

円型加速器用多粒子トラッキングコード mbtrack を用いた RF 空洞起因のビーム不安定性研究

BEAM STABILITY INVESTIGATION WITH RF CAVITY IMPEDANCES BY USING MULTIPARTICLE TRACKING CODE MBTRACK

山本尚人 ^{*A)}, A. Gamelin^{B)}, R. Nagaoka^{B)}

Naoto Yamamoto^{*A)}, Alexis Gamelin^{B)}, Ryutaro Nagaoka^{B)}

^{A)}High Energy Accelerator Research Organization, KEK

^{B)}Accelerator Physics Group, Synchrotron SOLEIL

Abstract

The *mbtrack* code is a multi-bunch tracking code to investigate collective effects in circular accelerators. In the next generation light sources, the impact of harmonic cavity on the beam dynamics should be investigated. For this purpose, we extended the *mbtrack* code to be able to treat high-Q resonators in a more general manner as the previous versions. By using this extension, the impact of main/harmonic rf cavities and their parasitic resonant modes can be investigated with arbitrary bunch filling patterns. As a result of benchmarking tests, it is confirmed that well-known instabilities caused by cavity-impedances, such as AC/DC Robinson and coupled bunch instabilities, could be simulated.

1. はじめに

極低エミッタンスを狙う次世代の回折限界リングでは、電子ビームを安定に周回させるため6次元空間における慎重なビームダイナミクスの検討が必要不可欠である。特にバンチ内電荷密度を緩和するために用いられる高調波空洞システムは電子のバンチ内運動を非線形にする作用がある。このバンチ内運動はシングル及びマルチバンチ双方のビーム安定性に影響を及ぼすため、より詳細な検討が必要とされている [1–3]。

高調波空洞を主空洞と合わせて用いることで、電子が感じる実効的な高周波 (RF) ポテンシャルが平坦になり (これを “Flat potential condition” と呼ぶ)、電子バンチの縦方向収束力を緩和できる。この結果、自然長と比べ RF 周波数や採用する高調波次数にもよるが、最大5倍程度のバンチ伸張率が期待できる。しかし、バンチ伸張運転における高調波空洞電圧はビーム誘起電圧がその成分のほとんどを占め、バンチの重心位相や分布形状の変化に敏感である。このため、高調波空洞を用いたバンチ伸張運転では、平衡状態から少しずれた過渡的なビームを安定化できる信頼性の高い加速器運転条件の確立や空洞自身の設計を行う必要がある。

本研究では “flat potential condition” がビームダイナミクスに与える影響、さらに参考文献 [1–3] で指摘されるような高調波空洞の結合インピーダンスが引き起こすビーム不安定性を理解し、次世代光源リングに適用可能な高調波空洞システムを探求することを目的にビームトラッキングツールの開発を行った。開発では既存の電子ビームトラッキングコード “mbtrack” [4, 5] を用い、高調波空洞システムを計算で再現するのに必要な機能を追加した。本論文では mbtrack を簡単に紹介した後、追加した機能について説明する。さらに、計算の妥当性を確認するために行ったベンチマークテストの結果を示す。

2. MBTRACK CODE

mbtrack は sbtrack [4] コードをマルチバンチに拡張したコードである。sbtrack は6次元位相空間でのwake場と単一バンチ内電子との相互作用を粒子トラッキングによりシミュレートし、特に電荷密度の高い状態でのビーム安定性を調査するために開発された。mbtrack では複数のバンチを扱うことにより、バンチ内に合わせバンチ間の運動をも取り扱うことが可能となった。

通常、mbtrack ではバンチ内粒子を数万個のマクロ粒子を用いて表現し、蓄積リング内に存在する種々のインピーダンス源が各バンチ内粒子に与える影響をシミュレートする。我々が改良に取りかかる以前の2016年版 [5] では、self-field, resistive wall, broad-band resonator, そして narrow-band (high-Q) resonator の取り扱いが可能であった。mbtrack コードはC言語で記述されており、計算速度向上のためOpenMPIが使われている。

mbtrack では2016年の改良 (2016年度版) において、narrow-band resonator, すなわち外部からRFパワーを供給されない (Passive) 空洞、を通過する粒子が誘起するwakefieldの複素時間発展としてビーム誘起電圧 (beam-induced voltage) を計算するルーチンが追加された。この改良によりPassive高調波空洞運転時の計算が可能となったが、それ以外のActive空洞の取り扱いができない、主空洞はいわゆる正弦波として理想的に扱われるなど、高調波空洞システムのビーム安定性評価を行うには十分ではなかった。なぜなら、主空洞自体も高調波空洞と同様に結合インピーダンスを介して電子ビームと相互作用し、空洞内部の電圧が時々刻々変化する。この変化はRFポテンシャルの形成つまりビームダイナミクスに大きく影響を与えるからである。また近年、シングル、数バンチ運転など平均蓄積電流の低い状態でのバンチ伸張も強く求められつつあるが、この要求を満たすにはActive高調波空洞を採用し、ビーム誘起電圧のみでは不足する分のRF電力を補う必要があるからである。

* naoto.yamamoto@kek.jp

3. 新機能の追加

mbtrack において、一般的な RF 空洞の取り扱いを可能とするため、既存の narrow-band resonator ルーチンを拡張した。具体的には下記に挙げる修正を行った。

- narrow-band resonator ルーチンに外部電力による電圧 (Generator-induced voltage) の取り扱いを追加
- 主加速空洞を narrow-band resonator ルーチンで取り扱えるよう拡張
- 各空洞において空洞電圧と位相を一定に保つフィードバックルーチンを追加
- 任意のフィルパターンにて計算可能とするためのルーチンを追加

あるバンチ内の m 番目の粒子によるビーム誘起電圧 $\tilde{V}_b^{(m)}$ は、resonator の共鳴角周波数 ω_r , 負荷 Q 値 Q , ショントインピーダンス R_s , 粒子電荷 q_m を用いると以下のように書ける。

$$\tilde{V}_b^{(m)} = \tilde{V}_b^{(m-1)} \exp \left[\left(i\omega_r - \frac{\omega_r}{2Q} \right) (t_m - t_{m-1}) \right] - \frac{\omega_r R_s}{2Q} q_m \quad (1)$$

次に空洞電圧 $\tilde{V}_c^{(m)}$ は Generator-induced voltage \tilde{V}_g と $\tilde{V}_b^{(m)}$ の和として与えられる。

$$\tilde{V}_c^{(m)} = \tilde{V}_g + \tilde{V}_b^{(m)} \quad (2)$$

ここで、 \tilde{V}_g は振幅 $|\tilde{V}_g|$ および位相 θ_g で特徴付けられる量である。空洞フィードバックルーチンにおいては、 \tilde{V}_g と ω_r を用いて電圧と位相の一定化を図る。ただし、 ω_r の値はチューニング角を介して操作される。

4. ベンチマークテスト

新機能について計算が正しく行われていることを確認するためにベンチマークテストを行った。ベンチマークテストは主空洞が誘起する不安定性のうち、DC 及び AC Robinson 不安定性 [6] そして空洞の高次モードが引き起こすバンチ結合型不安定性について試験を行った。この際、蓄積リングのパラメータとしては KEK が提案した次世代 3GeV 放射光源 (KEK-LS) [7] を用い、計算項目に用いて幾つかパラメータを変更した。これら計算には高調波空洞は考慮せずフィルパターンは数値的に解析解の求めやすいユニフォームフィルを選んだ。

また、今回追加した機能ではバンチギャップによる過渡的な空洞電圧変化の計算も重要である。この目的には Swiss Light Source (SLS) で実際に高調波空洞を用いて得られた試験報告 [8] とほぼ等しい空洞の運転パラメータを再現して計算の妥当性を評価した。

本試験ではマクロ粒子数 1 万個とし、ビームロスが生じるかビームが平衡状態になるまで計算を行った。

4.1 DC Robinson 不安定性

DC Robinson 不安定性は Static Robinson 不安定性とも呼ばれ、主空洞内に励振する RF 成分のうちビーム誘

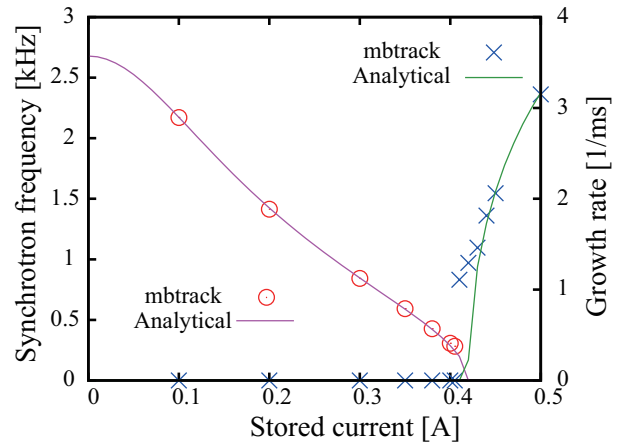


Figure 1: Coherent frequencies and growth rates as functions of the stored current for the KEK-LS storage ring [10]. The solid curves indicate the analytical solution of the equations of motions for synchrotron oscillations. The evaluated values by *mbtrack* investigations are plotted by circles and crosses.

起電圧がある閾値を上回り、RF 電圧によるビームへの復元力が失われることで生じる。その閾値は RF 空洞におけるビーム負荷電力を $P_b \propto I$ (I は平均蓄積電流値) 壁損失を P_c としたとき、以下のように簡単な関係式で与えられる。

$$P_b < (1 + \beta_c) P_c \quad (3)$$

ただし、 β_c は RF 空洞と外部との結合度である。

平均電流の増加に対し蓄積リングを空洞電圧一定となるよう外部入力電圧を (減少方向に) 調整しつつ運転した場合、ビームのコヒーレントなシンクロトロン周波数が徐々に低下していく。さらに平均電流が増加し上記関係式で与えられる閾電流に達するとシンクロトロン周波数が 0 となりビームが不安定となる。これが DC Robinson 不安定性である。

KEK-LS のパラメータのうち RF 空洞と入力カプラとの結合度を通常の 3.5 から 1.0 に変更し、上記で説明したようなシミュレート計算を行った。また各電流値においてコヒーレント振動の周波数を調べ、ビーム不安定性が確認されてものについては Growth rate の算出を行った。コヒーレント振動の周波数はトラッキングによって得られたバンチ重心位置の時間発展を高速フーリエ変換し、その周波数スペクトルから算出した。Growth rate は不安定性の現れたパラメータにて放射減衰の効果をも十分に小さく設定した後再計算し、バンチの振幅不変量の時間変化を指数関数でフィッティングすることで算出した。

mbtrack を用いたシミュレーションで得られたコヒーレント振動の周波数と Growth rate をシンクロトロン振動の運動方程式から解析的に求めた値 [9] を Fig. 1 ([10] から転載) で比較する。解析的な計算ではバンチの重心運動のみを考慮した。Figure 1 から mbtrack の結果から見積もった値 (赤丸と青クロス) が解析計算の結果 (実線) をよく再現していることが確かめられた。

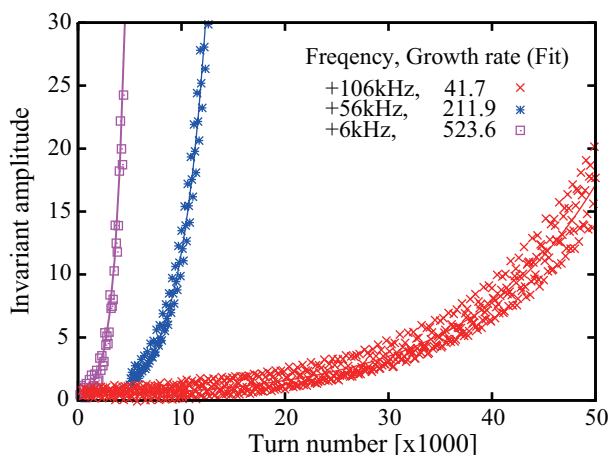


Figure 2: Amplitude invariants for longitudinal bunch center motions as functions for turn numbers with three different tunings offset for MC [10]. The growth rates obtained by numerical fittings are also shown in this figure.

Table 1: Comparison of Growth Rates Calculated by the *mbtrack* and Analytical Method

Frequency shift [kHz]	<i>mbtrack</i> [1/s]	Analytical method [1/s]
+6	524 ± 21	513
+56	211 ± 4	216
+106	41.7 ± 0.6	43.7

4.2 AC Robinson 不安定性

AC Robinson 不安定性は主空洞の結合インピーダンスに由来するビーム不安定性であり、不安定性が生じると各電子バンチは同位相（バンチ結合モード 0）で運動する。この不安定性は、空洞の共鳴周波数が RF 周波数（電子ビームの周回周波数の整数倍のうち空洞の共鳴周波数に最も近いもの）と比べ高くなると生じる。

この AC Robinson 不安定性を評価するため、KEK-LS の主空洞について共鳴周波数を +6, 56, 106 kHz とし、トラッキングシミュレーションを行った。また、得られたバンチ重心の時間発展のデータ (Fig. 2) を元に、前節と同様の手段にて Growth rate を求めた。

この共鳴周波数のシフト量と得られた Growth rate の値を Table 1 にまとめる。Table 1 では解析的な計算で予測される Growth rate を併記した。Table 内、*mbtrack* に対する Growth rate のエラーはフィッティングエラーであり、*mbtrack* での計算結果は解析計算とほぼ等しいことがわかる。

さらにここでは詳細を割愛するが、Fig. 2 で示した結果の内、比較的 Growth rate の小さい結果に対して周波数スペクトルを確認し、ビーム不安定のバンチ結合モードが 0 となることも確認している。

Table 2: Comparison of Growth Rates Calculated by the *mbtrack* and Analytical Method

HOM mode	TM011	TM012
Frequency [MHz]	794	1312
Q-factor	34900	8500
Shunt impedance [MΩ]	9.3	0.2
<i>Analytical calculation</i>		
Growth rate [1/s]	79	159
CB mode	559	594
<i>mbtrack calculation</i>		
Growth rate [1/s]	86 ± 3	156 ± 7
CB mode	559	594

4.3 空洞高次モードによるバンチ結合型不安定性

今回改良した *mbtrack* を用いることで空洞に存在する高次モード (HOM) が誘起するバンチ結合型不安定性も計算することが可能となった。

ベンチマークでは縦方向バンチ結合型不安定性を引き起こす幾つかの高次モード（具体的には PF 型空洞 [11] の TM011, TM012 を想定）について、主空洞とは別の narrowband-resonator がリング内に存在するとして計算を行った。*mbtrack* の結果を解析的な計算で予測される結果と比較 (Table 2) したところ、Growth rate 及び不安定性の振動モードがよく一致することが確かめられた。

4.4 バンチ伸張運転に対するビーム負荷変動の影響

フィルパターンにバンチギャップが存在すると空洞内ではギャップ部においてビーム誘起電圧の供給が一時的に失われるため、空洞電圧の振幅やビームに対する RF 位相が変動する。従ってバンチ伸張運転では、主空洞・高調波空洞のいずれもこの影響を受け電圧変動 (transient beam loading effect) が生じる。この変動の振る舞いは一般的に主空洞と高調波空洞で異なるため、理想的な “flat potential condition” をバンチトレイン全体において同時に実現することは不可能となる。これは、バンチギャップによる電圧変動を何らかの方法で補償しない限り、ユニフォーム以外のフィルパターンで理想的なバンチ伸張効率を維持することは困難であることを意味する [12]。

前述したように SLS では高調波空洞システムをバンチギャップが存在する条件で運用し、バンチギャップが大幅なバンチ伸張率の低下につながることを観測した [8]。SLS では Passive 型の超伝導高調波空洞が採用されている。SLS のグループはフィルパターンに 280 ns のバンチギャップを設け、平均電流 320 mA でバンチ伸張運転を試みた。この時、バンチトレインから放射されるシンクロトロン光をスタートレックカメラで測定したところ、トレイン内のバンチ重心位置変動が 210 ps (peak-to-peak) となり、バンチ長は rms で 24 から 66 ps とバンチ位置に応じて変化することが確認された。SLS リングでバンチ伸張運転を行わない場合の自然バンチ長は約 14 ps (rms) である。

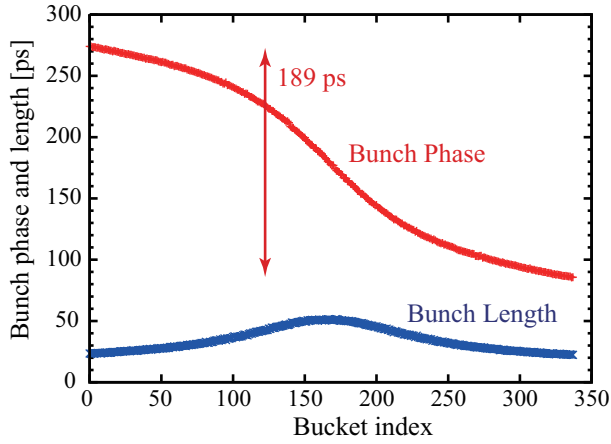


Figure 3: Bunch center phase (red) and length (blue) along the bunch train with large bunch gaps for the SLS storage ring during the HC operation [10].

mbtrack を用い、参考文献 [8] とほぼ同じパラメータにてシミュレーションを実施した。ビームの運動が平衡状態に達した時の各バンチの重心位置とバンチ長を RF バケット位置の関数としてプロットしたものを Fig. 3 に示す。シミュレーションの結果、得られたバンチ重心位置の変動が 189 ps (peak-to-peak)、バンチ長が 22.3 から 51.5 ps (rms) であった。SLS の実験ではリング内に空洞インピーダンス以外にも電子バンチに影響を与える様々な要因が存在すること、測定の精度などを考慮すると、mbtrack の計算結果は実験をほぼ再現していると考えられる。

5. 高調波空洞起因の不安定性

ベンチマークテストで mbtrack の計算の妥当性を確認した後、高調波空洞が存在する系におけるビームダイナミクスの検討を開始した。ここでは計算の一例を示す。

5.1 高調波空洞の運転パラメータ

主空洞に加え高調波空洞が存在する系において、リングを周回する電子ビームが感じる RF 電場 $V(\phi)$ は、主空洞電圧 V_{fc} 、 m 次の高調波空洞電圧 V_{hc} の主空洞電圧に対する比 $k = V_{hc}/V_{fc}$ とそれぞれの位相 ϕ_{fc}, ϕ_{hc} を用いて以下のように書ける。

$$V(\phi) = V_{fc} \{ \cos(\phi + \phi_{fc}) + k \cos(m\phi + \phi_{hc}) \} \quad (4)$$

任意のバンチ伸張率を得るための空洞運転条件 (k, ϕ_{fc}, ϕ_{hc} の組合せ) は上式がエネルギー保存則 $V(0) = U_0/e$ (U_0 はリング一周あたりの放射ロスエネルギー)、実現したいバンチ重心での電圧勾配 $V'|_0 = G$ 、ビームの安定条件 $V''|_0$ の 3 つの関係を満たすように決

Table 3: Principal Parameters of ESRF-EBS

RF frequency	MHz	352.370
Harmonics number		992
Revolution frequency	MHz	0.355
Main rf voltage	MV	6.6
Radiation loss per turn	MeV/turn	3.2
Stored Current	mA	200
Longitudinal damping time	ms	8.6

Table 4: Parameter of Harminic Cavity

frequency	MHz	3×352.370
Unloaded Quality factor		20000
R/Q, $R = V_c^2/P_c$	Ω	290

める。

$$\cos \phi_{fc} = \frac{m^2 U_0}{m^2 - 1 e V_{fc}} \quad (5)$$

$$\tan \phi_{hc} = m \frac{G/V_{fc} + \sin \phi_{fc}}{\cos \phi_{fc}} \quad (6)$$

$$k = -\frac{\cos \phi_{fc}}{m^2 \cos \phi_{hc}} \quad (7)$$

ここで、 $G = 0$ の時に電圧勾配がゼロ (この状態を flat potential condition と定義) となりバンチ伸張率は最大となる。 G が高調波空洞をデチューンした時の電圧勾配 $G_0 = -V_{fc} \sin \phi_{fc,0}$ (注: $\phi_{fc,0} \neq \phi_{fc}$) より大きくなればバンチ圧縮、小さくなればバンチ伸張となる。

5.2 ESRF-EBS の例

ESRF-EBS は 2020 年のコミッショニング開始を目指し現在改修作業が進む準回折限界放射光源リングであり、ビームエネルギー 6 GeV にて、水平エミッタンス 150 pmrad、定格電流 200 mA を目指す。現在進む第一期計画では高調波空洞は含まれないが、将来のさらなる性能向上を目指し高調波空洞の検討が進められている。

ESRF-EBS [3] にて Active 方式の高調波空洞を採用した場合のビーム安定性についてフィルパターンとしてユニフォームを仮定し調査を行った。ESRF-EBS の蓄積リングのパラメータを Table 3 に、仮定した高調波空洞のパラメータを Table 4 に示す。計算では高調波空洞を 5 台用いると考えた。この場合、flat potential condition ($G = 0$) を実現するのに必要な空洞の運転パラメータは $k = 0.286, \phi_{fc} = 56.9$ 度、 $\phi_{hc} = -102.24$ 度となる。高調波空洞の結合度は空洞からの反射を最小にするよう決めると $\beta_c = 0.35$ となり、高調波空洞を励振するのに必要な外部入力電圧は合計で 42.8 kW となる。

本論文では $G/G_0 = 0.000, 0.075, 0.150$ として求めたパラメータのもと調査した結果を Table 5 に示す。ただし、高調波空洞の結合度はそれぞれ空洞からの反射を最小にするように選んだ。また、 $G/G_0 = 0.000, 0.075, 0.150$ はビーム不安定性が生じない場合、バンチ長が 43, 32, 26 ps となる条件に対応する。高調

Table 5: Beam Stability for Bunch Lengthening Operation

G/G_0	stable or unstable	Growth rate [1/s]
0.000	unstable (CB mode = 0)	1000 ~ 2000
0.075	unstable (CB mode = 1)	330 ~ 500
0.150	stable	-

波空洞を用いない場合の ESRF-EBS の自然バンチ長は 10 ps である。調査の結果、 $G/G_0 = 0.000, 0.075$ でビーム不安定性によるビームロスが予測されたが、電子バンチの振る舞いを分析したところ不安定性のモードや Growth rate がそれぞれ異なった。また、 $G/G_0 = 0.150$ とした時は、電子ビームが安定に周回することが予測された。

ところで、MAX-IV ではバンチ伸張運転の際、高調波空洞システムのパラメータを調整し flat potential condition を目指したところ、モード 0 の不安定性が生じ、さらにモード 0 ダンパーを導入することで不安定性を抑制することに成功したことが昨年報告されている [13]。また ALS-U を想定した計算において、Vlasov 方程式を用いた解析的な計算の結果、高調波空洞の結合インピーダンスがモード 0,1 のバンチ結合型不安定性を引き起こす可能性が示唆されている [2]。これらの先行報告から、今回 mbtrack で示唆された不安定性について詳細に調査することが望まれる。

現在我々は mbtrack によるシミュレーションと参考文献 [2] の手法を主空洞を含めて拡張した Vlasov ソルバーを用いて、研究を進めている。これら結果については改めて論文等で報告する予定である。

6. まとめ

高調波空洞システムが存在する蓄積リングにおける電子ビームのダイナミクスを調査するため、トラッキングコード mbtrack に機能を追加した。既知の RF 空洞に起因するビーム不安定性や transient beam loading についてベンチマークを行い、mbtrack を用いて得られた計算結果の妥当性を確認した。

現在、mbtrack に加え別途開発した Vlasov ソルバーを用いて、高調波空洞システムの存在する系におけるビームダイナミクスを調査している。本研究により高調波空洞システムがビーム不安定性を引き起こす原因をより深く理解し、次世代の回折限界リングにおいても安定に運転できる高調波空洞システムを空洞デザイン・RF 制御・ビーム制御などあらゆる観点から設計することを目指す。

謝辞

本研究を進めるにおいて SOLEIL synchrotron の P. Marchand 氏、ESRF の J. Jacob 氏には高調波空洞や計算結果について、相談に乗って頂きました。また、SOLEIL synchrotron のスタッフの皆様には計算機の準備など研究環境を構築して頂きました。ここに感謝します。本研究は科研費本研究は JSPS 科研費 JP17K05131 及び KEK 長期海外派遣制度の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] M. Venturini, "Harmonic cavities and the transverse mode-coupling instability driven by a resistive wall," *Phys. Rev. Accel. Beams*, vol. 21, p. 024402, Feb 2018. ; <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevAccelBeams.21.024402>
- [2] M. Venturini, "Passive higher-harmonic rf cavities with general settings and multibunch instabilities in electron storage rings," *Phys. Rev. Accel. Beams*, vol. 21, p. 114404, Nov 2018. ; <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevAccelBeams.21.114404>
- [3] J. Jacob and V. Serrière, "Harmonic RF systems for ESRF-EBS - preliminary considerations -," in *22nd ESLS RF Meeting*, 2018. ; <https://www.synchrotron-soleil.fr/en/file/11244/download?token=NtsRaOFI>
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] A. Jankowiak, et al., "BESSY VSR – technical design study," *Helmholtz-Zentrum Berlin*, 2015. ; <https://www.helmholtz-berlin.de/media/media/angebote/bibliothek/reports/r0001-bessy-vsr-tds.pdf>
- [7] T. Honda, "Concept of a new generation synchrotron radiation facility KEK Light Source," in *Proc. 8th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC'17)*, Copenhagen, Denmark, no. 8. , May 2017, WEPAB047, pp. 2687–2690. ; <http://jacow.org/ipac2017/papers/wepab047.pdf>
- [8] M. Pedrozzi, J.-Y. R. W. Gloor, A. Anghel, M. Svandrlik, G. Penco, P. Craievich, A. Fabris, C. Pasotti, I. E. Chiaveri, R. Losito *et al.*, "SLS operational performance with third harmonic superconducting system," in *Proc. of 11th SRF workshop*, 2003, pp. 91–94.
- [9] K. Akai, "RF システム," in *OHO テキスト B ファクトリーの加速器*. KEK, 1994, ch. 3.1.1, p. 5.4. ; <http://accwww2.kek.jp/oho/OHOtxt/OHO-2002/txt-2002-5.pdf>
- [10] 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. 10. Geneva, Switzerland: JA-CoW Publishing, Jun. 2019, MOPGW039, pp. 178–180. ; <http://jacow.org/ipac2019/papers/mopgw039.pdf>
- [11] T. Koseki, M. Izawa, and Y. Kamiya, "Damped-structure cavity for a high-brilliant vacuum ultraviolet and soft xray storage ring," *Review of Scientific Instruments*, vol. 66, no. 2, pp. 1926–1929, 1995. ; <http://scitation.aip.org/content/aip/journal/rsi/66/2/10.1063/1.1145760>
- [12] N. Yamamoto, T. Takahashi, and S. Sakanaka, "Reduction and compensation of the transient beam loading effect in a double rf system of synchrotron light sources," *Phys. Rev. Accel. Beams*, vol. 21, Jan. 2018, 012001. ; <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevAccelBeams.21.012001>
- [13] F. Cullinan, "Feedbacks against collective instabil-

PASJ2019 WEPI015

ities at MAX-IV,” in *Next Generation Beam Position Acquisition and Feedback Systems*, 2018.
; [https://indico.cern.ch/event/743699/
contributions/3112143/attachments/1750504/
2840093/Cullinan_ARIESfbwkshpNov18.pdf](https://indico.cern.ch/event/743699/contributions/3112143/attachments/1750504/2840093/Cullinan_ARIESfbwkshpNov18.pdf)