

SuperKEKB に向けた電子・陽電子入射器 Linac 用ビーム位置モニターの読み出しシステム開発

DEVELOPMENT OF BEAM POSITION MONITOR READOUT SYSTEM FOR ELECTRON-POSITRON INJECTOR LINAC TOWARDS THE SUPERKEKB

一宮 亮^{#,A)}, 諏訪田 剛^{A)}, 佐藤 政則^{A)}, 宮原 房史^{A)}, 古川 和朗^{A)}

Ryo Ichimiya^{#,A)}, Tsuyoshi Suwada^{A)}, Masanori Satoh^{A)}, Fusashi Miyahara^{A)}, Kazuro Furukawa^{A)}

^{A)} KEK

Abstract

The SuperKEKB accelerator is now being upgraded from previous KEKB accelerator to bring the world highest luminosity ($L=8 \times 10^{35}/\text{cm}^2/\text{s}$). In order to archive this, electron/positron emittance has to be 20 mm mrad (5 nC) / 10 mm mrad (4 nC) respectively. To realize them, accelerating structures have to align within 0.1 mm. To perform Beam Based Alignment stably, Beam Position Monitors (BPMs) are required to have one magnitude better position resolution than required alignment accuracy. To attain $< 10 \mu\text{m}$ position resolution, we employed narrow band pass filter (BPF), dedicated readout system with 250 MSa/s 16 bit pipeline ADCs. As the Injector injects two bunches with 96 ns interval, we optimized BPF to go together position resolution and bunch separation. To correct position offset drift during operation, a calibration tone generator is implemented. To keep enough timing margin, position/charge calculation is performed on-board FPGA.

1. はじめに

KEK 電子・陽電子入射器(以下入射器と称す)では、世界最大ルミノシティを目指した SuperKEKB^[1]加速器に向けて高度化を進めている。 $L=8 \times 10^{35}/\text{cm}^2/\text{s}$ を達成するためには、電子及び陽電子エミッタンスをそれぞれ 20 mm mrad (5 nC)、10 mm mrad (4 nC)にする必要がある。これを実現するためには、ビーム光学設計上、0.1 mm 以内に加速管をアライメントしなければならない。安定して Beam Based Alignment を行うためには、ビーム位置モニター(Beam Position Monitor)には要求されるアライメント制度よりも一桁高い位置分解能が求められる。しかしながら、これまで入射器で使用してきたストリップライン型 BPM のオシロスコープ読み出し方式^[2-4]で得られる位置分解能は約 50 μm であり、要求を満足出来ない。位置分解能 10 μm 以下を達成するため、狭帯域バンドパスフィルター(BPF)方式を採用し、250 MSa/s・16bit パイプライン ADC を用いた専用読み出し回路を新規に設計・開発した。SuperKEKB では 96 ns 間隔で 2 バunch入射を行うため、位置分解能を保ちつつ 2 バunchを分離して読み出しが出来るよう、BPF の構成を最適化した。入射器はエネルギーの異なる 4 リングへ同時入射を行うため、高速切り換え出来る電子アッテネータを実装し十分なダイナミックレンジを確保した。また、運転中に様々な理由で計測位置にオフセットが生じるため、読み出し回路上に校正パルス生成器を設置した。これは、ビーム入射の間に BPM の電極に対して校正パルスを与えることにより、チャンネル間ゲイン比のオンライン校正を可能とするものである。オンライン校正を行う

十分な時間を確保するため、位置・電荷演算は読み出し回路上の FPGA で行い、高速化を図った。ここでは、これら新 BPM 読み出しシステム(写真を Figure 1 に示す)の開発の現状について報告する。

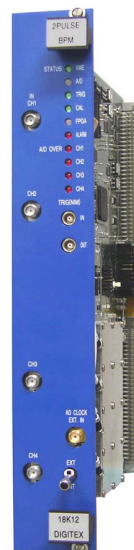


Figure 1: Photograph of BPM Readout System Board.

2. BPM 読み出しシステムの概要

SuperKEKB 運転において入射器で用いる 100 台の BPM は、大部分は従来設置された BPM(電極内径 $\phi=27$ mm, 電極長 $l=132.5$ mm)をそのまま用いるが、増強される陽電子ライン用には大口径 BPM(電極内径 $\phi=63$ mm, 電極長は同じ)^[4]への置き換えを行う。

今回の設計で採用した狭帯域 BPF による読み出し方式^[5]は、BPM 内にビームが通過した時に発生する

[#] ryo@post.kek.jp

バイポーラパルスの中に含まれる特定の周波数成分のみを抽出し、Figure 2 に示すような十分な積分区間を持つバースト信号を生成するものであり、電極長 l に関連して最大感度が得られるように BPF の中心周波数を 300 MHz とした。

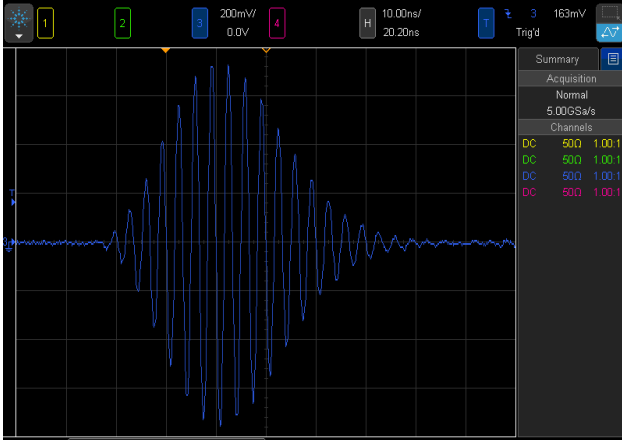


Figure 2: Waveform example of BPF output (200 mV/div, 10 ns/div). Burst length is about 60 ns.

BPF の通過域バンド幅やフィルタ特性には、次の条件が課せられる: (1)通過信号が $ADC(f_s=250\text{ MHz})$ の第三 Nyquist 窓(250 MHz ~ 375 MHz)内に収まる事、(2)通過後のバースト信号の振幅が 96 ns 後には十分に収束する事。前者の条件を満たすためには通過域バンド幅は短くする必要があるが、そうするとバースト長が長くなるため、両者の折り返しを付ける必要が出てくる。また、周波数カットオフ特性の良い Chebyshev 型はバースト信号の収束特性が悪いため、周波数カットオフ特性が緩やかなものの収束特性の良い Bessel 型を採用した。ヘリカルフィルタにてバンド幅 34 MHz の 2 次 Bessel 型と、28 MHz の 3 次 Bessel 型のカスケードにする事によりバースト長 60 ns, Nyquist 窓端で -45 dB の遮断特性を得た。

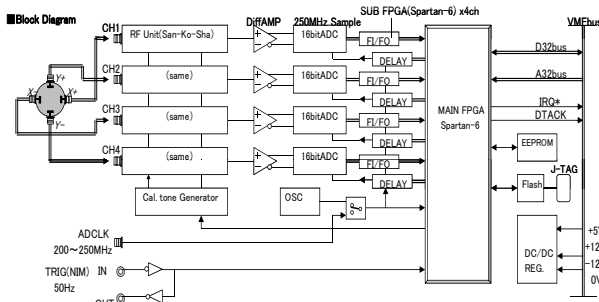


Figure 3: A block diagram of BPM readout system

全体のブロックダイアグラムを Figure 3 に示す。ADC は 250 MSa/s のパイプライン ADC(AD9467-250)を採用し、図 3 に示すように 4 台の ADC 毎に 10 ps ステップでサンプリングクロックの遅延を調整出来るようにした(MC10EP195)。

入射器は 20 ms 毎にエネルギーの異なる 4 リングに入射を行い、PF 向けには 0.1 nC、陽電子プライマリ向けには 10 nC と入力電荷のダイナミックレンジが大きいため、パルス毎に切り換えが出来る

31.5 dB の電子アッテネータを 2 段設置した。

運転中には様々な原因でビーム計測位置にオフセットが乗じる可能性がある。それを補償するため、校正パルス生成器を実装した。ビーム入射の間に BPM の電極に対して校正用パルスを打つものである。BPM 電極はストリップライン構造であり、隣接する電極との間には一定の電磁結合を持つため、それらには誘起電荷が生成される。対向する隣接 2 電極での生成電荷量比を求めることにより、オフセット補償値を算出する。

これらの校正信号の生成、校正データの生成、ビーム位置・電荷などの演算全ては読み出し基板上の FPGA(Xilinx Spartan-6⁶⁾)にて行う事により、十分に高速な処理時間(<1 ms)を達成した。

読み出しのタイミングダイアグラムを Figure 4 に示す。ビーム入射に先だってイベントシステム(MRF, EVR)よりビーム種別などの情報が渡され、BPM 読み出しシステムは入力アッテネータを適切な値にセットすると共に、トリガ信号を待つ。トリガ信号がイベントシステムより与えられると、ADC が動作し、1,024 サイクル(4,096 ns)×4 チャンネルのデータが FPGA に FIFO 経由で送られる。FPGA はビーム位置・電荷演算を行い、完了すると割り込み信号(IRQ)を VME バスに対して発行する。マスターのシングルボードコンピュータ上の EPICS IOC が割り込みを検知すると、BPM ボードに対して読み出しを行い、データベースレコードを更新する。

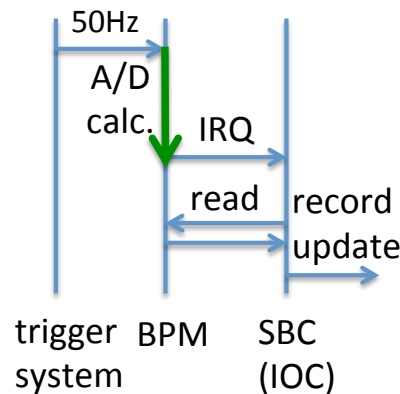


Figure 4: Timing Diagram of BPM Readout System diagram of BPM readout system

4. 性能評価試験

4.1 パルス試験

まず BPM の代わりに、1 kV モノサイクルパルサー(Kentech Instruments, Model SPS/V/L, パルス幅 1 ns, ユニポーラ(正))出力に 60 dB の減衰器を通し、4 分配(-6 dB)して、BPM 読み出し回路に入力する事により模擬パルス試験を行った (Figure 5 参照)。

このセットアップ 300 イベントのデータを取得し、データ解析をした結果、位置分解能は 1σ として、 $\delta x=11.9\ \mu\text{m}$, $\delta y=9.8\ \mu\text{m}$ (暫定値)が得られた。

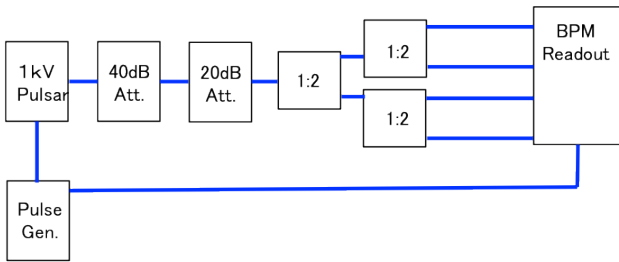


Figure 5: Pulsar Test setup of BPM Readout System

4.3 ビーム信号を用いた試験

Figure 6 のように実際の BPM からの信号を 2 分配する事により、ビーム信号を用いて BPM 読み出しシステムにビームジッターの無い原点を通る信号を模擬して入力した。また、X 入力に関しては、20 m の遅延線を用い、約 96 ns 離れたダブルパルスをエミュレートした。

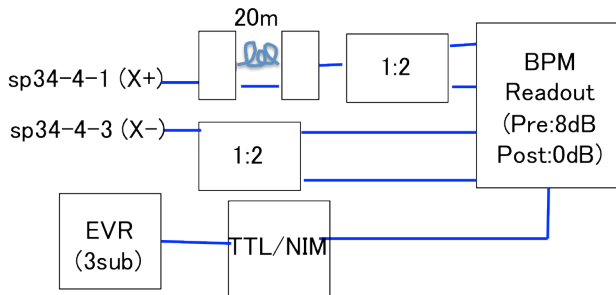


Figure 6: Beam Test setup of BPM Readout System

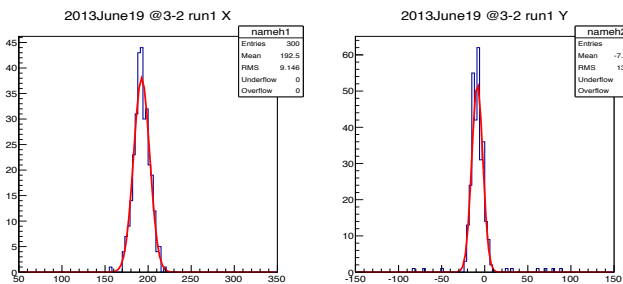


Figure 7: Position Measurement Example of Beam Test (0.3nC)

KEK 入射器の 3T 熱電子銃からの電荷を 1 バンチあたり 0.3 nC に調整して 300 イベントのデータを取得したところ、位置分解能は 1σ として $\delta x(1st)=11.9 \mu m$, $\delta x(2nd)=14.4 \mu m$, $\delta y=14.4 \mu m$ (暫定値)を得た。(分布を Figure 7 に示す)

さらに 1 バンチあたりの電荷を 0.45 nC に増加させ、100 イベントのデータを取得したところ、位置分解能は 1σ として $\delta x(1st)=5.7 \mu m$, $\delta x(2nd)=8.2 \mu m$, $\delta y=5.1 \mu m$ (暫定値)を得た。

今後、回路の最適化や測定パラメータの最適化を

進めることにより、より良い位置分解能を安定して得られるよう進めていく。

5. まとめと今後の計画

現在進められている SuperKEKB 加速器プロジェクトのための入射器高度化において、そのコミッショニング時においても、本 BPM 読み出しシステムが必要とされる。そのため、2014 年夏の入射器シャットダウン時の導入に向けて現在開発を進めている。現時点では、最初の試作 BPM 読み出し基板を用いた試験の結果、位置分解能 $10 \mu m$ 以下を達成出来る事を確認した。

今後は、ビーム位置や角度などのパルス毎の変動を抑えるため、連続する 3 台の BPM を用いた 3-BPM 試験^[4]を行い、実際のビーム計測条件にて十分な位置分解能が得られるかどうかの確認を行う予定である。また、この試作 BPM 読み出し基板にて得られた知見を元に、量産準備用 BPM 読み出し基板の設計・製作を行い、量産に向けた最終的な性能評価と仕様確定を行っていく。

6. 謝辞

本 BPM 読み出しシステムの開発にあたっては、SLAC の Steve Smith 氏、Andrew Young 氏、KEK の 飛山 真理氏には詳細なアドバイスと助言を頂きました。また、デジテックス研究所の山田 恭介氏と三光社の土屋 文武氏、青山 森繁氏には基板設計・製造を行って頂きました。深く感謝致します。

参考文献

- [1] M. Masuzawa, in Proceedings of the First International Particle Accelerator Conference (IPAC'10), Kyoto, 2010, pp. 4764-4768.
- [2] M. Satoh et al., "Development of a Fast BPM DAQ System Using Windows Oscilloscope-based EPICS IOC", Proceedings of the 4th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 32nd Linear Accelerator Meeting in Japan, Wako, Aug, 2007
- [3] K. Furukawa et al., "Beam Feedback Systems and BPM Read-Out System for the Two-Bunch Acceleration at the KEKB Linac", in Proceedings of the ICALEPCS2001, San Jose, November 2001, pp.266-268 (2001).
- [4] T. Suwada et al., "Stripline-type beam-positionmonitor system for single-bunch electron/positron beams", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 440, pp.307-319 (2000).
- [5] S. R. Smith et al., "LCLS Stripline BPM System Commissioning", in Proceedings of the 23rd Particle Accelerator Conference (PAC'09), Vancouver, Canada, 2009, pp4027-4029.
- [6] Spartan-6 FPGA Family, Xilinx Inc. <http://www.xilinx.com/products/silicon-devices/fpga/spartan-6/>