

SPring-8 におけるパルス・モード計測型光位置モニタの性能評価と運用実績

PERFORMANCE TESTS AND OPERATIONAL RESULTS OF PULSE-MODE X-RAY BEAM POSITION MONITOR AT SPring-8

青柳秀樹[#], 甲斐 智也, 佐野 睦, 高橋 直

Hideki Aoyagi [#], Tomoya Kai, Mutsumi Sano, Sunao Takahashi

Japan Synchrotron Radiation Research Institute

Abstract

Pulse-mode X-ray beam position monitor, which can measure the beam position for each pulse, are now in operation at the insertion device beamlines in SPring-8. This monitor can be operated as a DC mode as well as a standard X-ray beam position monitor, so that the monitor can be updated without worrying about trade-offs. In this paper, the dependence of the signal current on the bias voltage in DC mode and the comparison of correction factors between pulse-mode and DC mode are discussed.

1. はじめに

大型放射光施設 SPring-8 の挿入光源ビームラインにおいて、パルス毎のビーム位置を計測することのできるパルス・モード計測型光位置モニタ[1]の運用を開始している。本モニタの検出素子の特徴は、ヒートシンクとしてのダイヤモンド基板上にコンパクトな受光素子(チタン蒸着)を配線することで高い耐熱性能を保持したまま浮遊電気容量を低下させている(Fig.1)。これにより、検出素子の持つ時定数をサブナノ秒オーダーに低減させている。また、真空容器内ではマイクロ・ストリップラインを用いることで、パルス長の短い単極性パルス信号の伝送を可能としている。本モニタは、標準型光位置モニタ[2]と同様に DC モードとしても動作が可能のため、トレードオフ関係を気にすることなくモニタを更新することが出来る。現在までに、BL35XU(2021年8月)とBL13XU(2024年3月)において、パルス・モード計測型光位置モニタに置き換えた。本報告では、DC モードにおける信号電流のバイアス電圧依存性、および、パルス計測モードとDCモードでの補正係数の比較について議論する。

2. 信号電流のバイアス電圧依存性

光電子放出を検出原理とする光位置モニタの出力値は、バンチ電流値の強度が異なると放出される光電子による空間電荷効果に差異が生じるため、蓄積リングのフィリング・パターン[3]の変更時に影響を受ける。パルス・モード計測型光位置モニタの検出素子の配列は、既に標準型光位置モニタで空間電荷効果が緩和されることが実証されている傾斜配置[4-6]を採用している。本モニタのフィリング・パターンの変更による影響を評価するために、光電子収集電極の印加電圧(バイアス電圧)を変えて各ブレード検出素子の出力信号の応答を測定した。Figure 2 に、ブレード検出素子の電流と光電子収集電極に印加する電圧の関係を表す電流電圧曲線を示す。Figure 2 (a) は、BL13XU での 3 種類のフィリング・パターンにおける測定結果である。単一バンチのバンチ電流値が最も低い 0.052 mA の “Multi bunch (160 bunches

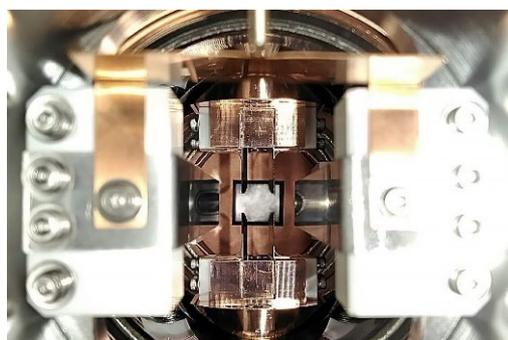


Figure 1: Detection elements of a pulse-mode X-ray beam position monitor. The beam goes from the back of the paper to the front. Four detection elements (photodetector), which are made of titanium vapor-deposited on a diamond heat sink ($t=0.3$), are fixed in two pieces on the upper and lower cooling blocks. Photoelectron collecting electrodes (aluminum, $t=1$) are provided on both sides of the detection elements, and a shielding mask (oxygen-free copper) with an aperture H 18 mm x V 16 mm is provided directly upstream.

train x 12)”モード[7]では、バイアス電圧 $H = +20$ V 以上でプラトー領域となる。そして、フィリング・パターンの変更による影響が最も強く現れる E-mode (“2/29-filling +26 bunches”) では、挿入光源のギャップ値 (ID gap) が最小値の 9.6 mm においても $H = +100$ V 以上でプラトー領域となる。フィリング・パターンの変更による影響が中程度であるバンチ電流値 0.49mA の A-mode (“203 bunches”) では、その中間の振る舞いを示す。Figure 2 (b) に、BL35XU における 2 種類のフィリング・パターン (“Multi bunches” 及び “2/29-filling +26 bunches”) の測定結果を示す。設置されている挿入光源の仕様が異なるので ID gap での比較はできないが、ブレード検出素子の電流が同等であれば、電流電圧曲線の振る舞いは概ね BL13XU と同じとなっている。

Figure 3 では、傾斜配置を採用している標準型光位置モニタ (std-XBPM、破線) とパルス・モード計測型光位置モニタ (PM-XBPM、実線) を比較している。ブレード検出

[#] aoyagi@spring8.or.jp

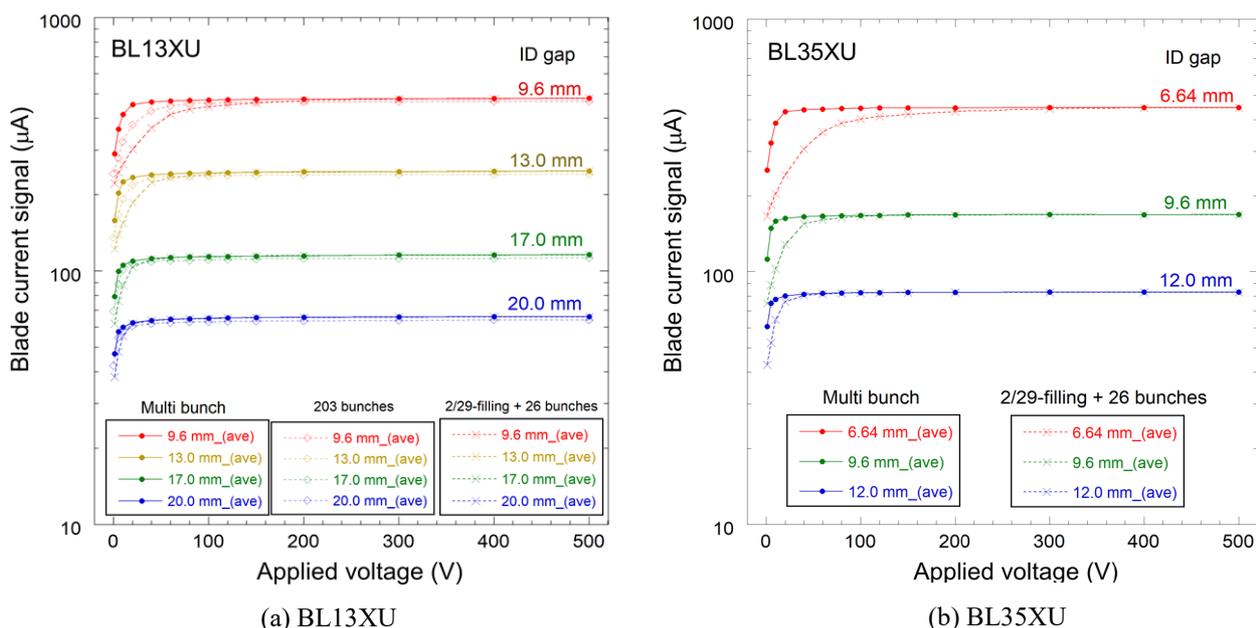


Figure 2: Current–voltage (blade current vs applied voltage) curves.

素子の電流が同等なもの同士を比べると、プラトー領域の下限值はパルス・モード計測型光位置モニタのほうが低く抑えられていることが分かる。パルス・モード計測型光位置モニタでは、高周波性能の向上のために検出素子を小型化したことで、受光面上の電界が効果的に高められたことが理由と考えられる。

挿入光源ビームラインの他の標準型光位置モニタはバイアス電圧 HV = +500 V に統一して運用しているので、パルス・モード計測型光位置モニタも同じバイアス電圧で運用している。

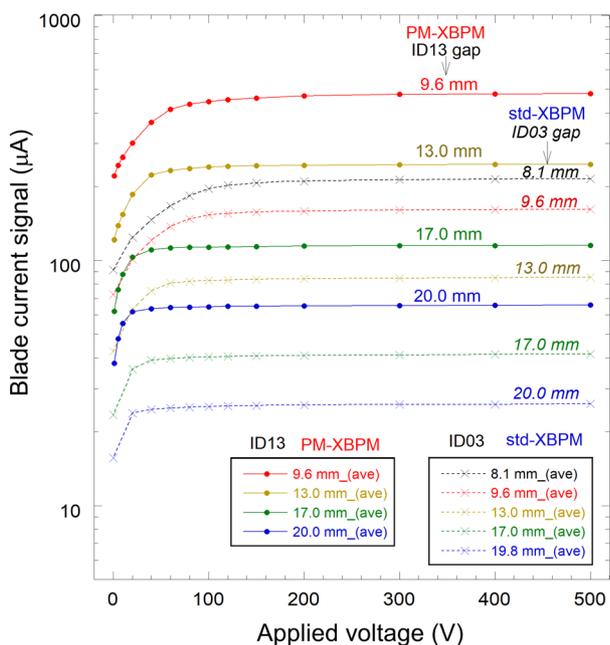


Figure 3: Comparison of standard and pulse-mode XBPM in current–voltage curves.

3. 補正係数の評価

検出素子の配分比から放射光ビームの位置情報を算出するための係数(補正係数)を BL13XU に設置したパルス・モード計測型光位置モニタにおいて、DC モードとパルス計測モードでそれぞれ評価した。測定時のフィリング・パターンは A-mode で、挿入光源のギャップ値は ID13 gap = 14.833 mm とした。

3.1 DC モード

標準型光位置モニタと同様に、DC モードとして通常の手順に従って補正係数を測定した。Figure 4 に示すように、光位置モニタ本体を水平方向に $\Delta x = \pm 0.2$ mm、垂直方向に $\Delta y = \pm 0.2$ mm 移動させて 4 信号の差分(diff./sum)を測定した。これにより、結果として補正係数 $(A_x, A_y) = (2.33, 2.14)$ の値を得た。

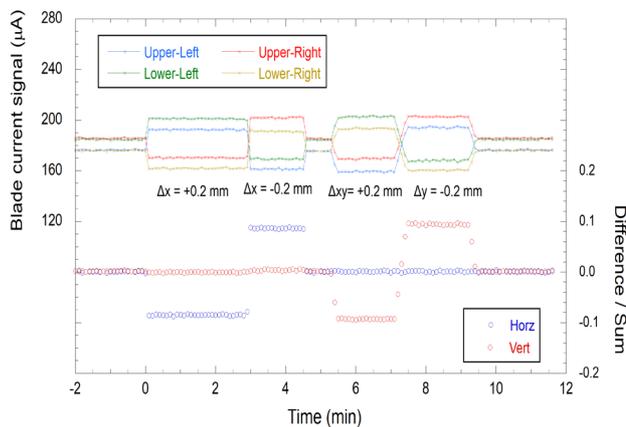


Figure 4: Measurement of correction coefficients in DC mode. ID13 gap = 14.833 mm.

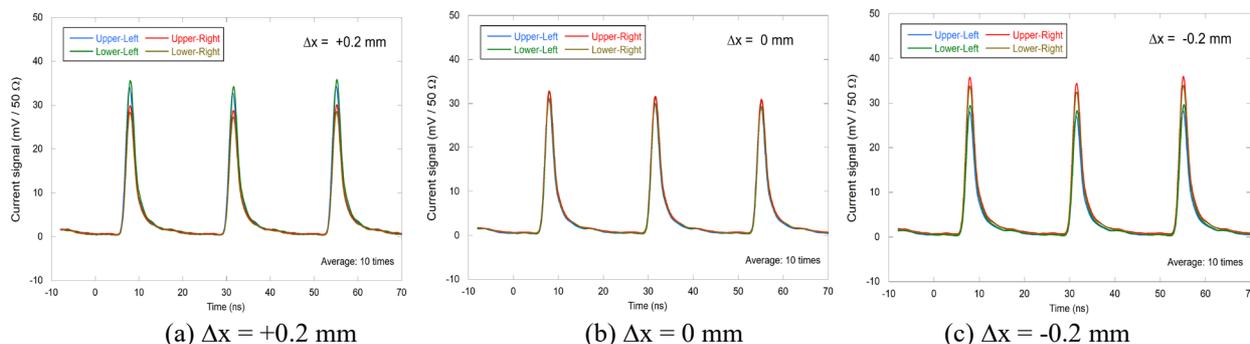


Figure 5: Pulse waveforms measured with an oscilloscope (Tektronix MSO64B). Digital bandwidth: 200 MHz.

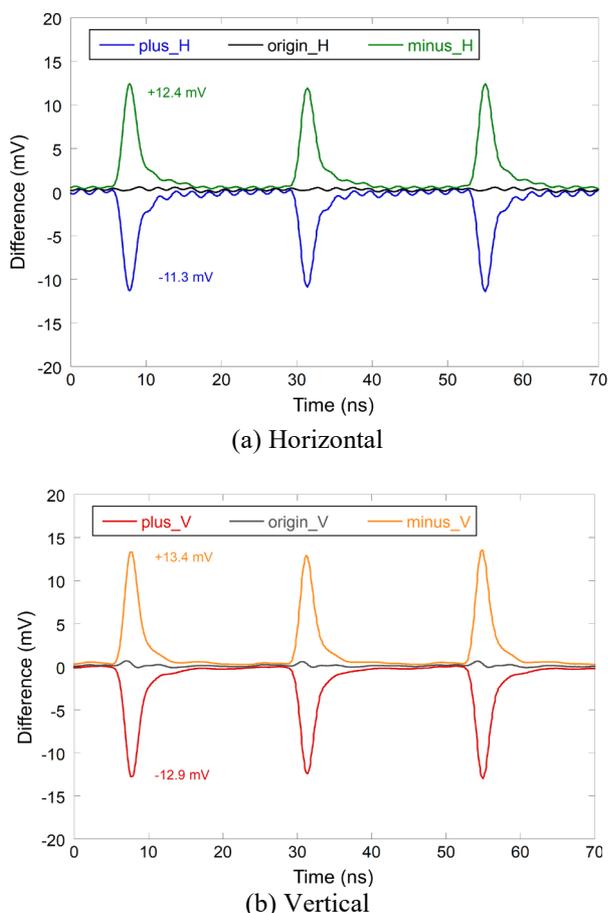


Figure 6: Difference between the four current signals. Attached numbers are pulse height of differences of pulse waveforms.

3.2 パルス計測モード

パルス・モード計測型光位置モニタの信号ケーブルをオシロスコープ(Tektronix MSO64B, 4 GHz B.W.)に接続し、モニタ本体を水平・垂直方向に Δx , $\Delta y = \pm 0.2$ mm 移動させてパルス波形を測定した。水平方向に $\Delta x = +0.2$ mm (a), 0 mm (b), -0.2 mm (c) 移動させた時の A-mode の連続する 3 つのパルス波形を Fig. 5 に示す。プラス方向(マイナス方向)への移動では、Left 側(Right 側)のプ

レード信号が増大していることが分かる。Figure 6 では、4 信号の差分を示した。計算式は以下の通り。

$$\text{水平方向: Diff} = -UL - UR + LL + LR$$

$$\text{垂直方向: Diff} = UL + UR - LL - LR$$

UL: Upper-Left, UR: Upper-Right, LL: Lower-Left, LR: Lower-Right

3.3 補正係数の比較

DC モードとパルス計測モードにおいて、補正係数をそれぞれ算出した結果を Table 1 に示す。パルス計測モードでは、波形の積分値を基準に用いた場合と、パルス波高を基準に用いた場合の補正係数をそれぞれ示した。パルス波高を用いる方法は、オシロスコープの出力画面から直接的にビーム振動の振る舞いを知ることが出来るという利点がある。パルス計測モードで波形の積分値を用いた場合の値は、DC モードの値と良い一致を示している。一方で、パルス波高を用いた場合は、DC モードの値と比べやや小さな値となった。

パルス波高基準の補正係数を用いて、蓄積リングへのビーム入射のタイミングで誘起されるビーム振動の様子を観測した。フィリング・パターンは A-mode で、通常のトップアップ運転では約 30 秒に 1 回の頻度で行われる。Figure 7 に示す画像はオシロスコープの出力画面で、内部の波形演算機能を利用して、縦軸がバンチ毎のパルス波高がそのまま変位の量になるようにパルス波高基準の補正係数で表示させている。Figure 7 (a) から分かるように、SPring-8 蓄積リングの周回時間である $4.8 \mu\text{s}$ 周期の構造がみられる。最大振幅は水平 0.6 mm、垂直 0.2 mm 程度であり、角度にして、それぞれ $30 \mu\text{rad}$ 、 $10 \mu\text{rad}$ 程度に相当する(光源から光位置モニタまでの距離は約 20m)。Figure 7 (b) は、Fig. 7 (a) の黄色の帯の部分を拡大したものである。バンチ間隔 23.6 ns のバンチ・トレインにおいて、パルス毎のビーム位置の情報が得られていることが分かる。

Table 1: Calculation of Correction Factors

physical quantity	DC-mode		Pulse mode	
	Blade current	Waveform area	Waveform area	Pulse height
Horizontal	2.33	2.29	2.29	2.15
Vertical	2.14	2.16	2.16	1.92

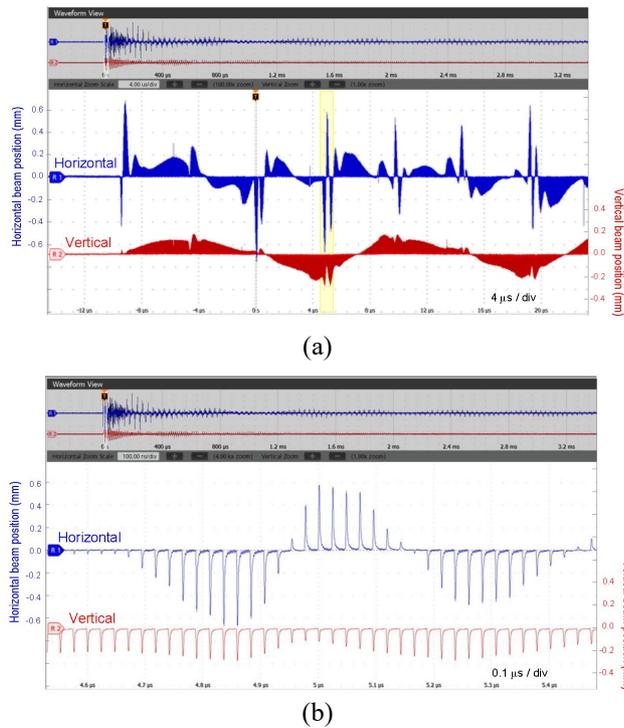


Figure 7: Beam oscillations induced immediately after beam injection.

4. まとめ

大型放射光施設 SPring-8 の挿入光源ビームラインで運用中のパルス・モード計測型光位置モニタの信号電流のバイアス電圧依存性と補正係数について調査した。

DC モードにおけるブレード電流信号と光電子収集電極のバイアス電圧の関係を表す電流電圧曲線の測定では、プラトー領域の下限が $HV=+20\sim+100V$ となり、ブレ

ード検出素子の配列に傾斜配置を採用する標準型光位置モニタと同等以上の大変良好な結果が得られた。これにより、フィリング・パターンの変更による影響を最小限に抑えられていることが確認された。

補正係数を算出するための基準として、DC モードでの電流値、及び、パルス計測モードでの波形積分値と波高値を用いる 3 通りの方法を比較した。電流値基準に対して波形積分値基準はよく一致しており、パルス波高基準ではやや小さな値となった。パルス波高基準による方法は、オシロスコープの出力画面からビーム振動の振る舞いを直観的に知ることが出来るという点で、有効な方法である。オシロスコープの内部機能を用いてパルス波高基準の補正係数で較正することにより、ビーム入射時の振動の様子を定量的に観測できる例を示した。

参考文献

- [1] H. Aoyagi *et al.*, “Pulse-mode x-ray beam position monitor prototype for a synchrotron radiation beam line”, *Phys. Rev. Accel. Beams* 24, 032803 (2021).
- [2] H. Aoyagi *et al.*, “Blade-type X-ray beam position monitors for SPring-8 undulator beamlines”, *Nucl. Instr. and Meth. A* 467-468, 252-255 (2001).
- [3] http://www.spring8.or.jp/en/users/operation_status/schedule/bunch_mode
- [4] H. Aoyagi *et al.*, “Newly designed inclined X-ray beam position monitor and reduction of influence due to filling patterns of the SPring-8 storage ring”, PASJ2020, TH0006.
- [5] H. Aoyagi *et al.*, “Inclined X-ray beam position monitors to reduce influence of filling pattern for the SPring-8 photon beamlines”, IBIC2020, TUPP06.
- [6] H. Aoyagi *et al.*, “Evaluation of influence on X-ray beam position monitors by changing filling pattern at SPring-8”, PASJ2023, WEP06.
- [7] “Multi bunches” mode is a filling pattern used, for example, for accelerator tuning.