

次世代光源における過渡的電圧補償のためのバンチ位相検出法の検討 INVESTIGATION OF BUNCH-PHASE DETECTION METHOD COMPENSATING TBL VOLTAGES IN NEXT GENERATION LIGHT SOURCES

内藤大地 *^{A)}、山本尚人 ^{A)}、坂中章悟 ^{A)}、高橋毅 ^{A)}、山口孝明 ^{B)}

Daichi Naito*^{A)}, Naoto Yamamoto^{A)}, Shogo Sakanaka^{A)}, Takeshi Takahashi^{A)}, Takaaki Yamaguchi^{B)}

^{A)}High energy accelerator research organization (KEK)

^{B)}The Graduate University for Advanced Studies (SOKENDAI)

Abstract

In ultra-low-emittance synchrotron light sources, the intrabeam scattering (IBS) is a serious concern. To mitigate the IBS, the bunch lengthening using the fundamental and harmonic cavities is employed. The performance of such bunch-lengthening scheme is very sensitive to the change of the cavity voltages caused by the effect of the transient beam loading (TBL). To compensate the TBL, a compensation method using a broad-band cavity is proposed. In this scheme, the change of the RF phase on each electron bunch is monitored and used to calculate the feedforward pattern of the compensating voltage. To realize this scheme, we have been developing the monitor system. In this thesis, we investigate the monitor method of the RF phase.

1. はじめに

リング型放射光源で回折限界に迫る極低エミッタンスを達成するには、電子ビームのバンチ内散乱 (IBS) を抑制しなければならない [1]。IBS を緩和する有効な手段として、これまでの放射光源では主空洞と高調波空洞を用いたバンチ伸長 [2] が導入されてきた。このバンチ伸長方法には、過渡的ビーム負荷 (TBL) による空洞電圧の変動によってバンチ伸長効率が低下するという特性がある [3]。そこで、広帯域の補償用空洞 [4] を用いた TBL 補償手法が提案されている [5]。Figure 1 に補償用空洞を用いた TBL 補償システムを示す。本システムではビームの周回周波数と同期して BPM で電子バンチを測定し、RF 位相とバンチ中心の位相差を計算する。そしてその位相差を元にフィードフォワードパターンを生成する。本講演では KEK-PF を具体例として、位相差の再構成手法を検討した結果について報告する。

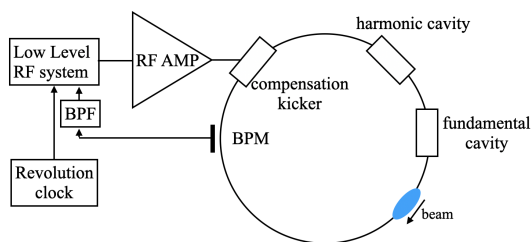


Figure 1: Schematic view of the compensation system to mitigate the TBL effect.

2. 位相差の再構成方法

まず最初に次世代光源で求められる位相差に対する精度を、KEK の次期計画として検討されていた、KEK-LS [6] で使用する場合を具体例に挙げて検討す

る。Table 1 に KEK-LS のビームパラメータを示す。KEK-LS では各 446 バケットのビームバンチの間に、イオン捕獲を解消するための 30 バケットのバンチギャップが挟まる fill 構造になっている。このバンチギャップが空洞を通過する際に過渡的な電圧変動が発生し、各バンチの縦方向の中心位置がずれる。Figure 2 に mtrack [7] で計算した KEK-LS での各バケット毎のバンチ中心のずれを示す。図からはバンチ中心が 10 バケット毎に 4 ps 程度ずれることが予想される。また、研究の第一段階ではバンチの先頭と最後尾の位相差を測定し、その間を線形補完してフィードフォワードパターンを作成することを検討している。この場合はバンチ中心を 16 ps の精度で測定することを目指す。これは 500 MHz の RF 周波数の場合は 3 度の位相差に対応する。また最終的には 10 バンチ毎に位相差を検出してフィードフォワードパターンを作成することを目指しており、バンチ中心を 0.4 ps の精度、位相差に直すと 0.07 度で測定することを最終目標と設定した。

Table 1: Parameters of the KEK-LS [6]

Parameter	Value
Beam energy	3 GeV
Momentum compaction factor	2.19×10^{-4}
Average beam current	0.5 A
Beam current per bunch	1 nC
Bunch interval	2 ns
RF frequency (fundamental)	500.07 MHz
Harmonic number	952
Number of bunch gaps	2
Number of buckets in a gap	30

次に目標とする精度を達成できる位相検出方法の検討として、実際に KEK Photon Factory (PF) [8] で位相差を測定する場合を想定した。Table 2 に hybrid mode 時の KEK PF のビームパラメータ、Figure 3 に filling pattern を示す。この運転モードでは大きなバ

* daichi.naito@kek.jp

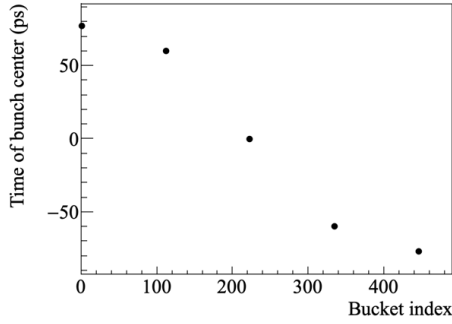


Figure 2: The time shift of the bunch center caused by the TBL effect.

ンチギャップが存在するため、比較的大きな位相変動が生じる。この運転モード中でビームポジションモニター (BPM) を用いて測定したバンチ波形の一例を Fig. 4 に示す。BPM 読み出し回路を Fig. 5 と近似し、バンチ形状が gaussian だと仮定すると観測される信号は

$$V(t) = -\frac{A}{\sigma^3}(t - \mu) \exp\left\{-\frac{(t - \mu)^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (1)$$

と近似できる [9]。ここで A は回路から決まる任意の定数、 μ はバンチ中心、 σ はバンチ長を示す。従って Fig. 4 で波形が原点を通過する位置がバンチ中心となる。

Table 2: Parameters of the KEK PF at the Hybrid Mode

Parameter	Value
Beam energy	2.5 GeV
Momentum compaction factor	6.56×10^{-3}
Average beam current	0.45 A
Beam current per bunch ^a	2 nC
Beam current of single bunch	18.7 nC
Bunch interval	2 ns
RF frequency (fundamental)	500.07 MHz
Harmonic number	312
Number of bunch in single bunch train	131
Number of bunch gaps	2
Number of buckets in a gap	90

^a In the bunch train.

バンチ中心を測定する方法として BPM から取得した波形を逐次 fitting していく方法がある [10]。この手法では 1 ターン分の位相変動を計算するのに秒単位の時間がかかってしまう。加えて目標精度を達成するには数百ターン分を平均する必要がある、補償用のフィードフォワードパターンの生成に数分かかってしまう。さらにはハードウェアとしても BPM の波形を取得するための高速度/高精度の ADC が必要となる。

そこで我々のグループでは、ダイレクトサンプリング法 [11] を用いた IQ 変換によって位相変動を検

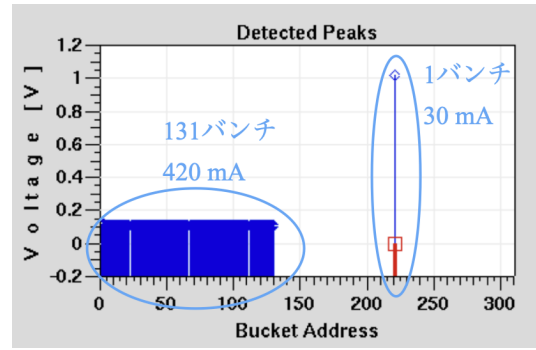


Figure 3: Filling pattern of the KEK PF at the hybrid mode.

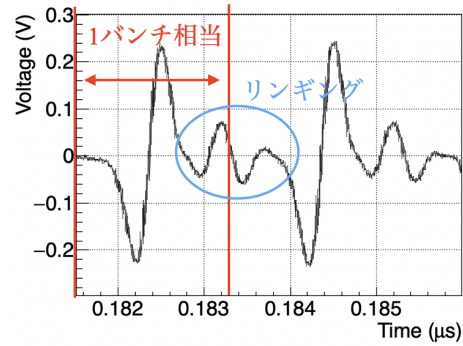


Figure 4: An example of the waveform detected by the beam position monitor.

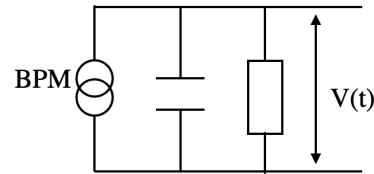


Figure 5: Equivalent circuit of the BPM system.

出する事を計画している。この手法は KEK PF の次期ローレベル RF(LLRF) システムに導入する予定で、空洞ピックアップやクライストロン出力と同様に BPM 波形を取り込む。こうする事で別途に位相測定システムを用意する必要がなくなり、TBL 補償用のフィードフォワードパターンを ms のオーダーで作成する事が可能となる。ダイレクトサンプリング法では i 番目に取得した BPM 出力を V_i とすると IQ 成分と RF 位相 ϕ は、

$$I = \frac{2}{n} \sum_{i=0}^{n-1} V_i \cos\left(2\pi \frac{m}{n} i\right) \quad (2)$$

$$Q = -\frac{2}{n} \sum_{i=0}^{n-1} V_i \sin\left(2\pi \frac{m}{n} i\right) \quad (3)$$

$$\phi = \text{atan}\left(-\frac{Q}{I}\right) \quad (4)$$

と計算できる。ここで m, n は互いに割り切れない任

意の整数である。またこの時、サンプリング周波数 f_s は RF 周波数 f_{RF} を用いて

$$f_s = \frac{n}{nk+m} f_{RF} \quad (5)$$

となる。ここで k は任意の整数である。サンプリング周波数は RF 周波数よりも低いので、観測される RF 周波数はナイキスト周波数で折り返される。従って IQ 変換する前には BPM の信号にバンドパスフィルター (BPF) を入れてノイズや高調波が RF 周波数と重ならないようにしなければならない。またこの時、観測される RF 周波数とナイキスト周波数の差が大きいほど、BPF の帯域幅を広く取れる余地が残る。

次に k, m, n という 3 つの整数の決定方法について述べる。位相変動を精度良く測定するには複数ターンのデータを平均化して位相を計算する必要がある。そのためにはターンごとのサンプリングタイミングが常に同じとなるように、周回周波数とサンプリング周波数が同期している必要がある。この時 $nk+m$ は PF リングのハーモニクス数である 312 の約数とならなければならない。また $nk+m$ は 1 組の IQ 成分を計算する際に使うバンチ数と等しくなる。我々の場合は 10 バンチ毎の位相変動を検出したいので、 $nk+m$ は 10 程度でなければならない。あさらに次期 LLRF でデータサンプリングに用いる ADC のサンプリング限界が 370 MHz なので、サンプリング周波数はこれ以下にしなければならないという制約がある。上記を考慮すると

$$k = 1 \quad (6)$$

$$(m, n) = (5, 7) \text{ or } (5, 8) \text{ or } (4, 9) \quad (7)$$

でなければならない。この 3 つのパラメータのうちどれが PF で位相変動を測定するのに最適なパラメータか決定するために、位相変動を実測する事にした。

3. PF での位相変動測定

Figure 6 に PF でおこなった位相変動測定のセットアップを示す。測定は Fig. 3 で示された fill pattern で蓄積電流を 450 mA に保った状態で行った。BPM にはビーム入射点からリングを 1/3 周した地点に設置されたボタン型 6 極 BPM の信号をリングの周回周波数に同期して測定した。オシロスコープには Keysight InfiniVision 4000 MSO-X 4 154A を使用した。このオシロスコープは 5G サンプル、1.5 GHz BW, 8 bit 分解能であり、高時間分解能で BPM の波形を取得する事ができる。取得した波形に対してオフラインで IQ 変換をおこなって位相変動を計算した。そして 3 つの IQ パラメータのうち、どれが位相変動測定に最適かを検証した。また IQ 変換の妥当性を確認するために Eq. (1) を使って波形を fitting して計算した位相変動との比較をおこなった。その後、測定された位相変動が TBL に起因するものかを確認するために、蓄積ビーム電流を変更してわざと TBL の影響を変化させて位相変動が変化するかを検証した。最後

にシミュレーションと測定結果を比較して妥当な位相変動が測定できているかを検証した。

3.1 IQ 変換パラメータの検証

IQ 変換の前に、比較対象に用いる波形 fitting 法を先に説明する。波形を fitting して計算したバンチ中心の位相変動を Fig. 7 に示す。横軸がバンチ ID、縦軸が各バンチの位相の進みを示す。この計算では fitting で計算したバンチ中心の位置と、RF 周波数の 0 度位相での位置との差をバンチ位相と定義してバンチ毎に計算した。また測定精度を上げるため、100 波形分の計算結果を平均化した。Fig. 7 に示されるように TBL の影響によりほぼ線形にバンチ位相がシフトしていく。この位相変動の傾きを IQ 変換で再現できるかをまずは確認した。

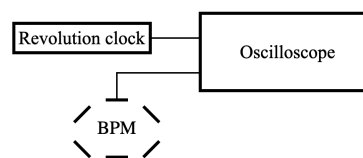


Figure 6: Setup of the phase measurement.

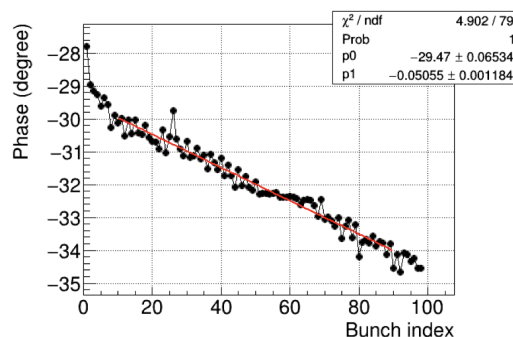


Figure 7: Phases shift of the bunch center calculated by the fitting method.

IQ 変換では周回周波数信号の立ち上がりエッジを計算開始時刻とし、Eqs. (2), (3), (4) に従って 12 又は 13 バンチ毎にバンチ位相を計算した。しかしながら、計算されたバンチ位相の変動は fitting の場合の 2 倍以上と大きくかけ離れていた。この結果はダイレクトサンプリングした際に高調波成分がナイキスト周波数で折り変えられて基準 RF 周波数に重畳されるためだと予想された。そこで取得した波形を spice 上で 4 次のバターワースバンドパスフィルター (BPF) に入力し、その出力波形を IQ 変換する事にした。Figure 8 にバンド幅が 30 MHz の BPF の入力と出力の波形、Figure 9 に BPF 出力を IQ 変換して計算したバンチ位相を示す。BPF のバンド幅は狭いほどノイズや高調波成分を除去できるが、Fig 8 から分かるようにバンド幅が狭いとバンチトレインの先頭と後ろの波形がなまってしまう。その結果 Figure 9 に示されるようにバンチの先頭と後方では位相が正しく計算

されなくなる。そこで今回は BPF によってなまっている部分を取り除き、その間の区間を線形 fit して位相変動の傾きとした。

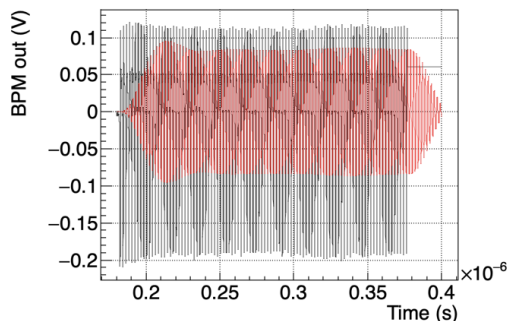


Figure 8: Example of the waveform at the input and output of the bandpass filter. Black line shows the waveform at the input and red line shows that at the output.

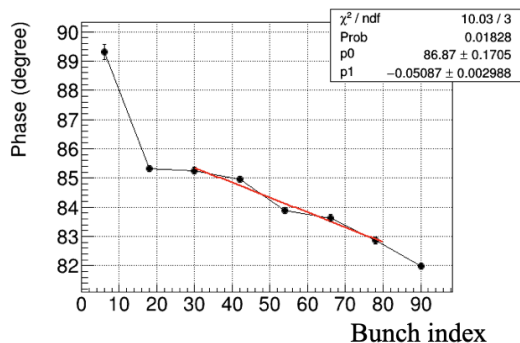


Figure 9: The distribution of the IQ phase with the BPF whose bandwidth is 30 MHz.

Figure 10 に各 IQ 変換パラメータを用いて計算した位相変動の傾きが BPF のバンド幅によってどう変化するかを示す。バンド幅が狭い場合は波形を fitting した結果と一致しており、バンド幅を広げるとノイズや高調波成分が重畳されるため位相変動が fitting した結果から乖離していく様子が分かる。3つのパラメータのうち、 $(m, n) = (5, 8)$ ではバンド幅に対して位相変動の傾きが小さく、BPF を用いずとも周波数の折り返しによるノイズや高調波成分の混入をうまく避けられている事が示唆される。そこで $(m, n) = (5, 8)$ を IQ 変換パラメータとして採用する事にした。

3.2 位相変動の蓄積電流依存性

次に IQ 変換による位相計算によって TBL による位相変動が正しく計算できているか確認するため、蓄積電流を変化させて位相変動をわざと変化させる測定をおこなった。Figure 11 に測定結果を示す。横軸が各蓄積電流、縦軸が各蓄積電流での位相変動の傾きを示す。黒線が fitting 法での計算結果、赤線が IQ 変換での計算結果、青線が mbtrack で計算した結

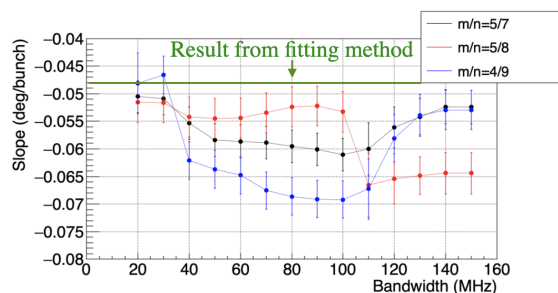


Figure 10: The correlation between the bandwidth of the BPF and the slope of the phase shift.

果を示す。IQ 変換にはバンド幅が 30 MHz の BPF と $(m, n) = (5, 8)$ のパラメータを用いた。IQ 変換と fitting 法の計算結果は全てのデータ点で一致しており、シミュレーション結果とも概ね整合する結果になった。これらの結果から BPM 信号から IQ 変換を用いて、TBL による位相変動を検出可能だと結論付けた。しかしながらシミュレーション結果に対して測定結果が若干のオフセットを持っているように見えるため、その原因については更なる検証が必要である。本論文では Figure 4 に示された BPM 波形のリングングの影響を検証した。

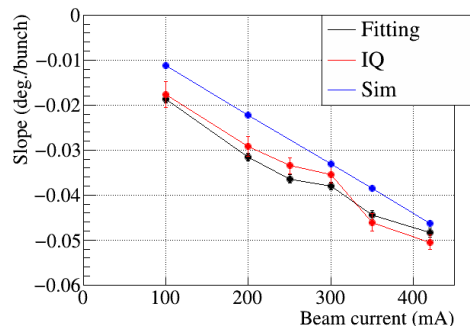


Figure 11: The correlation between the stored current and the slope of the phase shift.

BPM のリングングは後続のバンチ波形と重なっており、その影響により位相変動がオフセットを持っている可能性があった。そこで KEK-PF でハイブリッドモードにおいてシングルバンチのみの波形を取得し、RF 周波数で波形をずらして重ね合わせた (Fig. 12)。また測定は蓄積電流 420 mA でおこなった。次に図の赤線で示された波形に対してバンド幅が 30 MHz の BPF と $(m, n) = (5, 8)$ のパラメータを用いて IQ 変換で位相を計算した結果を Figure 13 に示す。図から単純に波形を重ねただけでは有意な位相変動は検出されず、リングングは位相変動測定に影響を与えない事が実証できた。一方で測定ではなく、シミュレーションに考慮すべき効果が入っていないせいで実測とずれている可能性もある。今回の測定で IQ 変換を用いて位相変動の測定が可能だと実証できたので、今後は空洞の RF ピックアップから直接 IQ

位相を観測し、BPM 信号やシミュレーションと比較する事を計画している。

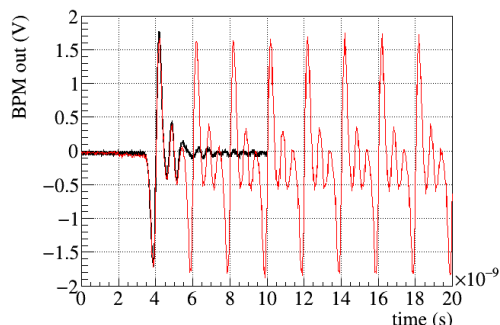


Figure 12: Waveform of the single bunch (black) and its superposition (red).

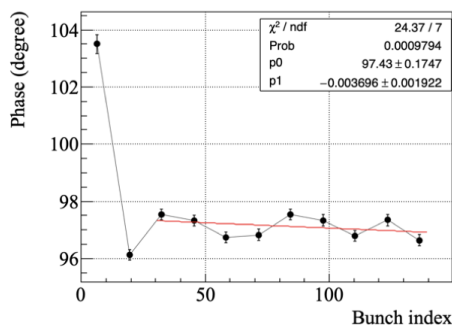


Figure 13: The phase shift calculated from the superposition of the single-bunch waveform.

4. まとめと今後

次世代光源において TBL によって低下するバンチ伸長効果を回復するため、位相変動を測定して広帯域補償用空洞で空洞電圧変化を補正する手法を考案した。位相変動は BPM 信号をダイレクトサンプリング法で LLRF に取り込む事で高速/高精度での計算を計画している。この手法で位相変動を再構成できるかを検証するため、KEK-PF で BPM 信号を実測して波形 fitting 法やシミュレーション結果と比較をおこなった。位相変動や蓄積電流の変化に対する位相の変化は波形 fitting 法、シミュレーションと概ね一致し、IQ 変換を用いて精度よく位相変動を測定できる事を実証できた。

現在 PF では LLRF の更新を計画しており、前年度には試験用に IQ 変換して波形を測定できるボード一式を制作した。今後はこのボードに BPM 信号と空洞 RF ピックアップを周回周波数に同期して IQ 変換を行うソフトウェアを実装し、LLRF 実機での位相変動測定の評価やその評価を進めていく。

謝辞

KEK PF モニターグループの高井良太氏にはバンチ位相測定のためにビーム調整していただいたのでここに謝意を述べます。KEK PF モニターグループの帯名崇氏にはバンチ位相検出方法の議論に加わっていただいたのでここに謝意を述べます。本研究は JSPS 科研費 JP20H04459 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] S. Leemann, “Interplay of Touschek Scattering, Intrabeam Scattering, and RF Cavities in Ultralow-emittance Storage Rings”, in the Proceedings of the 5th International Particle Accelerator Conference, 2014, p. 1612.
- [2] A. Hofmann, S. Myers, “Beam dynamics in a double RF system”, CERN-ISR-TH-RF-80-26.
- [3] J. M. Byrd, S. De Santis, J. Jacob, V. Serriere, “Transient beam loading effects in harmonic rf systems for light sources”, Physical Review Accelerator and Beams 5 (2002) 092001.
- [4] D. Naito *et al.*, “Study of the kicker cavity used for transient beam-loading compensation in the next-generation light sources”, in the Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, 2020, p. 140.
- [5] N. Yamamoto, T. Takahashi, S. Sakanaka, “Reduction and compensation of the transient beam loading effect in a double rf system of synchrotron light sources”, Physical Review Accelerators and Beams 21 (1) (2018) 012001.
- [6] KEK 放射光 Conceptual Design Report (CDR) ver. 1.1 (2017).
- [7] N. Yamamoto *et al.*, “Beam stability investigation with RF cavity impedance by using multiparticle tracking code mb-track”, in the Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kyoto, Japan, 2019, p. 459.
- [8] T. Honda, R. Takai, S. Nagahashi, and Y. Kobayashi, “Development and present status of photon factory light sources” in the Proceedings of the 9th International Particle Accelerator Conference, Vancouver, BC, Canada, 2018, p. 4155.
- [9] P. Forck, P. Kowina, and D. Liakin, “Beam position monitors”, CERN-2009-005.
- [10] Y.M. Zhou *et al.*, “Upgrade of bunch phase monitor at SSRF storage ring”, in the Proceedings of the 9th International Particle Accelerator Conference, 2014, p. 4797.
- [11] T. Schilcher, “RF applications in digital signal processing”, in the Proceedings of CERN Accelerator School: Digital Signal Processing, CAS, 2007.