

高精度バンチ電流測定システムの開発：MTCA.4 と高速サンプリングによる高精度化の実現

DEVELOPMENT OF A HIGH-PRECISION BUNCH CURRENT MEASUREMENT SYSTEM: HIGH-ACCURACY REALIZATION WITH MTCA.4 AND HIGH-SPEED SAMPLING

阿部利徳^{*,A)}, 前坂比呂和^{B,A)}, 藤田貴弘^{A)}, 正木満博^{A)}, 清道明男^{A)}, 上島考太^{C)}, 齋田涼太^{C,D)}, 土山翼^{C,D)}

Toshinori Abe^{*,A)}, Hirokazu Maesaka^{B,A)}, Takahiro Fujita^{A)}, Mitsuhiro Masaki^{A)}, Akio Kiyomichi^{A)},

Kota Ueshima^{C)}, Ryota Saida^{C,D)}, Tsubasa Tsuchida^{C,D)}

^{A)} Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI)

^{B)} RIKEN SPring-8 Center (RSC)

^{C)} National Institutes for Quantum Science and Technology (QST)

^{D)} NAT Corporation

Abstract

To achieve high-precision bunch current measurement at SPring-8-II, we developed a system consisting of the MTCA.4-based high-speed digitizer ADQ7, which can perform high-speed waveform sampling with external clock input, and a high-speed waveform sampling clock generator. The ADQ7 can measure waveforms at 10 GS/s. We intentionally shifted the sampling clock from the integer multiple of the RF reference signal frequency, and achieved a staggered sampling scheme where the sampling time was shifted by 1/5 of the RF period for each subsequent revolution, allowing for equivalent oversampling of 80 points per bunch, approximately 40 GS/s. Furthermore, by acquiring and averaging 100 turns, we aimed to improve the S/N ratio and achieve high-precision measurement. The results of our measurement demonstrated a bunch current resolution of 0.5 % and a bunch time resolution of 0.6 ps. The system developed this time is stably operating in parallel with the conventional bunch current measurement system at SPring-8 as a backup. It has also been introduced as a bunch current measurement system at NanoTerasu.

1. はじめに

SPring-8 [1] と NanoTerasu [2–4] は、世界トップレベルの放射光施設として、物質科学や生命科学などの幅広い分野の研究に貢献しています。これらの施設では、高品質な実験データを得るために、光学系の安定性が非常に重要です。そのため、Top-up 運転によるビーム電流の安定化が不可欠です。

Top-up 運転では、蓄積リング内の電子ビームの電流を一定に保つために、不足しているバンチに電子ビームを追加注入します。特に、時分割測定を行うユーザーからは、バンチ電流のばらつきを 10 % 以内にするのが求められています。SPring-8 では、オシロスコープを用いて、バンチ電流を測定しています [5]。本開発では、SPring-8-II [6] と NanoTerasu 用に、MTCA.4 [7] ベースの新規測定システムを開発しました。このシステムは、等価時間サンプリング [8] という手法を用いて、高精度 (< 1 %)、高速測定 (< 5 秒)、既存の制御システムとの親和性という特徴を持ちます。

本稿では、まず、等価サンプリングを用いたバンチ電流の測定原理について説明します。次に、この測定原理を実現するための測定器システムの構成及び各機器の性能について述べます。そして、本システムで測定したバンチ電流の測定結果について報告し、本開発についてまとめます。

2. 測定方法

等価時間サンプリングは、繰り返し信号に対して、通常のサンプリング周期よりもはるかに高い時間分解能を得るための手法です。本システムでは、この手法を用いて、バンチ電流の波形を高速にサンプリングしています。

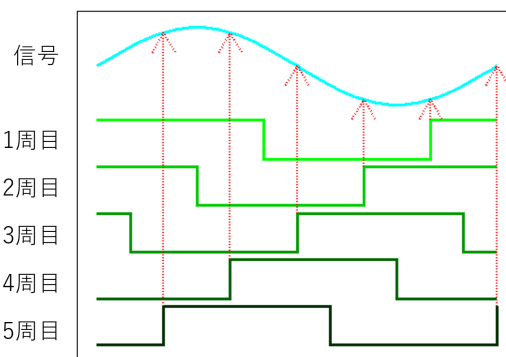


Figure 1: Concept of equivalent-time sampling.

Figure 1 に示すように、等価時間サンプリングでは、周期的信号に対し、サンプリングの開始時間を少しずつずらしながら複数回測定し、そのデータを重ね合わせることで、高速サンプリングと同等の波形を得ます。本システムでは、周回ごとにトリガタイミングを変更するか

* toshinori.abe@spring8.or.jp

わりに、サンプリング周波数を RF 周波数から、次式により定義されるサンプリング周波数を用いることにより、周回ごとのサンプリング開始時間をずらし、等価時間サンプリングを実現しています。

$$F_{bs} = F_{RF} \times \left(N_{\text{sample}} + \frac{1}{N_{\text{bunch}} \times N_{\text{turn}}} \right) \quad (1)$$

ここで、

F_{bs} : バンチ信号サンプリング周波数

F_{RF} : RF 周波数

N_{sample} : バンチあたりのサンプル数

N_{bunch} : バンチ数

SPring-8 では 2436、NanoTerasu では 592

N_{turn} : バンチ電流を測定するのに必要な周回数

です。

本開発では、 $N_{\text{sample}} = 16$ 、 $N_{\text{turn}} = 5$ であるので、バンチあたりのサンプル数は、次式のようにになります。

$$N_{\text{sample}} \times N_{\text{turn}} = 80$$

バンチ長約 2 ns に 80 点のサンプリング点があるので、40 GS/s 相当の高速な波形データが得られます。本開発では、さらに、100 周分の連続した波形データを取得することにより、サンプリング点あたり 20 回平均処理でノイズを低減し、高精度な測定が可能になります。蓄積波形サンプル数は、SPring-8 では一測定あたり、

$$100 \times (16 + 1/2436/5) \times 2436 = 3,897,620$$

となります。

この測定を行うためには、等価時間サンプリングのための高精度なクロック信号と、ADC に波形データを保存するための大容量メモリが必要となります。

3. 測定器システム

等価時間サンプリングを実現するために、Fig. 2 に示すように、

- 高精度クロック: 等価時間サンプリングには、高精度なクロック信号が必須。
- 高速 A/D 変換器: 高速なサンプリングに対応。
- データ処理ユニット: 取得したデータを処理し、波形を生成。

からなる測定器システムを構築しました。

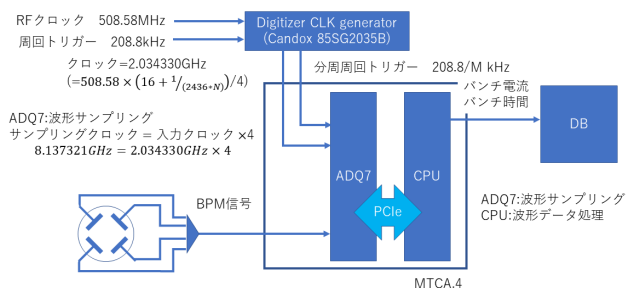


Figure 2: Schematic diagram of the bunch current measurement system.

3.1 高速デジタイザクロック生成器

等価時間サンプリングのクロック信号は、高速デジタイザクロック生成器 (Candox 85SG2035B) により生成されます。高速デジタイザクロック生成器に、クロック信号を生成するための基準信号として、RF クロック (SPring-8 は 508.58 MHz、NanoTerasu は 508.759 MHz) と、ADC のサンプリングトリガに使用するための周回トリガ (SPring-8 では 208.8 kHz、NanoTerasu では 859.4 kHz) を入力します。高速デジタイザクロック生成器は、等価時間サンプリングクロックを設定するためのパラメータ (N) と、周回トリガの分周数 (M) を設定することができます。高速デジタイザクロック生成器で生成されるデジタイザクロックの周波数は、次式で表されます。

$$F_{DC} = F_{RF} \times \left(4 + \frac{1}{2436 \times N} \right) \quad (2)$$

ここで、

F_{DC} : デジタイザクロック周波数

F_{RF} : 入力 RF 周波数

N : デジタイザクロック周波数設定パラメータ

です。高速デジタイザクロックが生成すべきデジタイザクロックは、次に説明する波形サンプリング機器 (ADQ7) が、入力サンプリングクロックを 4 通倍してサンプリングするので、Eq. 1 を用いると、

$$\begin{aligned} F_{DC} &= F_{bs}/4 \\ &= F_{RF} \times \left(16 + \frac{1}{2436 \times N_{\text{turn}}} \right) / 4 \\ &= F_{RF} \times \left(4 + \frac{1}{2436 \times 4N_{\text{turn}}} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

となります。ここで、Eq. 2 と Eq. 3 を比べると、 $N = 4 \times N_{\text{turn}}$ なので、 $N = 20$ として使用します。

3.2 高速 A/D 変換器

高速波形サンプリングとして、Teledyne ADQ7 [9] を用いています。ADQ7 は、次の特徴を持ちます。

- 高分解能: ADC 14 bit
- 高サンプリング: 内部クロックを用い、デュアルチャンネルモードは、5 GS/s AD サンプリングレート、シングルチャンネルモードでは、10 GS/s で動作可能
- 広帯域幅: 2.5 GHz のアナログ入力帯域幅を提供
- 外部クロックの入力が可能
- データメモリ容量: 4 GB

Figure 2 にあるように、ADQ7 に、高速デジタイザクロック生成器からのクロック信号とトリガ信号を入力します。BPM からの 4 チャンネルの信号を積算した信号の波形サンプリングを行います。ただし、本開発では、SPring-8 の諸事情により、1 チャンネルだけの信号を ADQ7 に入力しています。取得した 3,897,620 点のデータは、ADQ7 のデータメモリに保存され、デジタルデータ処理のためにデータ処理ユニットへ PCIe バスを介して転送されます。

3.3 データ処理ユニット

取得した波形データは、CPU モジュールによりデジタルデータ処理がなされます。この CPU モジュールは、

- 動作クロック: 2 GHz
- メモリ: 32 GB
- コア数: 4

のスペックを持ち、波形データから、2436 個 (NanoTerasu では 592 個) のバンチの電流と時間を 2 秒以内に求めることができます。このデータ処理は SPring-8 制御フレームワークの DAQ システム MDAQ [10] で実現し、波形データ収集プロセス MDAQ_ARRAY として実装しました。MDAQ は、ADQ7 へのトリガ入力に応じて波形データ収集を実行し、求めたバンチ電流と時間を、データベースに転送・保存します。

また、SPring-8 の制御フレームワーク上では、ハードウェアを制御する機器制御レイヤーに Equipment Manager (EM) と呼ばれるソフトウェアが動作しています。高速 A/D 変換器の EM は外部からの命令に応じて高速 A/D 変換器の設定やステータス情報の取得を行います。CPU モジュールでは EM と MDAQ の 2 つのプロセスが動作して、それぞれがデバイスにアクセスする構成となっています。

4. 測定結果

4.1 デジタイザクロック周波数分布

本システムでは、等価時間サンプリングのクロック信号の精度が重要です。スペクトラムアナライザを用いて、高速デジタイザクロック生成器からのデジタイザクロック信号の周波数分布を測定しました。結果は、

設定値 2.034330 GHz

測定値 2.034331 ± 0.0000010 GHz

を得ました。設定値と測定値は、誤差 10 kHz の範囲で一致しています。

4.2 等価時間サンプリングによる波形データ

次に、NanoTerasu で測定した波形データを Fig. 3 に示します。等価時間サンプリングにより、約 40 GS/s で波形データを測定しています。約 2 ns のバンチ間隔に、きれいにバンチ信号が見えています。バンチ電流は、このバンチ信号のピークの高さから求めています。バンチ時間も、このピーク位置から求めています。

4.3 バンチ電流

測定されたバンチ電流のトレンドグラフを Fig. 4 に表します。バンチ電流の減少と Top-up 入射 (5500 秒付近) 後のバンチ電流の回復がわかります。

次に、バンチ電流と時間の関係を直線で fit したものと測定値の残差を Fig. 5 に示します。この図より、バンチ電流の分解能は、

$$0.0023 \text{ mA}/0.5 \text{ mA} \sim 0.5\%$$

と求められます。これは、10 % のバンチ電流の減少を、十分測定可能であることを示しています。

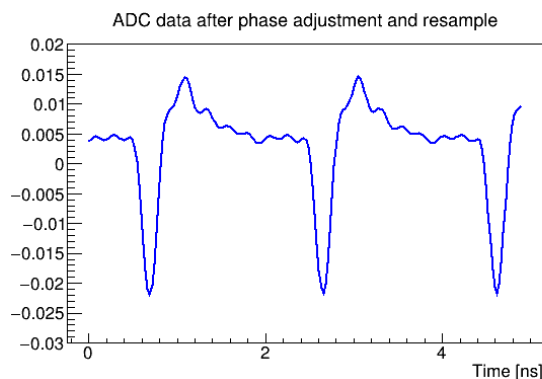


Figure 3: Waveform data measured at NanoTerasu with a sampling rate of 40 GS/s.

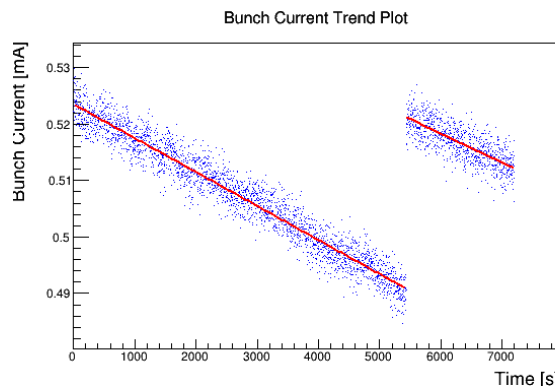


Figure 4: Bunch current vs. time. The red lines indicate linear fits to the data.

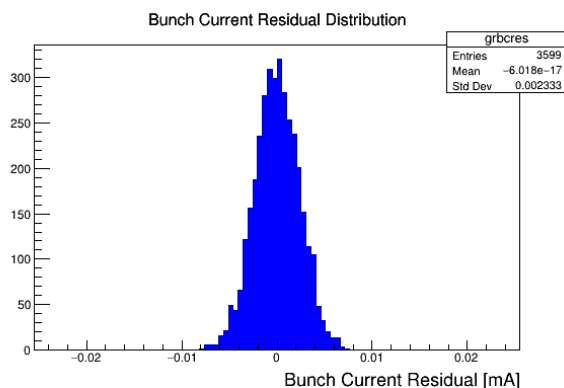


Figure 5: Residual distribution of bunch current.

4.4 バンチ時間

次に、既存のオシロスコープ (Tektronix DPO70404, 25 GS/s) で測定したバンチ時間と時間の分布を Fig. 6a に、本システムで測定したバンチ時間と時間の分布を Fig. 6b に示します。

それぞれの分解能は、

$$\sigma = 1.6 \text{ ps (オシロスコープ 25 GS/s)}$$

$$\sigma = 0.6 \text{ ps (ADQ7 による等価時間サンプリング)}$$

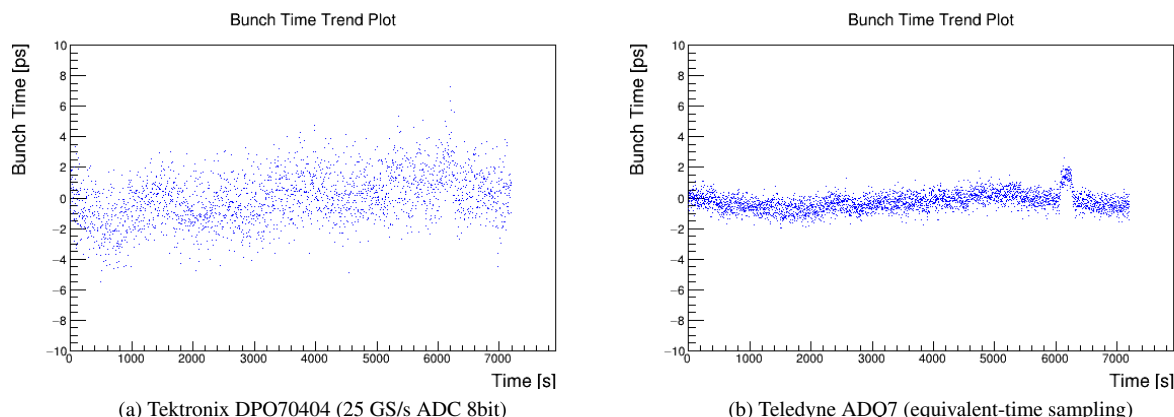


Figure 6: Bunch time vs. time distributions measured with oscilloscope (Tektronix DPO70404) and Teledyne ADQ7 (equivalent-time sampling).

と得られました。これは、本システムが既存の高速オシロスコープでの測定と同等以上の性能でバンチ時間を測定できていることを示します。

4.5 測定周期と長期安定性

本システムは、バンチ電流とバンチ時間の測定値を2秒ごとに更新し、データベースに転送・保存しています。

現在、本システムは SPring-8 で既存のオシロスコープでの測定と並列に動作させています。数ヶ月に渡る長期運用でも問題は発生しませんでした。

5. まとめ

我々は、SPring-8-II と NanoTerasu 用に、MTCA.4 ベースのバンチ電流測定システムを開発しました。等価時間サンプリングにより、40 GS/s の高速の波形サンプリングが実行でき、目標の性能、バンチ電流分解能が < 1%、測定周期が < 5 秒 を達成しました。SPring-8 の既存制御システムと親和性高い制御が可能であり、測定されたバンチ電流と時間はデータベースに保存されています。現在、本システムは SPring-8 で既存のバンチ電流測定システムと並行して動作しています。NanoTerasu では 2023 年秋から運用されています。

参考文献

- [1] H. Tanaka *et al.*, “Top-up Operation of SPring-8 Storage Ring with Low Emittance Optics”, in *Proc. EPAC’ 06*, Edinburgh, UK, Jun. 2006, paper THPLS034, pp. 3359–3361.
- [2] S. Obara *et al.*, arXiv:2407.08925.
- [3] N. Nishimori *et al.*, “NanoTerasu 加速器コミッションング”, *Proc. of PASJ2023* pp.6-11 TUOP02 (2023).
- [4] K. Ueshima *et al.*, “Status of Beam Commissioning at NanoTerasu”, *Proceedings of the IPAC 2024*, Nashville, TN, May. 19-24, 2024, TUPG40, pp. 1320-1323.
- [5] M. Yoshioka *et al.*, “SPring-8 8GeV 蓄積リングにおけるバンチ電流値の測定”, *The 14th Symposium on Accelerator Science and Technology*, Tsukuba, Japan, November 2003.
- [6] SPring-8-II Conceptual Design Report, Nov. 2014, <http://rsc.riken.jp/pdf/SPring-8-II.pdf>
- [7] PICMG MicroTCA open standard, <https://www.picmg.org/openstandards/microtca/>
- [8] 例えば、<https://www.techeyesonline.com/glossary/detail/%E7%AD%89%E4%BE%A1%E6%99%82%E9%96%93%E3%82%B5%E3%83%B3%E3%83%97%E3%83%AA%E3%83%B3%E3%82%B0/>
- [9] https://www.spdevices.com/en-us/Products_/Pages/ADQ7DC.aspx
- [10] T. Fukui *et al.*, “Status of the Control System for the SACLA/SPring-8 Accelerator Complex”, in *Proc. ICALEPCS’ 17*, Barcelona, Spain, Oct. 2017, pp. 1995–1999. doi:10.18429/JACoW-ICALEPCS2017-FRAPL03