

KEK PF 2.5 GeV リングにおける過渡的変動補償の原理実証試験 EXPERIMENTAL TESTS TO COMPENSATE THE TRANSIENT BEAM LOADING EFFECT AT THE KEK-PF 2.5 GeV RING

内藤大地*, 山本尚人, 本村新, 高橋毅, 坂中章悟

Daichi Naito*, Naoto Yamamoto, Arata Motomura, Takeshi Takahashi, Shogo Sakanaka

High energy accelerator research organization

Abstract

In the ultra-low emittance light sources, the bunch lengthening using the double RF system is effective to mitigate the intrabeam scattering. However, when the large gaps are introduced in the fill pattern of the electron bunches, the cavity voltages vary transiently. Consequently, the performance of the bunch lengthening is degraded. To compensate for the transiently induced voltages, we have proposed a compensation scheme using a broadband kicker. To test our compensation scheme, the feed-forward modulation of the cavity voltage was implemented in the new digital low-level RF system for the PF 2.5 GeV ring. In this paper, we report an experimental demonstration of the compensation for the induced voltage at the PF ring.

1. はじめに

極低エミッタンス光源で電子内散乱によるビーム寿命の低下やエミッタンスの増大を軽減するには、基本波空洞と高調波空洞を組み合わせたダブル RF システムによるバンチ伸長が有効である [1]。しかしながら電子の蓄積パターンの中に長いバンチギャップが存在する場合、過渡的なビーム負荷により空洞電圧が変化し、バンチ位相がシフトしてしまう。その結果、バンチ伸長効率が低下してしまう [2]。そこで我々のグループではバンチ位相のシフトを抑制するため、広帯域キッカー空洞を用いて過渡的な空洞電圧の変動を補償するシステムを提唱している [3,4]。

我々の提唱する補償手法を確立するため、KEK-PF 2.5 GeV リング (PF リング) にて過渡的電圧変動の補償試験を行った。試験では主加速空洞とデジタル low-level RF (DLLRF) を用いて、加速電圧に変調を加えてバンチ位相のシフトを抑制した。本講演では試験の概要と結果について報告する。

2. PF リングでの過渡的電圧変動補償

この節では補償試験のセットアップについて紹介したのち、数値解析的計算により補償試験で発生する過渡的電圧変動を予測する。そしてどのようにして発生した過渡的電圧変動を補償するかについて説明する。

Table 1 に試験中のビームと RF のパラメータ、Fig. 1 にセットアップを示す。PF リングには高調波空洞も広帯域キッカー空洞も存在しないため、基本波の主加速空洞を用いて補償試験を行った。PF リング内には 4 台の主加速空洞が設置されており、それぞれ個別のクライストロンによって RF パワーを供給されている。また主空洞とクライストロンは PF リング用に新規に開発された DLLRF システム [5] にて制御される。DLLRF は MTCA.4 規格のデジタルボード群で構成されており、各空洞は FPGA が実装された個別のデジタルボードによって制御される。バンチ位相についてはマスター RF 信号と、ボタン電極型ピックアップからのビーム信号の

Table 1: Beam and RF Parameters During the Demonstration

Parameter	Value
Energy	2.5 GeV
Radio frequency	500.1 MHz
Beam current	0.1 A
Energy loss per turn	428 KeV
Harmonic number	312
Number of bunches	156
Number of cavities	4
Total cavity voltage	1 MV

位相差を位相検波器で検出する。検波信号は integrated Gigasample processor (iGp) [6] でバンチ毎に 4 万ターン分の位相差を平均化した値をモニターする。ビームパラメータについては過渡的ビーム負荷の影響を大きくするため、長いバンチギャップの存在するバンチフィルパターンを採用した。

次に Table 1 のビームパラメータで予想される過渡的ビーム負荷の影響を数値解析的計算で予測する。Figure 2 に計算結果を示す。黒線がフィルパターン中の空洞電圧振幅の変動、青線が空洞電圧の位相の変動、赤線がバンチ位相の変動を示す。補償試験ではバンチ位相の変動を抑制するため、空洞電圧振幅を変調することにした。

振幅変調は DLLRF のフィードフォワード機能を用いて行った。DLLRF ではビーム周回周波数と同期して、任意の波形パターンの変調を LLRF の RF 出力に加算できる機能が実装されている。今回はこの変調機能を使ってクライストロン電圧 ($V_g(t)$) に対して

$$|V_g(t)| = |V_{\text{const}}| (1 - A_{\text{mod}} \cos(2\pi f_{\text{rev}} t + \theta_{\text{delay}})) \quad (1)$$

のように、周波数がビーム周回周波数 (1.6 MHz) と同じ余弦波による振幅変調を加算した。Figure 3 に振幅変調の模式図を示す。過渡的電圧変動の補償試験では振幅変調の振幅 (A_{mod}) と振幅変調の位相 (θ_{mod}) をパラメータスキャンして、バンチ位相の変動を抑制できるパラメータを探した。Figure 4 にフィルパターン中のバン

* daichi.naito@kek.jp

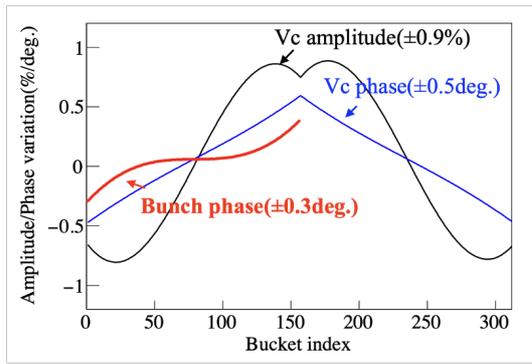


Figure 5: The estimation of the cavity voltage and bunch phase variations with $(A_{\text{mod}}, \theta_{\text{mod}}) = (0.014, 0)$.

変動が抑制された。そこで A_{mod} を 0.58 に固定し、 θ_{delay} のパラメータスキャンを行った。

Figure 6 に 40 から 150 バケットまでのバンチ位相の RMS を θ_{delay} の関数として評価した結果を示す。また Fig. 7 に iGp で測定したバンチ毎のバンチ位相を示す。Figure 7 において黒線が振幅変調していない時の測定結果、青線は θ_{delay} がゼロの時の測定結果、赤線は θ_{delay} が -52.5 度の測定結果、緑線は θ_{delay} が -75 度の時の測定結果を示す。Figure 6, 7 から θ_{delay} を変更する事でバンチ位相の変動が抑制されているのが分かる。また θ_{delay} が -52.5 度の時にバンチ位相の変動が最小となっており、何も変調をかけていない時には ± 1.5 度変動していたフィルパターン中のバンチ位相が、 ± 0.4 度まで抑制されているのが分かる。特に 50 から 120 バケットの間ではバンチ位相の変動をほぼ解消する事に成功した。

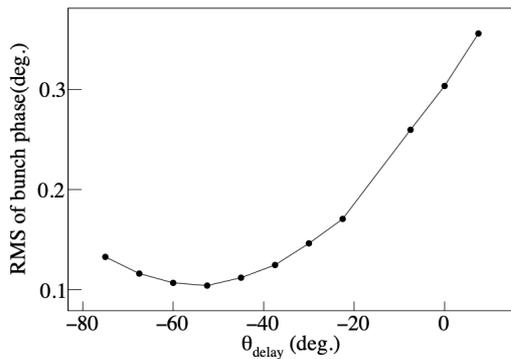


Figure 6: RMS of bunch phase between 40 and 150 buckets as a function of the θ_{delay} .

4. 振幅変調のパラメータスキャンについての考察

この節では数値解析的計算での振幅変調がバンチ位相変動に与える効果と、実際の補償試験における効果に差異が生まれた要因について議論する。差異を生む有力な候補として、数値解析的計算ではクライストロンの応答が考慮されていなかった事が挙げられる。そこで振幅変調に対するクライストロンの応答を評価す

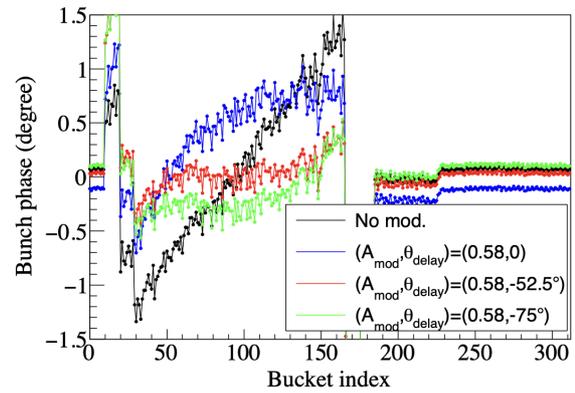


Figure 7: The bunch phase measured by the iGp. The electron bunches were filled in the region where bunch index was 10 to 166. The bunch phase was shifted so that the phase of 88th bunch became zero. The bunch phase with a bucket index of less than 30 were not measured correctly due to the frequency response of the phase detection.

ることにした。

Figure 8 に補償実験の際と同じクライストロン電圧に対して $A_{\text{mod}} = 0.2$ で振幅変調した際に、DLLRF で測定した DLLRF の RF 出力での振幅波形 (黒破線) と位相波形 (赤破線)、クライストロン出力での振幅波形 (黒線) と位相波形 (赤線) を示す。この測定ではビームは蓄積されておらず、ビーム負荷の空洞や空洞制御に与える影響は取り除かれている。Figure 8 の RF 出力では当然振幅の変調しか観測されていないのに対し、クライストロン出力では位相変調が励起されているのが分かる。これは PF リングで使用しているクライストロン (Canon, E3774) の周波数応答特性に起因する。Figure 9 に A_{mod} を 0.2 で固定して Eq. (1) で示される振幅変調の周波数 (f_{rev}) を変えた際の、クライストロン出力での位相波形の時間変動に対する RMS を示す。PF リングでは 2 MHz 付近で振幅変調により大きな位相変調が励起されているのが分かる。

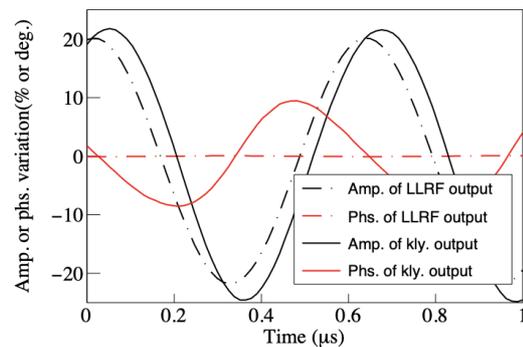


Figure 8: Waveform of amplitude and phase at the LLRF output and the klystron output.

この効果を取り入れるため、数値解析的計算でのク

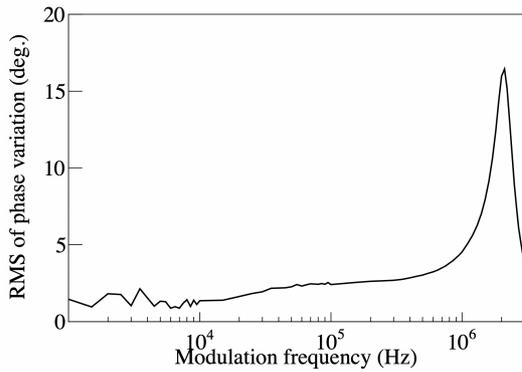


Figure 9: The excitation of the phase modulation as a function of the frequency in the amplitude modulation.

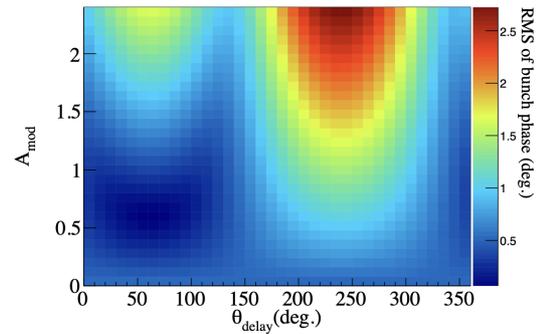


Figure 10: The estimated RMS of bunch phase with scanning A_{mod} and θ_{delay} when the excitation of the phase modulation is introduced.

ライストロン電圧に対する変調を

$$V_g(t) = |V_{\text{const}}| (1 - A_{\text{mod}} \cos(2\pi f_{\text{rev}} t + \theta_{\text{delay}})) \times \cos(2\pi f_{\text{RF}} t - P_{\text{ex}} \cdot A_{\text{mod}} \cos(2\pi f_{\text{rev}} t + \theta_{\text{delay}} + \theta_{\text{ex}})) \quad (2)$$

とし、振幅変調と位相変調の両方を加えることにした。ここで P_{ex} は振幅変調により励起される位相変調の位相振幅を表し、 θ_{ex} は振幅変調と位相変調の位相差を示す。また計算の際には空洞での振幅/位相変調の減衰効果も考慮した。位相励起の効果を組み込み、フィルパターン中のバンチ位相変動のRMSを A_{mod} と θ_{mod} の値を変えながら計算した結果を Fig. 10 に示す。Figure 4 と比べて、Fig. 10 では θ_{delay} がゼロから離れた地点でバンチ位相の変動が最小となっているのが分かる。また、バンチ位相の変動が最小となる A_{mod} と θ_{mod} の組み合わせでのバンチ位相を Fig. 11 の赤線で示す。Figure 11 において黒線は変調を加えていない時のバンチ位相、青線と緑線は赤線と同じ A_{mod} の値に対して θ_{delay} を変更した際の結果を示す。Figure 10, 11 から過渡的電圧変動の補償実験と同様に、 θ_{delay} を -50 度付近に設定することでバンチ位相の変動が最小になった。またバンチ位相の変動は ± 0.3 度に収まり、40 から 120 バンチの間ではバンチ位相の変動がほぼ解消されている。これらの計算結果より過渡的電圧変動の補償実験にて振幅変調がバンチ位相の変動に与える効果を定性的に説明できた。

5. まとめと今後

KEK-PF 2.5 GeV リングにて過渡的電圧変動の補償試験を行った。電圧変動の補償では新規開発した DLLRF を用いて主加速空洞の空洞電圧を変調した。また変調パターンとして周波数がビーム周回周波数と同じ余弦波での振幅変調を採用した。その際、主加速空洞のバンド幅は電圧変動の補償に必要なバンド幅に比べて非常に狭いため、本来必要な振幅変調の振幅よりも非常に大きな振幅が必要となった。

過渡的電圧変動の補償試験ではバンチ位相の変動に対して振幅変調の与える効果が、数値解析的計算から

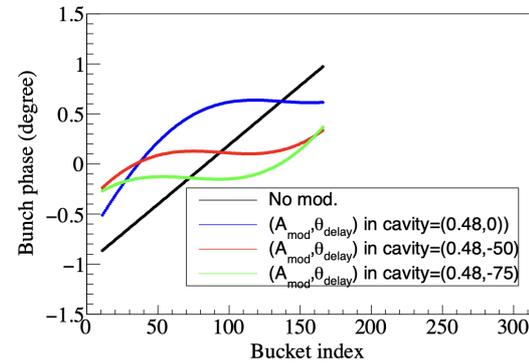


Figure 11: The bunch phase as a function of the bucket index when the excitation of the phase modulation is introduced.

予測される結果と食い違う結果となった。そこで数値解析的計算にクライストロンの応答特性を組み込んだところ、補償試験での振幅変調の効果を再現することができた。また補償試験で振幅変調のパラメータスキャンを行った結果、振幅変調を加えない場合は ± 1.5 度あったフィルパターン内のバンチ位相の変動を ± 0.4 度まで抑制することに成功した。特に、50 から 120 バケットの間ではバンチ位相の変動をほぼ解消する事に成功した。

将来の展望としては今回明らかになったクライストロンでの振幅変調による位相変調の励起を考慮し、RF出力に振幅変調と位相変調の両方を加算する事で更なるバンチ位相変動の抑制を目指す。一方で主空洞の替わりに広帯域空洞を用いる事ができれば、より効率良く振幅変調によりバンチ位相変動を抑制する事ができる。また、クライストロンの替わりに半導体アンプを用いれば、振幅変調による位相変調の励起を抑制できる可能性がある。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP24H15601、JP24K03210 の助成を受けたものです。過渡的電圧変動の補償試験において大きなバンチギャップでのビーム蓄積を実現するため、入射調整を行なっていただいた KEK 加速器研究施設の下崎義人氏、フィードバック調整を行なっていただいた同施設の高井良太氏に謝意を述べる。

参考文献

- [1] A. Hofmann and S. Myers, “Beam dynamics in a double rf system”, in *Proc. 11th Int. High-Energy Accel. Conf. (HEACC 1980)*, Geneva, Switzerland, Jul 1980, pp. 610-614.
- [2] J. M. Byrd, S. De Santis, J. Jacob, V. Serriere, “Transient beam loading effects in harmonic rf systems for light sources”, *Phys. Rev. ST Accel. Beams*, **5**, 092001, Sept 2002. doi:10.1103/PhysRevSTAB.5.092001
- [3] N. Yamamoto, T. Takahashi, S. Sakanaka, “Reduction and compensation of the transient beam loading effect in a double rf system of synchrotron light sources”, *Phys. Rev. Accel. Beams*, **21**, 01200, Jan 2018. doi:10.1103/PhysRevAccelBeams.21.012001
- [4] D. Naito *et al.*, “Low-power model tests of the wide-band cavity to compensate the transient beam loading in the next generation light sources”, in *Proc. 14th Int. Particle Accel. Conf. (IPAC'23)*, Venis, Italy, Sep 2023, pp. 2936-2939. doi:10.18429/JACoW-IPAC2023-WEPA119
- [5] D. Naito *et al.*, “Commissioning of the digital LLRF system at the KEK Photon Factory 2.5 GeV ring”, in *Proc. IPAC'24*, Nashville, TN, 2024, pp. 3442-3445. doi:10.18429/JACoW-IPAC2024-THPG71
- [6] R. Takai *et al.*, “Bunch by bunch feedback system using iGp at KEK-PF”, in *Proc. DIPAC'09*, Basel, Switzerland, 2009, pp. 59-61.