

パルス・モード計測型光位置モニタの高分解能化に向けて TOWARD HIGHER RESOLUTION IN PULSE-MODE X-RAY BEAM POSITION MONITOR

青柳秀樹[#], 大沢仁志, 藤田貴弘, 高橋 直
Hideki Aoyagi [#], Hitoshi Osawa, Takahiro Fujita, Sunao Takahashi
Japan Synchrotron Radiation Research Institute

Abstract

We are working on practical application of a pulse-mode X-ray beam position monitor (XBPM) that enables pulse-by-pulse position measurement of high-intensity synchrotron radiation beams in SPring-8. The heat resistance performance has been improved by modifying the structure of the blade type detection elements and the holders. Hereby, the output signal charge for each pulse can be increased, so that improvement in resolution can be expected. The evaluation tests of this monitor was carried out at a bending magnet beamline. We succeeded in observing the pulse-by-pulse dynamics of the synchrotron radiation beam for the first time by perturbing the electron beam orbit using a beam shaker. The effective position resolution for each shot was evaluated using high-speed amplifiers, low pass filters, and a RF difference circuit.

1. はじめに

大型放射光施設 SPring-8 の大強度放射光ビームのパルス毎の位置計測を可能とするパルス・モード計測型光ビーム位置モニタ(pulse-mode X-ray beam position monitor (XBPM))の実用化に取り組んでいる。本モニタは、ダイヤモンド・ヒートシンクを母材としたブレード型検出素子を用いた光電子放出型光位置モニタであり、検出素子の浮遊電気容量を低減させ、かつ、マイクロ・ストリップライン伝送路を用いてインピーダンスを整合させることにより、単極性パルス信号(パルス長 0.7 ns FWHM)を発信することが出来る[1]。出力信号の電荷量(パルス波高)を増大させて位置分解能を実用レベルまで向上させることが次なる課題であった。小型化を最優先して設計していた光電素子の受光面を、高周波特性を著しく低下させない範囲で可能な限り大きくし、信号電荷量を増大させた。この改良型光電素子(ヒートシンク)を導入するにあたり、より高い耐熱性を得るために水冷素子ホルダも改良した。この改良により、放射光パワー密度の強いビームの中心近くまで検出素子を近づけることができるので、信号電荷量の増大が期待できる。

本モニタのショット毎の実効的な位置分解能を知るために、蓄積リングのチューン測定用のビームシェーカでビーム軌道に摂動を与えることで評価した。

2. モニタ検出部の改良

パルス・モード計測型光位置モニタは従来のモニタと同じく、4枚のブレード形状の検出素子を光軸近傍の上下左右に配置させ、各検出素子の信号比を位置情報として読み出す。Figure 1 にダイヤモンド・ヒートシンクを母材としたブレード型検出素子、及び、冷却ホルダの写真を示す。検出素子の光軸方向のサイズを初期型に比べて2倍の16 mm とすることで、実効的な受光面積を増大

させた。検出素子を光軸に対して約1/20の傾きを持たせた配置とすることで、放射光はブレードの片方の側面に照射される。これにより、光電子収集電極とブレード側面にチタンが蒸着された光電面との間に印加される電界が一樣となる効果が生まれ、光電子放出を効率良く制御することが可能となった。高い耐熱性を得るために、ヒートシンクはくさび型金具を用いて冷却ベースに両側を抑えた状態で固定されている。

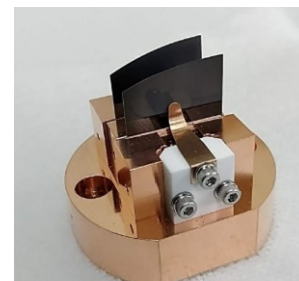


Figure 1: Photograph of diamond heatsinks and a water cooling base. The size of the heatsinks is 20 mm (height) × 16 mm (length) × 0.3 mm (thickness). Heatsinks are clamped to the cooling base with both sides held down using wedge-shaped metal fittings.

本モニタは SPring-8 偏向電磁石ビームライン BL02B1 フロントエンドに設置にて評価試験を実施した。マシン収納部から実験ホールをつなぐ信号ケーブルは Huber+Suhner S_04272_B (40 m)を使用した。

3. ビームシェーカによる摂動

蓄積リングのフィリングパターンは単一のシングルバンチ(孤立バンチ)とし、蓄積電流値は2mA とした。孤立バンチには、ビームシェーカにより垂直方向に摂動(65.76KHz, $v_y=19.3154$)を与えた。振幅が概ね 100 μm P-P 程度となるようにビームシェーカの強度を調整し、順次蹴り角を絞っていく形で一連の計測を実施した。Figure 2 に、ビームシェーカの強度を最大(以降 100% と表示)とした時の蓄積リング Single-pass Beam Position

[#] aoyagi@spring8.or.jp

Monitor (SPBPM) によるターン毎の測定点 (測定長 2048 ターンのうち最初の 20 ターン分を抜粋) とフィッティング曲線を示す。このグラフから、フィッティング曲線の振幅が $40 \mu\text{m}$ ($80 \mu\text{m}$ P-P) 程度であることが分かる。同じようにして、ビームシェーカの名目上の強度が 100%、70%、50%、25%、0% (off) のデータを取得した。

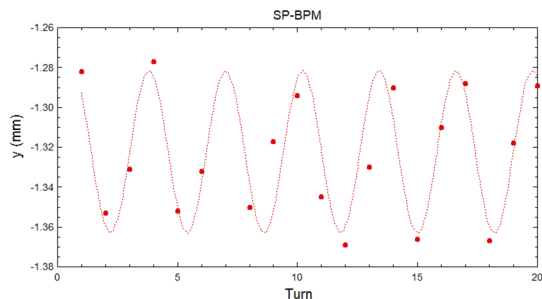


Figure 2: Measurement data for each turn by SPBPM, and a fitting curve (shaker strength: 100%).

SPBPM で観測された垂直位置から BL02B1 の XBPM (発光点から L (m) 下流) で観測される垂直位置を計算で求めることができる。SPBPM (cell_08-3)、及び、BL02B1 発光点での β 関数を β_{BPM} 、 β_{B1} とし、BL02B1 発光点での α 関数を α_{B1} とすると、SPBPM、B1 発光点、XBPM での垂直ビーム位置は、それぞれ次のように書ける。

$$y_{\text{BPM}} = \sqrt{\varepsilon\beta_{\text{BPM}}} \cos \omega\beta t \quad (1)$$

$$y_{\text{B1}} = \sqrt{\varepsilon\beta_{\text{B1}}} \cos(\omega\beta t + \theta) \quad (2)$$

$$y_{\text{XBPM}} = \sqrt{\varepsilon\beta_{\text{B1}}} \cos(\omega\beta t + \theta) - L \sqrt{\frac{\varepsilon}{\beta_{\text{B1}}}} \{ \alpha_{\text{B1}} \cos(\omega\beta t + \theta) + \sin(\omega\beta t + \theta) \} \quad (3)$$

式(1), (3)から振幅の比が次の通り求まる。

$$\frac{|y_{\text{XBPM}}|}{|y_{\text{BPM}}|} = \frac{\sqrt{\left(\sqrt{\beta_{\text{B1}}} - \frac{\alpha_{\text{B1}}L}{\sqrt{\beta_{\text{B1}}}} \right)^2 + \frac{L^2}{\beta_{\text{B1}}}}}{\sqrt{\beta_{\text{BPM}}}} \quad (4)$$

ここで、 $\alpha_{\text{B1}} = -0.55$ 、 $\beta_{\text{B1}} = 28 \text{ m}$ 、 $\beta_{\text{BPM}} = 27.315 \text{ m}$ であることから、例えば、 $y_{\text{BPM}} = 100 \mu\text{m}$ 、 $L = 12 \text{ m}$ とすると、 $|y_{\text{XBPM}}|/|y_{\text{BPM}}| = 132 \mu\text{m}$ となる。すなわち、SPBPM での振幅から XBPM での振幅に焼き直す計算は、次のように書ける。

$$y_{\text{XBPM}} = 1.32 y_{\text{SPBPM}} \quad (5)$$

Figure 3 では、横軸は名目上のビームシェーカ強度、縦軸は推定される XBPM の地点 (発光点から 12m) におけるビーム振幅を表している。フィッティングに用いる測定データ数や切り取る場所によって得られる振幅の値が大きくことなることから、各ビームシェーカ強度において、

条件を変えて得られた値を複数示している (“×”印で表記)。一方で、測定値として得られる分散が、分解能と実際のビーム振動成分の 2 乗和平方根で与えられると考え、ビームシェーカ強度が 0% の時の全測定点 (2048 ターン分) の標準偏差 ($18.0 \mu\text{m}$ std) を SPBPM の分解能と仮定し、各条件 (25~100%) における正味の振動振幅を推定し、それを “○”印で表記した。名目上のビームシェーカ強度が 70% 以下では、推定される振動振幅と比例関係にあるが、100% の時は振動振幅がやや抑制されている (不安定さが生じている) ように見受けられる。

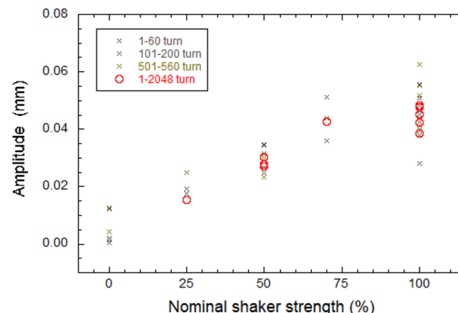


Figure 3: Perturbation amplitudes at the XBPM point (12 m from the light source point) estimated from the SPBPM data.

4. Pulse-mode XBPM による振動観測

4.1 ビームシェーカ強度に対する応答

本モニタの右上 (upper right, UR)、及び、右下 (lower right, LR) の検出素子の信号を独立に観測した。Figure 4 に、測定装置の構成を示す。同軸信号ケーブル (HUBER+SUHNER S_04272_B, 40m)、350MHz プリアンプ (Stanford Research, SR445A)、ローパスフィルタ (Mini-Circuits, SLP-300 + SBLP-117) を用いて、オシロスコープ (Teledyne LeCroy, WavePro 404HD-MS) で測定した。Figure 5 に、観測されたパルス波形 (パルス長: 3 ns) を示す。ターン毎のパルス光位置が変動することによって、UR ブレードと LR ブレードの波高に明らかな差が見られる。Figure 6 に、各ブレードのパルス波形の積分値 (積分範囲: $-2 \text{ ns} \sim +8 \text{ ns}$) の相関関係を示す。ビームシェーカ強度を強くすることで、各ブレードからの出力の変動幅が広がり、負の相関関係が強く表れる。

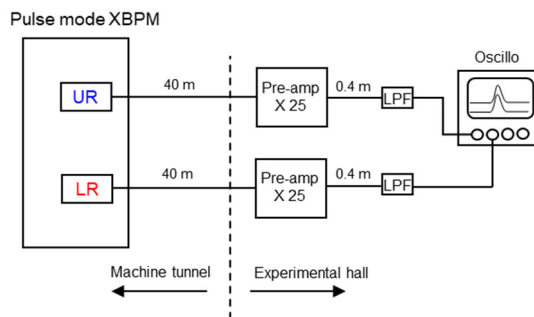


Figure 4: Setup of measurements using pre-amplifiers and low pass filters.

ビームシェーカ強度“off”の時に得られる UR 信号と LR 信号の差分の標準偏差 0.231 pC std (変位 $11.7 \text{ }\mu\text{m std}$ 相当) はモニタの分解能に相当すると仮定することにより、ビームシェーカで摂動を与えた時の信号量(パルス波形の積分値)の差分の標準偏差から XBPM で計測される最大振幅を推定することが出来る。結果を Table 1 に示す。ここでも、測定値として得られる分散が、分解能と実際のビーム振動成分の 2 乗和平方根で与えられる関係式を用いている。

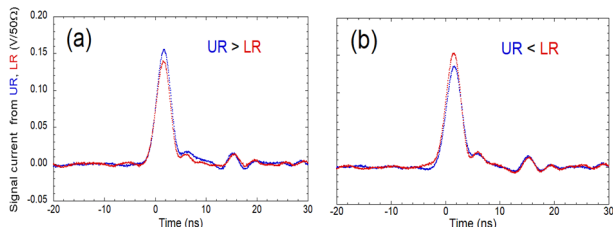


Figure 5: Waveforms from the pulse-mode XBPM (nominal beam shaker intensity: 100%), (a) when the beam position is high (UR > LR), and (b) when the beam position is low (UR < LR).

Table 1: Estimated Maximum Amplitudes Measured by the XBPM

Shaker strength (nominal)	Standard deviation of difference, pC	Converted to position, mm	Estimated maximum amplitude, mm
100 %	0.865	0.0436	0.0592
70 %	0.764	0.0386	0.0518
50 %	0.467	0.0236	0.0289
25 %	0.334	0.0168	0.0171
off	0.231	0.0117	----

4.2 連続するターン毎の応答

Figure 7 に、ビームシェーカ強度 100% の条件で、本モニタによって観測された連続する 20 ターン分の変動をとフィッティング曲線を示す。測定を 2 回実施したが、明らかに振幅が変化していた。実際のビーム摂動の振幅が安定していなかったことが予想される。Table 2 に、フィッティング曲線の振幅(単位:pC)、それを位置に換算した値(単位:mm)、及び、フィッティング曲線からの差分の標準偏差(単位: $\mu\text{m std}$)を示す。フィッティング曲線からの差分の標準偏差は、本モニタの実効的な分解能と解釈することが出来る。

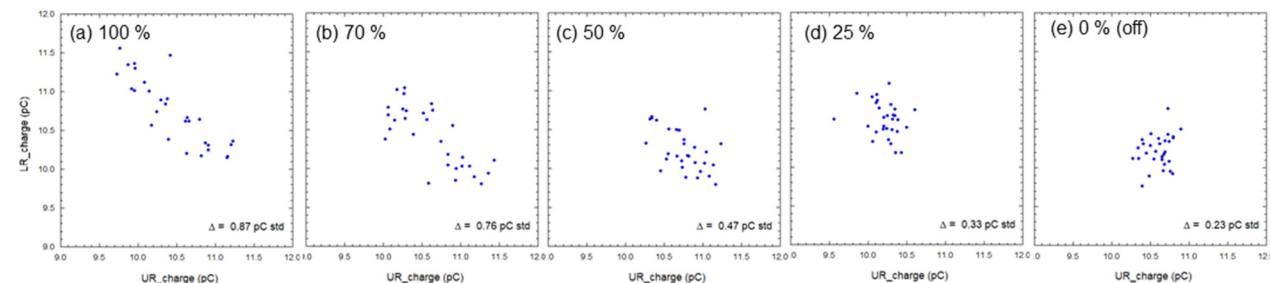
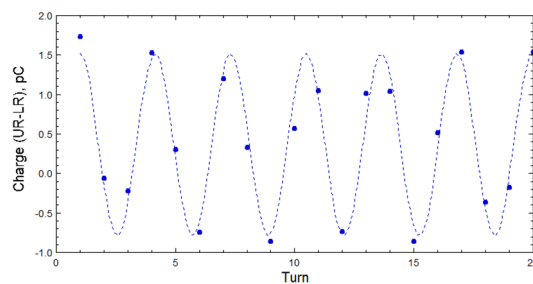
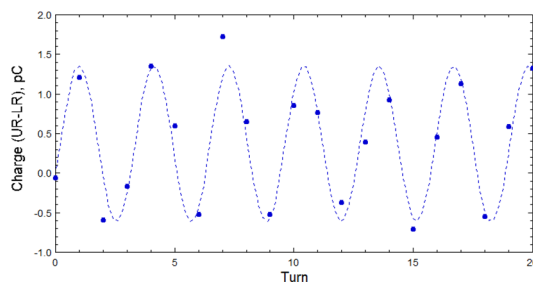


Figure 6: Correlation of the integrated values of the pulse waveforms of UL and LR blades.



(a) Measurement 1



(b) Measurement 2

Figure 7: Measurement data for each turn by XBPM, and fitting curves (shaker strength: 100%).

Table 2: Amplitudes Observed by the XBPM

Shaker strength (nominal)	Measurement	Amplitude, pC	Converted to position, mm	Difference from fitting curve, $\mu\text{m std}$
100 %	1	1.16	0.0585	9.1
	2	0.985	0.0497	10.1

4.3 RF 差分回路による観測

分配器やスタブケーブル(開口端、閉口端)を組み合わせた RF 回路を用いてアナログ的に差分信号(位置感度信号)を生成することが出来る。Figure 8 に、RF 回路を用いた計測のセットアップを示す。本測定では、前述のプリアンプ(SR445A)、ローパスフィルタ(SLP-300 + SBLP-117)を用いている。Figure 9 に、モニタ本体の鉛直ステージの位置を 0.1mm ステップでスキャン測定を行った時の波形を示す。先行するパルスは、UR 信号と LR 信号のそれぞれが最短経路で合成された“和”信号である。約 24 ns 後のパルスは、それぞれのスタブ・ケーブルの先

端で反射された後に合成された“差”信号である。“和”信号のパルスの電荷はほぼ一定であるが、“差”信号のパルス波高は敏感に反応しており、ビーム位置に対して有感であることが分かる。

Figure 10 に、“差”信号の拡大図を示す。ビームシェーカの強度が、(a)100% の時にはパルス波高の変動が見られるが、(b) off の時には変動が抑えられている。この差分信号の変動(積分範囲:+20 ns ~ +30 ns)から、実際のビーム振動の最大振幅を推定した。その結果を Table 3 に示す。ビームシェーカ強度“off”の時に得られる標準偏差(32.4 μm std)はモニタの分解能に相当すると仮定し、測定値として得られる分散は、分解能と実際のビーム振動成分の 2 乗和平方根で与えられる関係式を用いている。

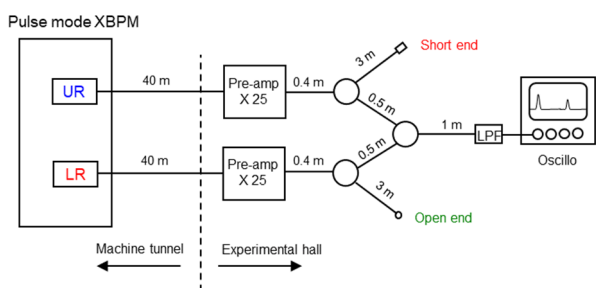


Figure 8: Generation of “difference” signal using the RF circuit.

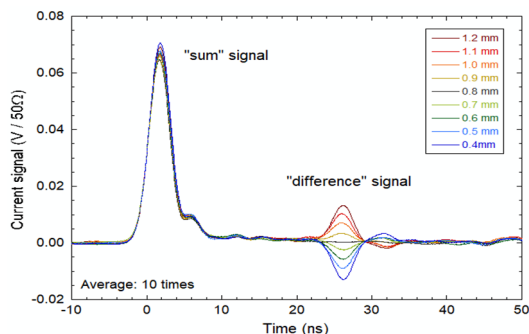


Figure 9: Waveform variations during scanning measurements.

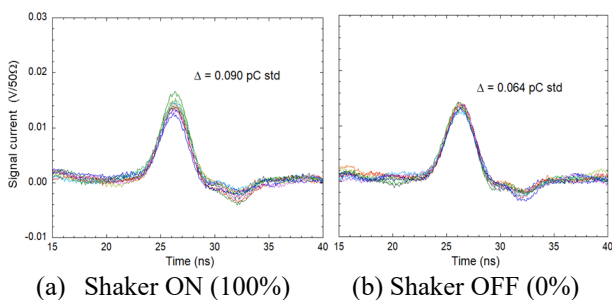


Figure 10: Variation in fluctuations of “difference” signals. Ten measurements are indicated in both graphs.

Table 3: Estimated Maximum Amplitudes Measures by the XBPM Using the RF Circuit

Shaker strength (nominal)	Standard deviation of difference signal, pC	Converted to position, mm	Estimated maximum amplitude, mm
100 %	0.0899	0.0453	0.0448
0 %	0.0635	0.0324	---

5. まとめ

Figure 11 は、Table 1~3 で示した振幅をまとめたものである。Figure 3 で示した SPBPM の測定値から推定したビーム振幅と一致していることが分かる。分解能のまとめを Table 4 に示す。本モニタの分解能は 10 μm RMS 程度であることが分かった。一方で、差分信号を出力する RF 差分回路を用いた場合の分解能は 30 μm RMS 程度であった。この理由は、差分信号は分配器(-6dB)を 3 回通過するので波高は 1/8 となるため、理論上の分解能の低下は $\sqrt{8}$ (= 2.8) 倍となることから説明できる。

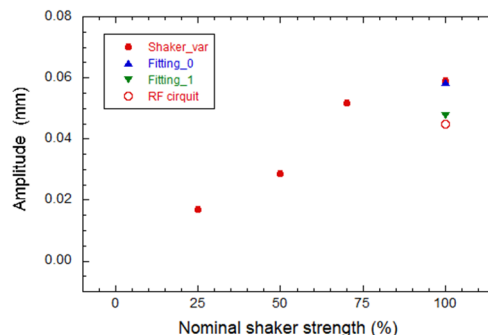


Figure 11: Perturbation amplitudes measured by the pulse-mode XBPM.

Table 4: Summary of Resolutions

	3.1 Turn by turn	3.2 Distribution	3.3 RF circuit
Resolution, μm RMS	9.1 / 10.1	11.7	32.4

今後の方針として、本モニタを挿入光源ビームラインに移設して、耐熱性を確認するとともに、信号量が増大することから、実効的な分解能の向上することを確認する予定である。

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).