 信号の一部を帰還しドライブ信号から減算するフィードバックである (Fig. 1 参照)。ドライブ信号から減算された分の RF 電力は通常の振幅・位相フィードバック (Fig. 1 にて Vc\_ALC, PLC として示す) によって補償され、RF 電圧としてはダイレクト RF フィードバックのない場合と同じ値に保たれる。

このフィードバックにより、周回ビームが感じる高周波空洞の加速モードインピーダンスが小さくなり、縦方向のコヒーレント振動のビーム負荷増大に伴う減少が緩和できる。また、加速モード起因のビーム不安定性を避けることが可能となる。

MBTRACK では、このフィードバックを実装するため、フィードバックゲイン  $G_{fb}$ 、フェイズシフト  $\phi_{fb}$ 、ループディレイ  $\Delta T$  をパラメータとして導入した。この場合、ダイレクト RF フィードバックの電圧

\* naoto.yamamoto@kek.jp

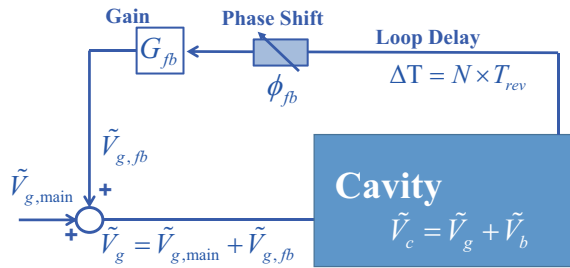


Figure 2: Schematic of direct RF feedback system in MBTRACK.

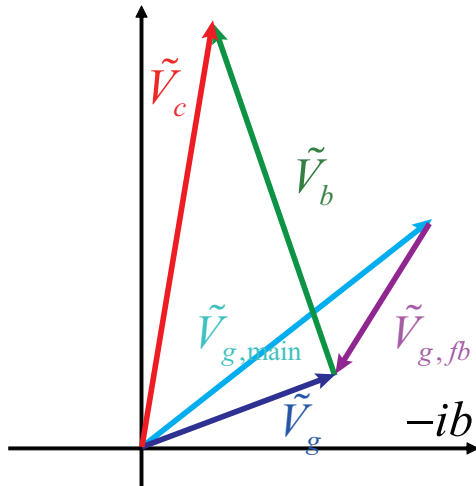


Figure 3: Phasor diagram of direct RF feedback system in MBTRACK.

$V_{g,fb}$ , 位相成分  $\angle V_{g,fb}$  は下記で与えられる。

$$\begin{aligned} V_{g,fb} &= G_{fb} V_c(\Delta T) & (1) \\ \angle V_{g,fb} &= \angle V_c(\Delta T) + \phi_{fb} & (2) \end{aligned}$$

ここで、 $\Delta T$  はリングの周回時間の整数倍、 $V_c(\Delta T)$  は時間  $\Delta T$  前の空洞電圧ピックアップ信号に対応する。

MBTRACK 内でのダイレクト RF フィードバックの取り扱いの模式図を Fig. 2 に示す。Figure 1 と異なる点は高周波増幅器をモデル化していない点であり、コード内では高周波増幅器や空洞の応答による位相遅延を考慮していない。また、ドライブ信号とフィードバック信号の関係も減算ではなく加算として扱っている。従って、コード内で与えるフェイズシフトの絶対値は実際のシステムで与える値と異なることに注意が必要となる。

Figure 3 は高周波空洞を介して周回粒子が感じる RF 電圧をフェーザー図に示したものである。フィードバックの有無にかかわらず、 $\tilde{V}_c$  を一定にする制御をしているため、 $\tilde{V}_g = \tilde{V}_{g,main} + \tilde{V}_{g,fb}$  の関係が成り立つ。

### 3. ベンチマーク

実装した機能がうまく働くことを調べるためにベンチマーク試験を行った。上述したようにダイレクト RF フィードバックを適切な条件で用いることで、蓄積リングの平均電流増加に対するコヒーレントなシンクロン振動数のシフトが抑えられるはずである。

本論文ではまず、KEK Photon Factory (KEK-PF) で行った Static Robinson 不安定性評価 [6, 7] のビーム試験の条件を MBTRACK で再現し、コヒーレント周波数の応答の再現を試みた。KEK-PF ではダイレクト RF フィードバックは実装していないが、平均電流に対するコヒーレント周波数応答について詳細な解析を行っているため、ベンチマークに最適だと考えた。次に、SuperKEKB HER を対象にベンチマークを行った。SuperKEKB ではダイレクト RF フィードバックシステムが実装されており、ビーム試験の結果が報告されている [8]。

#### 3.1 KEK-PF

MBTRACK では、OpenMPI による並列化処理を行うことで計算速度の向上を図っており、計算するバンチ数だけ CPU コアを割り当てる必要がある。計算ではコア数を節約するため、全 312 バケットのうち 4 バケットおきに電荷量の同じバンチを 1 つ配置した。従って計算に用いた CPU コアは 79 個 (バンチ 78 個分+プロセス管理用 1 個) となる。

バンチあたりのマクロ粒子数は 10 万個とし、各電流値において縦方向のみ 10,000 周回分のトラッキングを行った。マクロ粒子との相互作用の計算で仮定したインピーダンス源は高周波空洞のみであり、高周波空洞には空洞電圧を一定とするため、外部 RF とチューナ制御による空洞電圧・位相のフィードバックを適用した。CPU は Intel Xeon E5-2640v4 (2.40GHz) を使い、計算時間は各電流値あたり 4 分程度であった。

トラッキングでは各電流値においてマクロ粒子を 2000 ターン周回させ運動が平衡に達した後に、任意のバンチにキックを与え応答を調べた。バンチのコヒーレント周波数は、1 周回毎のバンチの重心振動の様子を高速フーリエ変換にて周波数スペクトルに変換、その後ローレンツ振動子のモデル関数 (ローレンツ関数) でフィットして求めた。一方、KEK-PF で実際に行った試験では、FFT アナライザ (Agilent 35670A) もしくはスペクトルアナライザ (ADVANTEST U3771) のトラッキングジェネレータ出力とビーム位置モニタ信号で得た周波数応答をローレンツ関数でフィットして求めた。

KEK-PF にて空洞電圧 1.7 MV の場合に蓄積電流値を変えて得られたコヒーレントなシンクロン周波数を、MBTRACK, スペクトルアナライザ (SA), FFT アナライザ (FFT) のそれぞれの場合について Fig. 4 に示す。MBTRACK での計算条件は、ビーム試験 [6, 7] 時と同じである。Figure 4 のプロットには測定精度とフィッティングを加味してエラーバーを示してあ

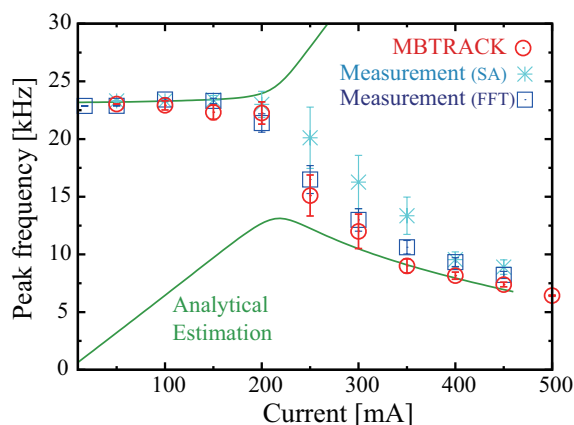


Figure 4: Coherent synchrotron frequencies as a function of storage current with the RF voltage of 1.7 MV at KEK-PF.

り、本測定においてはFFTアナライザの方がより信頼できると考えている。また、参考として文献[6]の補遺で記した解析式から算出した値をAnalytical Estimationとして実線で示してある。

Figure 4ではMBTRACKの計算結果が実験結果を良く再現していることがわかる。このことから、MBTRACK内での空洞インピーダンスや空洞電圧・位相フィードバックの与え方が適切であることが確かめられた。また、ここでは示さないが、ローレンツ関数のもう一つのフィッティングパラメータである減衰項や電流一定で空洞電圧を下げたときに得られるビームダンプの閾値についても、MBTRACKが実験及び解析解をよく再現することを確認している。

### 3.2 SuperKEKB

次にダイレクトRFフィードバックの効果をベンチマークするために、文献[8]の第4節の条件を踏襲してトラッキングシミュレーションを行った。ただし、ダイレクトRFフィードバックの設定パラメータについては、MBTRACKで実装したものと異なるため、パラメータは電流増加に対し周波数シフトを最小に抑えられる条件を選んだ。その結果、 $G_{fb} = 1.0$ ,  $\phi_{fb} = 30.0$  deg,  $\Delta T = 0$  secとなった。

MBTRACKの計算では、全5120バケットのうち32バケット置きにバンチを配置し、計算に必要なCPUコア数は161個に抑えた。バンチあたりのマクロ粒子数は前節のKEK-PFについての計算と同じ10万個とし、トラッキングの周回数は20,000周を選んだ。仮定したインピーダンス源は2種類の高周波空洞のみであり、空洞電圧・位相のフィードバックもそれぞれに適用した。

また、SuperKEKBのビーム試験ではダイレクトRFフィードバックの他にZero mode damper (ZMD)も用いていたが、本トラッキングシミュレーションでは適用しなかった。MBTRACKでもインピーダンスモデルにてZMDを追加することは可能であるが、詳細なパラメータを再現し、その効果をベンチマークするのに時間がかかると考えたからである。従って、

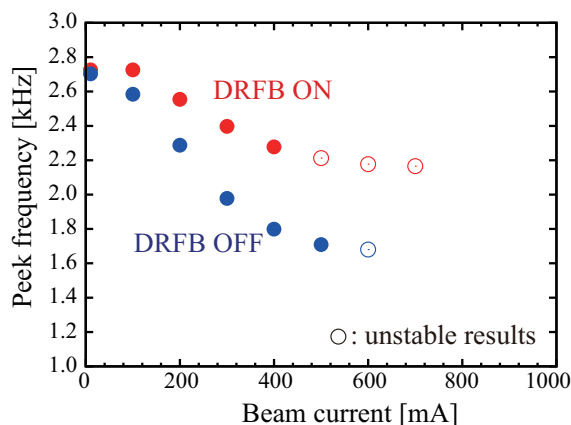


Figure 5: Coherent synchrotron frequencies with (red) without (blue) the direct RF feedback system as a function of storage current for the SuperKEKB HER case [8]. Unstable beam motions were observed for the conditions indicated by open circles.

実際のビーム試験でZMDによるビーム安定化が必要となる高い蓄積電流領域においては、MBTRACKと実験データに差が生じることが予測された。

MBTRACKでのトラッキング結果から算出したコヒーレント周波数をダイレクトRFフィードバック有り(赤)、無し(青)の場合についてそれぞれFig. 5に示した。また、トラッキングでは蓄積電流値が一定以上高くなるとビーム不安定性が生じることも確認された(白抜きの円で示す)。Figure 5から、ダイレクトRFフィードバックの有無によって電流値増加によるコヒーレント周波数に差が生じているがわかる。その変化量はダイレクトRFフィードバックを働かせることで、効果的に小さくなっていることがわかる。

Figure 5を文献[8]のFig. 8と比較すると、MBTRACKの計算結果はビーム不安定性が生じない範囲においてビーム試験の結果をよく再現している。一方、MBTRACKでビーム不安定性の発生した領域では、ビーム試験結果との差異が生じている。これは上述したが、MBTRACKではZMDがないためビーム不安定性が発生し、その影響がでていると考えられる。

## 4. まとめ

将来光源設計のためのビームダイナミクスの研究ツールとしてMBTRACKの開発を行っている。本研究では高周波空洞の制御に関わる機能としてダイレクトRFフィードバックの実装を行った。

MBTRACKの動作について、KEK-PF及びSuperKEKBのビーム試験結果にてベンチマークを行った。その結果、いずれのビーム試験結果もMBTRACKでよく再現できることが確かめられた。今後、引き続きMBTRACKの改良及び、KEK将来光源に向けた検討を進めていく予定である。

## 謝辞

本研究を進めるにあたり、SOLEIL synchrotron の A. Gamelin, R. Nagaoka 両氏には MBTRACK 開発において貴重な助言を頂きました。同じく SOLEIL synchrotron の P. Marchand 氏には、本研究の同期付け及びダイレクト RF フィードバックの技術的な面について貴重な助言を頂きました。KEK 加速器研究施設第 6 系の坂中章悟教授には継続的な助言・励ましを頂きました。

## 参考文献

- [1] H. Harada, N. Funamori, N. Yamamoto, and et. al., “Conceptual design of hybrid ring with superconducting linac,” *submitted in Journal of Synchrotron Radiation*, 2021.
- [2] G. Skripka, R. Nagaoka, M. Klein, F. Cullinan, and P. F. Tavares, “Simultaneous computation of intrabunch and interbunch collective beam motions in storage rings,” *Nucl. Instr. Meth. A*, vol. 806, pp. 221–230, 2016.
- [3] R. Nagaoka, R. Bartolini, and J. Rowland, “Studies of collective effects in soleil and diamond using the multiparticle tracking codes sbtrack and mbtrack,” in *Proc. of PAC09*, vol. 1. Vancouver, BC, Canada, 2010, pp. 4637–4639.
- [4] N. Yamamoto, A. Gamelin, and R. Nagaoka, “Investigation of Longitudinal Beam Dynamics With Harmonic Cavities by Using the Code Mbtrack,” in *Proc. 10th International Particle Accelerator Conference (IPAC'19), Melbourne, Australia, 19-24 May 2019*, no. 1. Geneva, Switzerland: JACoW Publishing, Jun. 2019, MOPGW039, pp. 178–180. ; <http://jacow.org/ipac2019/papers/mopgw039.pdf>
- [5] D. Boussard, “Control of cavitles with high beam loadng,” *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 32, no. 5, pp. 1852 – 1856, 1985. ; [https://accelconf.web.cern.ch/p85/PDF/PAC1985\\_1852.pdf](https://accelconf.web.cern.ch/p85/PDF/PAC1985_1852.pdf)
- [6] T. Yamaguchi, S. Sakanaka, and N. Yamamoto, “Study on the static robinson instability at the pf storage ring,” in *Proc. of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, no. FRPI010, Aug. 2019, pp. 1042 – 1046. ; [https://www.pasj.jp/web\\_publish/pasj2019/proceedings/PDF/FRPI/FRPI010.pdf](https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2019/proceedings/PDF/FRPI/FRPI010.pdf)
- [7] T. Yamaguchi, S. Sakanaka, N. Yamamoto, D. Naito, and T. Takahashi, “Study on the coherent synchrotron oscillation and the staticrobinson instability at the PF 2.5 GEV ring,” in *Proc. of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, no. F, Sep. 2020, pp. 320 – 324. ; [https://www.pasj.jp/web\\_publish/pasj2020/proceedings/PDF/FR0T/FR0T01.pdf](https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2020/proceedings/PDF/FR0T/FR0T01.pdf)
- [8] K. Akai, A. Kabe, T. Kobayashi, K. Nakanishi, and M. Nishiyaki, “Verification of rf feedback to suppress longitudinal instability due to beam loading in SUPERKEKB,” in *Proc. of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, no. WEPP35, Sep. 2020, pp. 168 – 172. ; [https://www.pasj.jp/web\\_publish/pasj2020/proceedings/PDF/WEPP/WEPP35.pdf](https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2020/proceedings/PDF/WEPP/WEPP35.pdf)