

SuperKEKB におけるビーム軌道振動測定用モニタおよびビーム位置インターロック用モニタとしての Libera Brilliance+ の性能評価

PERFORMANCE EVALUATION OF THE LIBERA BRILLIANCE+ AS A BEAM ORBIT OSCILLATION MONITOR AND A BEAM POSITION INTERLOCK MONITOR IN SUPERKEKB

金枝史織*, 石井仁, 飛山真理, 福間均, 森健児

Shiori Kanaeda*, Hitoshi Ishii, Makoto Tobiyama, Hitoshi Fukuma, Kenji Mori

High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

The KEKB accelerator in KEK is being upgraded to the SuperKEKB. The number of Beam Position Monitors (BPMs) in SuperKEKB is 444 in the positron ring (LER) and 466 in the electron ring (HER). Among them two BPMs in each ring will be used for measuring fast beam orbit oscillation and another two BPMs in each ring will be used for beam position interlock. Required resolution is less than several μm for beam orbit oscillation monitoring and required latency is less than $100\mu\text{s}$ for beam position interlock. The Libera Brilliance+ of Instrumentation Technologies Corporation with beam position detecting function and beam position interlock function is a candidate of a signal processor for these BPMs. This paper presents the result of performance evaluation of the Libera Brilliance+ and future prospects for using it for our purpose.

1. はじめに

現在 KEK では、SuperKEKB 加速器に向けた KEKB 加速器のアップグレードが行われている。SuperKEKB ではビーム位置測定に必要な Beam Position Monitor(BPM)を陽電子リング(LER)に 444 台、電子リング(HER)に 466 台^[1] 設置する予定である。そのうち LER の 2 台、HER の 2 台をビーム軌道振動測定用モニタとして、また LER の 2 台、HER の 2 台をビーム位置インターロック用モニタとして使うことが検討されている。

ビーム軌道振動測定用モニタは衝突点近くの局所クロマティシティ補正用六極電磁石の近傍に設置される。このモニタは、1)ビームが上記六極電磁石を垂直方向にオフセットして通るときに生ずる垂直エミッタンスの増加を見積もる為と、2)衝突点でのビームの水平および垂直方向の振動を見積もる為に用いられ、数 μm 以下の位置分解能が要求されている。また、ビーム位置インターロック用モニタは軌道の逸脱を検知してビームのアポート信号を出すモニタとして用いられる。このモニタは、1)KEKB 運転時ロスモニタでアポートがかかる前にビームが振動している場合があった為^[2]、振動が成長する前にビームをアポートすることで加速器コンポーネントがビームの直撃で破壊されるのを防ぐ為と、2)アポート時にビーム軌道がアポート窓の大きさを越えアポート窓が破壊されることを防ぐ為に導入が予定されている。インターロック遅延時間としては $100\mu\text{s}$ (リング 10 ターン) 以下の速い応答が要求されている。これら 2 つのモニタの候補として現在検討されているものが Instrumentation Technologies 社

の Libera Brilliance+^[3]である。Libera Brilliance+は位置検出機能とビーム位置インターロック機能を持っており、導入にあたり開発にかかる時間や人的資源の削減につながると考えられる。

本稿は、ビーム軌道振動測定モニタとビーム位置インターロック用モニタとしての Libera Brilliance+ の性能評価と今後の展望について報告する。

2. ビーム位置モニタ (BPM)

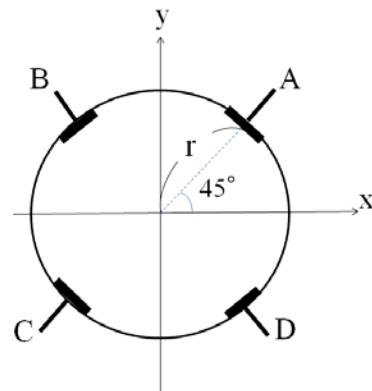


Figure 1: Beam Position Monitor (BPM).

断面が円形のビームパイプの場合を考える。Figure 1 の A、B、C、D に示すようにピックアップ電極をビームパイプ内面に配置することで電極にビームによる電荷が誘起され、ビームの横方向の変位を検出することができる。ビームの変位 x および y がチャンバ半径 r より十分小さいとき、 x と y は下の(1)式で書ける^[4]。

* shiori.kanaeda@kek.jp

$$\begin{aligned}
 x &= K_x X \\
 y &= K_y Y \\
 \left\{ \begin{aligned}
 X &= \frac{(V_A + V_D) - (V_B + V_C)}{V_A + V_B + V_C + V_D} \\
 Y &= \frac{(V_A + V_B) - (V_C + V_D)}{V_A + V_B + V_C + V_D}
 \end{aligned} \right.
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

ここで V_A, V_B, V_C, V_D は各電極の出力電圧、 K_x, K_y は BPM チェンバー半径と電極の幅と配置で決まる定数であり、電極が Fig.1 の配置の時、 $K_x = K_y \approx R/\sqrt{2}$ で近似でき、SuperKEKB では $K_x = K_y \approx 30\text{mm}$ である。また、 X および Y は x, y について非線形であり、ビームが電極に近いときは x/r および y/r の高次項が効いてくる為(1)式では不十分であり、二次、三次程度までの非線形項を考慮する必要がでてくる。今回はビームが中心付近を通るとし、詳しい説明は割愛する。

3. 信号パワー

Table 1 に、SuperKEKB に関連する主なパラメータを示した。これから SuperKEKB において期待される信号強度を下の(2)及び(3)式^[4]を用いて求める。

Table 1: Machine Parameters

	LER	HER	unit
Energy	4.000	7.007	GeV
Beam current	3.6	2.6	A
Number of bunches	2500	2500	
Bunch current	1.44	1.04	mA
Circumference	3,016.315	3,016.315	m
Bunch length	5	6	mm
Harmonic number	5,120	5,120	
Revolution frequency	99.390	99.390	kHz
Bunch spacing	4	4	ns

$$v(t) = \frac{d}{2\pi r} \left(\frac{1}{C_0} \int \frac{dq(t')}{dt'} e^{-(t-t')/CR} dt' \right) \tag{2}$$

$$\frac{dq}{dt} = \frac{\sqrt{2}Nec\beta}{\sqrt{\pi}\sigma_z} e^{-d^2/8\sigma_z^2} \exp\left\{-\frac{(z_c - z_0(t))^2}{2\sigma_z^2}\right\} \times \sinh\left\{-\frac{(z_c - z_0(t))d}{2\sigma_z^2}\right\} \tag{3}$$

ここで v は電極にかかる電圧、 q は電極が面している部分のビームの電荷、 t, t' は時間、 z_0 はビーム

進行方向のバンチの中心位置、 z_1 は電極の前縁の座標、 $z_2 (= z_1 + d)$ は後縁の座標、 $z_c (= (z_1 + z_2)/2)$ は電極の中心座標、 Ne はバンチの電荷量、 $c\beta$ はビームの速度を表す。SuperKEKB を想定し、電極容量 $C=1.5\text{pF}$ 、終端抵抗 $R=50\Omega$ 、チェンバー半径 $r=45\text{mm}$ 、電極幅 $d=6\text{mm}$ 、バンチ長 $\sigma_z = 6\text{mm}$ 、 $\beta=1$ とした。(2)、(3)式より電極端に発生する信号強度を求めると Fig.2 のようになる。このときの検出周波数 508MHz 成分の電力は 0.9dBm、全電力は 25.8dBm である。BPM 電極から制御室までのケーブル長を 50m と仮定し、ケーブルによる減衰を考慮すると、周波数の高い成分は大きく減衰する為、508MHz 成分は-3.5dBm、全電力は 8.5dBm となる。また例として 400-600MHz の帯域を持つ Band Pass Filter(BPF)を入力信号の前に挿入したと仮定すると、508MHz 成分及び全電力はいずれも、-4.5dBm 程度となり 508MHz の信号強度を落とさず、全電力を減衰できる。またこれは最大電流値での電力であり、電流が 0.5A の時は 14dB 程度減衰する。

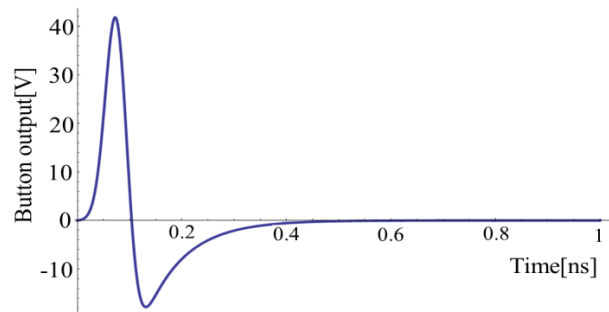


Figure 2: Signal waveform at a button electrode.

4. 測定

4.1 入出力特性

Figure 3,4 は Libera Brilliance+ の入出力特性の測定、及び Libera Brilliance+ を用いた位置分解能測定のブロック図とセットアップの外観である。信号発生器 (S.G.) から 508.886MHz の正弦波を出力し、パワースプリッターで 4 つに分けた信号をビームの疑似信号とし、電極信号 A、B、C、D の入力とする。また、RF 信号を 5120 分の 1 に分周した信号を revolution 信号として Machine Clock へ入力し、パルス発生器 (P.G.) で発生させた 1Hz の TTL 信号を Trigger へ入力する。また、負荷変動に対して電圧定在波比を一定にする為 Libera Brilliance+ の入力端子の前に 3dB のアッテネータを入れた。

Figure 5 は Libera Brilliance+ への入力信号パワーを変えたとき、アナログデジタル変換(ADC)の最大カウント数の平均をプロットしたものであり、実線が Automatic Gain Control(AGC)を ON、破線が AGC を OFF にしたときのグラフである。AGC は入力信号パワーに応じて自動でアッテネータを制御する機能であり、Libera Brilliance+ に内蔵されている。

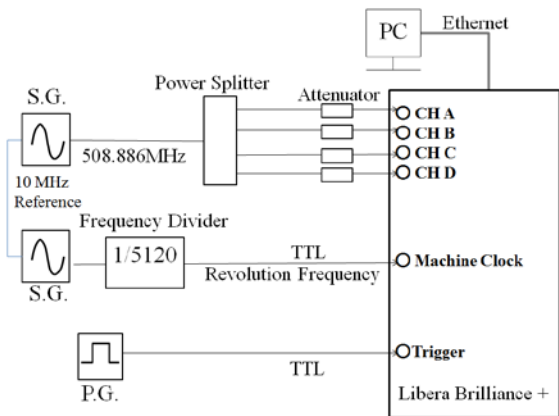


Figure 3: Block diagram of the input output characteristics and the position resolution measurement.

(S.G.: Signal Generator, P.G.: Pulse Generator)

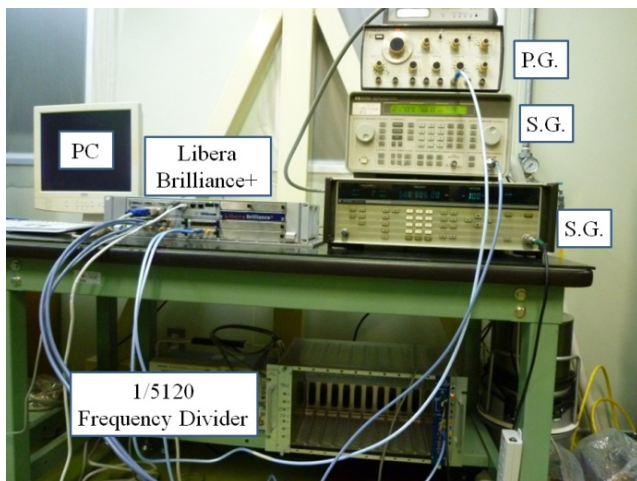


Figure 4: Set up of the input output characteristics and the position resolution measurement.

AGC が OFF の時(グラフの破線)は、入力信号パワーが -50dBm 以下では線形性が崩れデータとして信頼性がなくなり、 -20dBm 以上ではオーバーフローしてしまう為、入力信号パワーは $-20\sim-50\text{dBm}$ の範囲で測定が可能となる。AGC が ON の時(グラフの実線)はアッテネータにより ADC への入力信号パワーが減衰しオーバーフローが起こらなくなるので、 -20dBm 以上の入力信号パワーでも測定が可能となる。前項よりビーム電流が小さい 0.5A 時を想定すると入力信号パワーは -20dBm 程度である為、AGC を ON にする、もしくは Libera Brilliance+への入力前に外付けのアッテネータを入れることで我々の求める測定範囲を十分カバーしている。

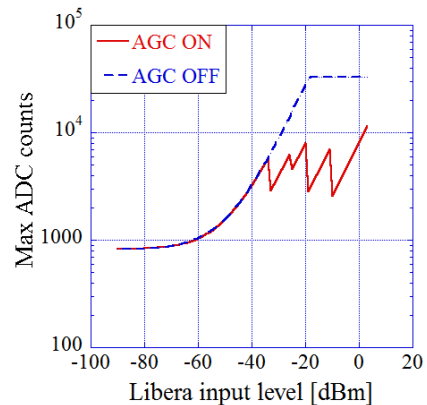


Figure 5: Input output characteristics.

4.2 位置分解能測定

測定の設定アップは 4.1 で入出力特性を測定した時と同様、Figs. 3,4 を用いて行った。

Libera Brilliance+は測定繰り返しが 100kHz 、 10kHz 、 10Hz の 3 つの位置測定モードを持っており、それぞれは Turn-by-Turn、Fast Acquisition(FA)、Slow Acquisition(SA)と呼ばれる^[3]。Turn-by-Turn モードと FA モードで測定した結果を Figs.6,7 に示す。また Libera Brilliance+への RF input level はビーム電流が小さい 0.5A の時を想定し -20dBm として測定した。

位置分解能(RMS)は Turn-by-Turn モードのとき、 $x=0.938\mu\text{m}$ 、 $y=0.736\mu\text{m}$ 、FA モードのとき、 $x=0.287\mu\text{m}$ 、 $y=0.218\mu\text{m}$ となった。これは我々の要求する分解能を十分満たす結果となった。

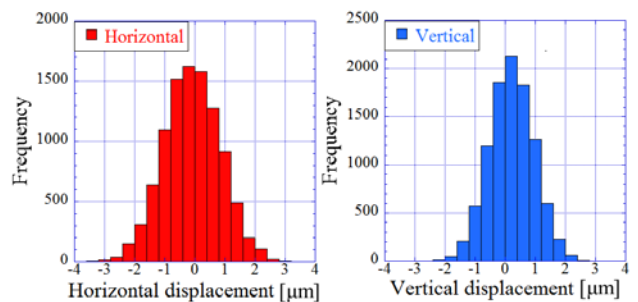


Figure 6: Frequency distribution of beam position in Turn-by-Turn mode.

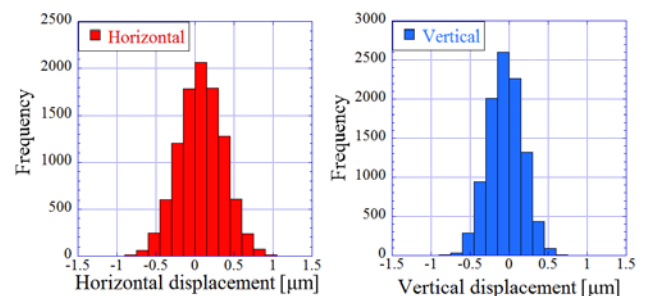


Figure 7: Frequency distribution of beam position in FA mode.

4.3 インターロック遅延時間測定

Figure 8 はテストベンチでのインターロック遅延時間測定のブロック図である。4.2 の Libera Brilliance+の測定セットアップにインターロックの出力とスイッチ、オシロスコープを付け足したものである。今回は S.G.と同期させたスイッチを用い S.G.の出力を切ること、位置変位を与え、インターロックをかけ、出力を切った時間とインターロックがかかった時間の時間差をオシロスコープで測定した。測定結果を Fig.9 に示す。

Figure 9 の Ch1 (図の上部) はインターロック信号の出力波形であり、インターロックがかかったときのパルス信号の出力を表している。Ch2(図の下部)は S.G.の出力波形であり、S.G.の出力がなくなった様子を表している。これらの時間差 Δt を測定すると、平均して $\Delta t=400\pm 40\mu\text{s}$ (SuperKEKB リング約 40 ターン)となった。これより Libera Brilliance+の仕様におけるインターロック遅延時間の大きさは確認できたが、我々はより速い遅延時間が必要である。

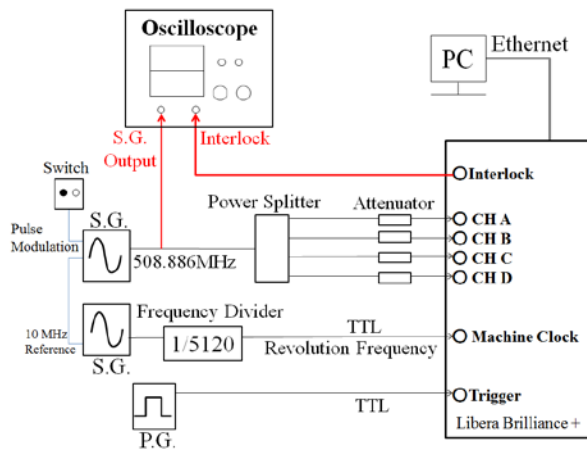


Figure 8: Set up of the interlock latency measurement.

(S.G.: Signal Generator, P.G.: Pulse Generator)

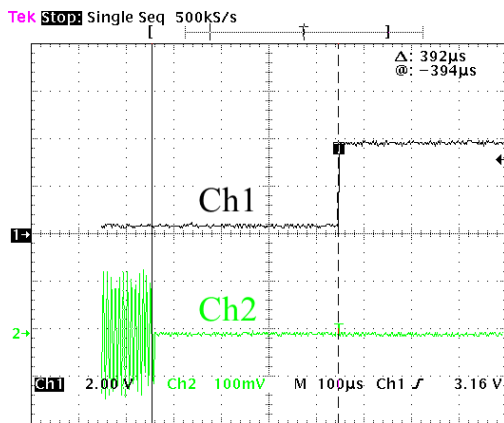


Figure 9: Resolution of the interlock latency measurement.

5. まとめと今後の課題

Libera Brilliance+は信号入力の上限が 4dBm であり、最大電流時は、ケーブル減衰を考慮した場合でも全電力が 4dBm を超えてしまう為アッテネータが必要となる。しかしその場合、508MHz 成分の信号強度も下がってしまい分解能が悪くなってしまい、アッテネータの前に BPF を通し、508MHz 成分の信号強度を落とさず全電力を小さくすることを検討している。また、入出力特性の測定結果より AGC を用いる、或いは Libera Brilliance+への信号入力の前にアッテネータを入れることで、我々の求める測定範囲を十分カバーできることが確認された。

ビーム軌道振動測定用モニタにおいては十分な分解能が確認できた為、今後導入を行う予定である。

ビーム位置インターロック用モニタにおいては、仕様上での Libera Brilliance+のインターロック遅延時間の大きさが確認できた。しかし我々はより速い遅延時間を必要としている。今回測定した Libera Brilliance+のインターロック制御には、FA モードが用いられている為、400µs の遅延時間となっている。この遅延時間縮小の為、インターロック制御にデータ取得時間の 10 倍速い Turn-by-turn モード使用した新たな Libera Brilliance+の導入を予定している。これに依り遅延時間を 100µs (SuperKEKB リングで数ターン) 以下にできると期待されている。 今後は、導入後のインターロックモジュールの性能評価が課題となる。

また Libera Brilliance+には EPICS IOC^{[5][6]}が内蔵されており、今後は GUI パッケージの 1 つである Control System Studio(CSS)^[7]を用いた制御画面の作成も課題となる。

謝辞

本稿作成にあたりましては、Instrumentation Technologies 社の Peter Leban 氏、Rok Hrovatin 氏、より情報の御提供、ならびに種々の御助言を賜りました。

参考文献

- [1] H.Fukuma et al., “Beam Instrumentation for the SuperKEKB Rings”, Proceedings of the IBIC2012, Tsukuba, Japan, Oct. 1-4, 2012.
- [2] H.Ikeda et al., “Abort Diagnostics and Analysis during KEKB Operation”, Proceedings of the IBIC2012 in Japan, Tsukuba, Oct. 1-4, 2012
- [3] <http://www.i-tech.si/>
- [4] 平松成範 加速器のビームモニター
- [5] J.Odagiri et al., “Application of EPICS on F3RP61 to Accelerator Control”, Proceedings of the 12th International Conference on Accelerator and Large Experimental Control System, Kobe, Japan, Oct. 12-16, 2009.
- [6] <http://www.aps.anl.gov/epics/>
- [7] <http://cs-studio.sourceforge.net/>