

DEVELOPMENT OF TURN-BY-TURN TRANSVERSE PHASE SPACE MONITOR

Satoshi Hashimoto¹, Yoshinori Hisaoka, Ainosuke Ando
NewSUBARU, Laboratory of Advanced Science and Technology for Industry, University of Hyogo
1-1-2, Kouto, Kamigori-cho, Akou-gun, Hyogo, 678-1205

Abstract

A turn-by-turn transverse phase space monitor is developed at the NewSUBARU storage ring. The system is composed from two BPMs at both ends of the 15m long straight section, two digital oscilloscopes with the sampling speed of 10 GS/s and a PC for calculation and display of measurement data. Nonlinear beam dynamics in the phase space such as nonlinear resonances up to 8th order and the vertical emittance growth due to x-y coupling can be observed. This monitor is useful as a beam diagnostics tool for the study of the nonlinear beam dynamics such as the effect of closed gap of the long undulator.

横方向位相空間モニターの開発

1. はじめに

放射光リングでは非線形磁場が電子ビームに及ぼす影響を把握する事が重要である。そのためにBPM信号のターンバイターン解析を行い、位相空間におけるベータatron振動の振る舞いを調べ、非線形ビームダイナミクスを明らかにする手法が良く用いられる^[1,2,3]。

ニュースバル放射光施設ではトップアップ運転時に11m長尺アンジュレーター (Long Undulator, LU) のギャップを閉じるとビーム寿命と入射効率が低下する問題があり、より定量的な解析に必要なビーム診断系の開発が求められている。また逆偏向電磁石を用いてモーメントムコンパクションファクター α を正負に容易に可変出来る事がニュースバルの特徴の一つであり、これまでにネガティブ α での運転^[4]、テラヘルツ波領域のコヒーレント放射光発生のための low α 運転^[5,6,7]等、通常の利用運転とは異なる新しいラティスでの運転が行われているが、入射調整やオプティクス測定や調整の為にBPMのターンバイターン測定が必要である。

そのためニュースバルでは水平および垂直方向の位相空間内でのベータatron振動の振る舞いを見ることが出来る位相空間モニターをデジタルオシロスコープを用いて開発した。その概要と共鳴線近傍での位相空間測定の結果を報告する。

2. 位相空間モニター

3.1 概要

2台のBPM (#12, #13) で測定したビーム重心位置 x_{12} , x_{13} から、これらのBPMの間にある任意の位置 s における位相空間 (x, x') を求める事が出来る。輸送行列

$$\begin{bmatrix} x \\ x' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{12} & S_{12} \\ C'_{12} & S'_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{12} \\ x'_{12} \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} x_{13} \\ x'_{13} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{13} & S_{13} \\ C'_{13} & S'_{13} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ x' \end{bmatrix}$$

$$C_{12} = \sqrt{\frac{\beta}{\beta_{12}}} (\cos\psi_1 + \alpha_{12} \sin\psi_1)$$

$$S_{12} = \sqrt{\beta\beta_{12}} \sin\psi_1$$

$$C'_{12} = \frac{\alpha_{12} - \alpha}{\sqrt{\beta\beta_{12}}} \cos\psi_1 - \frac{1 + \alpha_{12}\alpha}{\sqrt{\beta\beta_{12}}} \sin\psi_1$$

$$S'_{12} = \sqrt{\frac{\beta_{12}}{\beta}} (\cos\psi_1 - \alpha \sin\psi_1)$$

から2台のBPM間の任意の点における (x, x') は

$$x = \sqrt{\frac{\beta}{\beta_{12}}} \frac{\sin\psi_2}{\sin(\psi_1 + \psi_2)} x_{12} + \sqrt{\frac{\beta}{\beta_{13}}} \frac{\sin\psi_1}{\sin(\psi_1 + \psi_2)} x_{13}$$

$$x' = -\frac{1}{\sqrt{\beta\beta_{12}}} \frac{\cos\psi_2 + \alpha \sin\psi_2}{\sin(\psi_1 + \psi_2)} x_{12} + \frac{1}{\sqrt{\beta\beta_{13}}} \frac{\cos\psi_1 - \alpha \sin\psi_1}{\sin(\psi_1 + \psi_2)} x_{13}$$

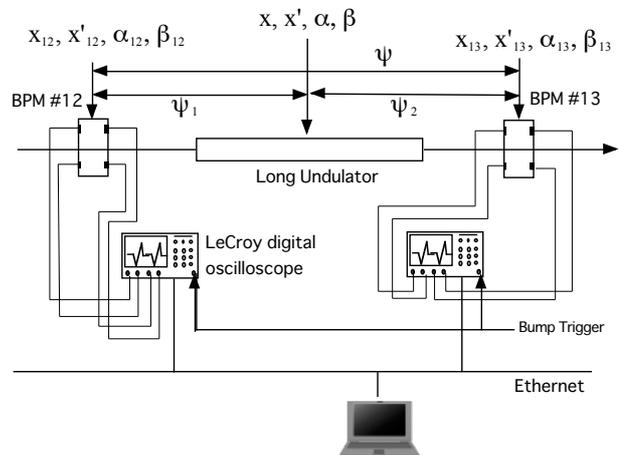


図1. 位相空間モニターの概要

¹ E-mail: hashi@lasti.u-hyogo.ac.jp

と表される。ここで β はベータトロン関数、 ψ は位相の進み、 $\alpha = -1/2 \cdot d\beta/ds$ 。

ニュースバルの15m長直線部にある長尺アンジュレーターの上下流にあるBPM (#12, #13) を用いて、これらのBPMおよびLU中央での位相空間 (x, x') , (y, y') を求めた。また計算に必要な β 、 α 、 ψ はMADによる計算値を使用した。

3.2 ハードウェア

BPM信号は分配器によりCOD測定系とTurn-by-Turn測定系に分けられる。ターン毎のBPM波形データのAD変換にはデジタルオシロスコープ（レクロイ、WavePro 7300）を2台使用した。4チャンネル同時のサンプリング速度は最大10GS/s、内蔵するメモリ長は4Mワードであり、 4×10^6 ポイントのデータを取得することが出来る。これは時間に換算すると0.4msecであり、ニュースバルでのビーム周回周期は396nsecであるから、ほぼ1000ターン分の軌道データを取得することが出来る。

ニュースバルリングにはベータトロン振動を励起するための高速キッカーがないので入射バンパ電磁石を用いて水平方向にベータトロン振動を励起した。入射（バンパ）のタイミング信号を2台のオシロスコープの外部トリガー端子に入力し、セプタム電磁石は励磁せず、バンパ電磁石のみを励磁してビーム振動を測定した。

3.3 ソフトウェア

データの解析、表示はLabVIEWで開発したソフトウェアを用いてその場ですぐに行うことが出来、すべての操作はGUI内のボタン操作で自動処理されている。

オシロスコープで取得したBPMの各チャンネルの波形データはオシロスコープに内蔵されたハードディスクに一時的に保存された後、ネットワークを経由してデータ解析用PC（メモリ2GB）に送られデータ処理が行われる。波形データファイルは転送時間の問題からファイル容量を出来るだけ小さくするためにバイナリー形式で保存、転送され、PC内でデコードされる。

約1000ターン分のBPM波形から同一バンチの各ターン毎の波形を取り出して、4つのpeak-to-peak電圧値からビーム位置 x 、 y を評価する（図2）。ビームOFFの状態ですぐに1パルスだけビームを入射して最初に現れるビーム波形の位置に最初のターンの取り出し窓を設定することにより2台のオシロスコープ間の同期を取ることが出来る。

図3はBPM#12、LU中央、BPM#13における水平、垂直方向の位相空間プロットである。位相空間の縦軸は x'' 、 y'' の代わりに正規化した運動量 P_x 、 P_y を用いている。

4つのボタン電極の信号の和を計算することにより速いビーム減衰がある場合、それを見ることが出来る（図2）。また約1000ターンの軌道データ x 、 y からFFTを用いて0.3mAの低電流値でもベータトロ

ンチューン v_x 、 v_y を評価することが出来る。

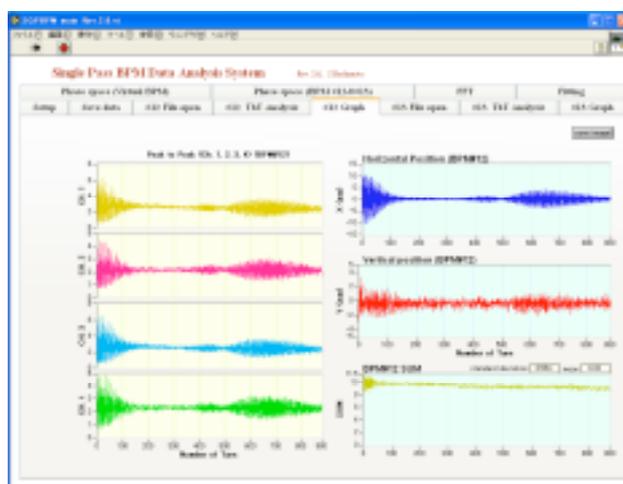


図2. 1台のBPMの4つのボタン電極からのpeak-to-peak信号（左）、水平および垂直のビーム位置（右上の2つ）、peak-to-peak値の和信号（右下）。

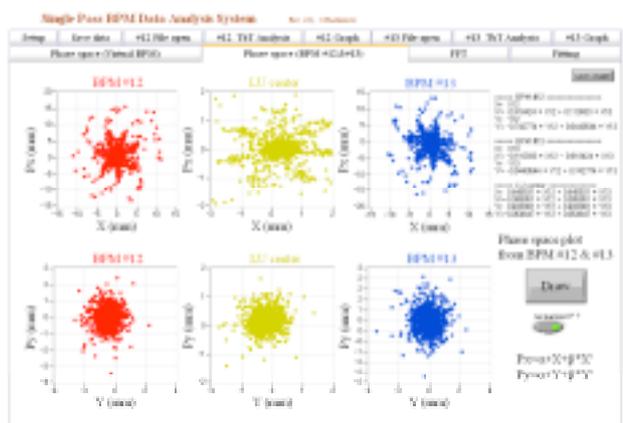


図3. BPM#12（左）、LU中央（中央）、BPM#13（右）における水平（上段）および垂直（下段）方向位相空間プロット。水平方向に7次の共鳴構造が見られる。

4. 位相空間測定

4.1 共鳴線近傍での水平方向位相空間の観測

図4に水平方向チューン v_x を(a) $3v_x=19$ 、(b) $4v_x=25$ 、(c) $6v_x=37$ 、(d) $7v_x=44$ 、(e) $8v_x=49$ に近付けた時の水平方向位相空間プロットを示す。長尺アンジュレーターを含む挿入光源のギャップはオープンのままに水平方向にキックしてベータトロン振動を起こしたのであるが8次の共鳴構造まで確認する事が出来た。

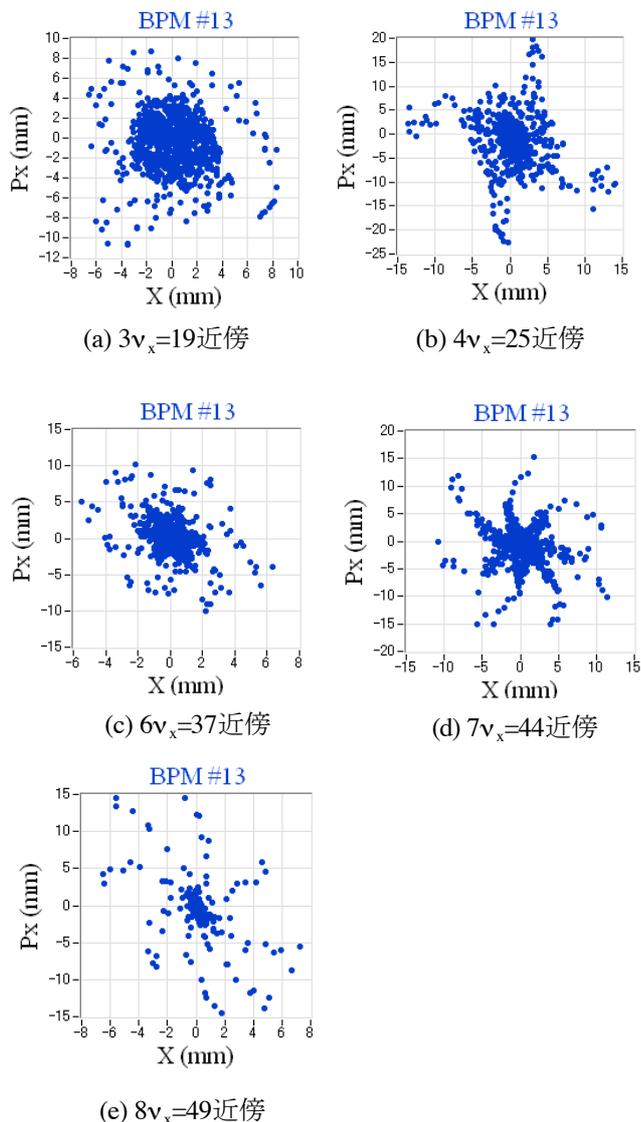


図4 共鳴線近傍での水平方向位相空間

3.2 スキュー四極電磁石によるXYカップリング

スキュー四極電磁石 Skew Q3 (SQ3) を励磁して、XYカップリングを変えた時の位相空間の様子を図5に示す。SQ3の励磁後にCODの補正を行った。励磁の無い通常の状態では水平方向に7次の共鳴構造が見えるが、SQ3のキックを強めていくと水平方向の共鳴構造が崩れ、分布が拡散する一方、垂直方向には位相空間分布の面積（エミッタンス）が増大する様子が観測できる。

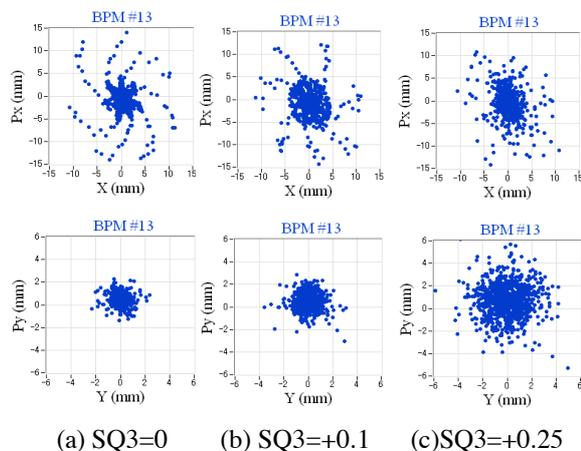


図5 スキュー四極を励磁した時の水平（上段）、垂直（下段）方向の位相空間

5. まとめ

デジタル化としてデジタルオシロスコープを用いて、BPM信号のturn-by-turn測定が可能な位相空間モニターを開発した。ベータトロンチューンが共鳴線近傍にある場合のビーム重心位置の位相空間プロットから3次から8次までの共鳴構造が観測された。今後、位相空間モニターを用いて非線形ビームダイナミクス、特に長尺アンジュレーターのギャップを閉じた時の影響を調べる予定である。

参考文献

- [1] K.D.Jacobs et al., "Turn-by-Turn transverse phase space measurements in real time", Proceedings of the 2001 Particle Accelerator Conference, Chicago, p.2395
- [2] P.Castro, "Applications of the 1000-turn orbit measurement system at LEP", Proceedings of the 1999 Particle Accelerator Conference, New York, p.456
- [3] 宮島司、小林幸則、"垂直3次共鳴近傍における位相空間中でのベータトロン振動の測定"、加速器, vol.1, No.2 (2004)
- [4] A. Ando, et al., "Negative Alpha-p operation at NewSUBARU", AIP Conf. Proceedings 705 (2004), p.13
- [5] Y. Shoji, et al., "Quasi-isochronous operation at NewSUBARU", Proceedings of the 2004 European Particle Accelerator Conference, Lucerne, p.2353.
- [6] 高橋俊晴、"コヒーレント放射光"、加速器, vol.2, No.1 (2005)
- [7] S.Hashimoto, et al. "Observation of coherent synchrotron radiation at NewSUBARU", Proceedings of the 2005 Particle Accelerator Conference, Knoxville