

Beam oscillation and long-term movement research in KEK-ATF using the digital BPM system "Libera"

Isao Ito ^{A)}, Norio Nakamura ^{A)}, Hiroshi Sakai ^{A)}, Takashi Naito ^{B)}

Nobuhiro Terunuma ^{B)}, Toshiya Muto ^{B)}, Hitoshi Hayano ^{B)}, Masao Kuriki ^{C)}

^{A)} Institute for Solid State Physics, the University of Tokyo, 5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, 277-8581

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK), 1-1 Oho, Tsukuba, 305-0801

^{C)} Hiroshima University, 1-3-1 Kagamiyama, Higashi-Hiroshima, 739-8530

Abstract

We are performing fast and high resolution beam position measurement with a digital BPM system "Libera" manufactured by Instrumentation Technologies for the purpose of establishing submicron level beam stability needed in cutting-edge accelerators. We performed a beam test at KEK-ATF damping ring to verify performance in ultra low emittance beam position measurement, comparing its results to ones of a bench tests that was performed to verify performance of Libera in stand-alone. Furthermore we researched both beam oscillation and long-term beam movement in KEK-ATF. The results of the performance tests and the measurement of beam oscillation and long-term beam movement are reported in this paper.

KEK-ATFにおけるデジタルBPMシステム"Libera"を用いたビーム変動探索

1. デジタル信号処理システム "Libera"

Liberaは高速ADCによりBPM信号をデジタル化し、FPGA(Field Programmable Gate Array)で信号処理を行うシステムである^[1]。図1にLiberaの外観とブロック図を示す。Liberaは波形処理のためのアナログボードと信号処理のためのデジタルボード(FPGAなど)、制御のためのLinuxコンピュータで構成されている。

アナログボードにはRF channelとクロスバースイッチが備わっている。RF channelはアナログフィルタとRFアンプ、可変減衰器によって構成されていて、BPM信号からビームのスペクトルで決まる特定の周波数成分を取り出して、ADCで検出するのに最適な信号利得に調節する。クロスバースイッチはアナログボードのフロントエンドとバックエンドに備えられていて、同時に測定したBPM4電極の高周波信号を独立した4つの回路に切り替えることでアナログボードの個体差を軽減する。

デジタルボードでは、高速ADCでデジタル値に変換されたデータをFPGA上のデジタルダウンコンバータ(DDC)でビームの周回周波数まで周波数を下げ、デジタルフィルタで平均化する。信号処理モードには、ADCのサンプリング周波数でデータを出力するADC Rateモード、ADC RateモードのデータをDDCでビームの周回周波数まで下げるTbT(Turn-by-Turn)モード、TbTモードのデータをデジタルフィルタで約10kHz間隔で平均化するFA(Fast Acquisition)モード、さらにFAモードのデータを約10Hz間隔で平均化するSA(Slow Acquisition)モードがある。

2007年に電子ビーム位置計測用のデジタル信号処理システム"Libera Electron"がアナログボードの改良により信号強度特性が大幅に改善され、"Libera

Brilliance"として新たにリリースされた。我々は"Libera Brilliance"を使用している。

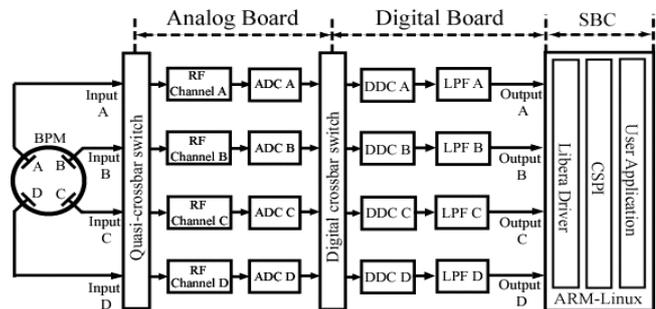


図1. Liberaの外観(上)とブロック図(下)

2. ベンチテスト

KEK-ATFはリニアコライダのための超低エミッタンスビームを生成する先端的試験加速器である^[2]。ダンプリングでビームサイズが絞られていて、X線放射光モニターの計測結果によるとビームサイズは水平方向で約50 μ m、垂直方向で約6 μ mである^[3]。このような極小ビームを実現するためには高精度のビーム位置計測が必要である。ダンプン

グリングではビーム位置計測に広帯域のマイクロ波デバイスで構成されたBPM信号処理回路が使用されていて、ボタン電極型BPM(電極径 12mm、感度係数6388 μm)の高周波信号から1GHzまでの成分をピックアップし、ダイオードでマイナスの信号のみを取り出して、Charged ADC(14bit 500pC)により総電荷をデジタル化して位置データを算出する^[4]。

KEK-ATFでLiberaのビームテストを行う前に、ダンピングリングを想定したベンチテストを行ってLibera単体の性能を評価した。ダンピングリングではビームが714MHz間隔のRFパケットを対して1つおきに分布しているため、LiberaのRF ChannelがRF周波数714MHzの1/2の357MHz(バンド幅10MHz)に最適化されている。さらにTbTモードの周回周波数は357MHz/165bunches=2.16MHzに設定されている。入力信号としてBPM信号の代わりに高周波発生器の357MHz正弦波信号を使用した。ベンチテストの結果を表1に示す。

	標準偏差 (-50dBm)	信号強度依存性 (-66 ~ -50dBm)
TbTモード (2.16MHz)	17 μm 17 μm	30 μm 50 μm
FAモード (10kHz)	1.1 μm 1.0 μm	3 μm 6 μm
SAモード (10Hz)	0.05 μm 0.2 μm	1 μm 5 μm

表1.ベンチ試験の結果。上段(赤字)がクロスバースイッチを使った場合、下段(青字)が使わない場合

3.ビームテスト

超低エミッタンスビームに対するLiberaの性能を評価するため、KEK-ATFダンピングリングのBPM信号処理回路の一部をLiberaに変えてビーム位置計測を行った。

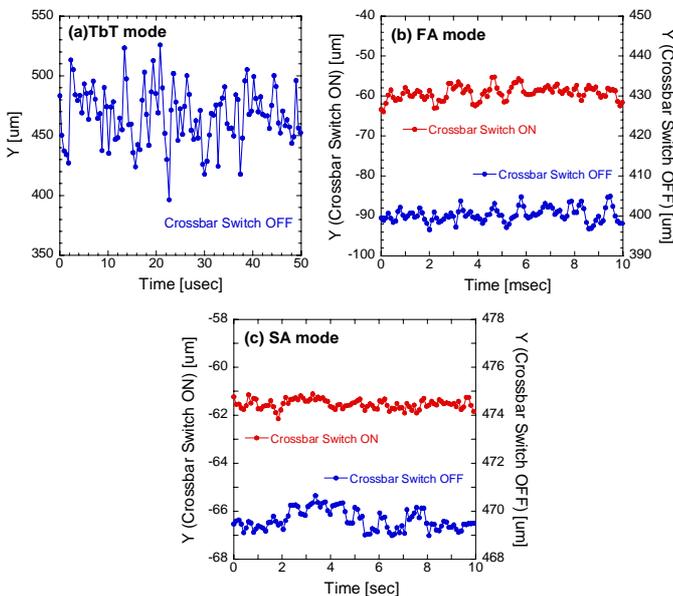


図2.Liberaで計測した垂直方向のビーム位置

図2は Liberaで計測した垂直方向のビーム位置である。それぞれ(a)TbTモード、(b)FAモード、(c)SAモードである。FAモードとSAモードはTbTモードのデータから各々100 μsec 、100msec分をデジタルフィルタで平均しているので、TbTモードより位置データのふらつきが小さい。さらにSAモードではクロスバースイッチを使うとデータのふらつきがさらに小さくなった。これはアナログ回路の長期ドリフトが抑制されたためである。

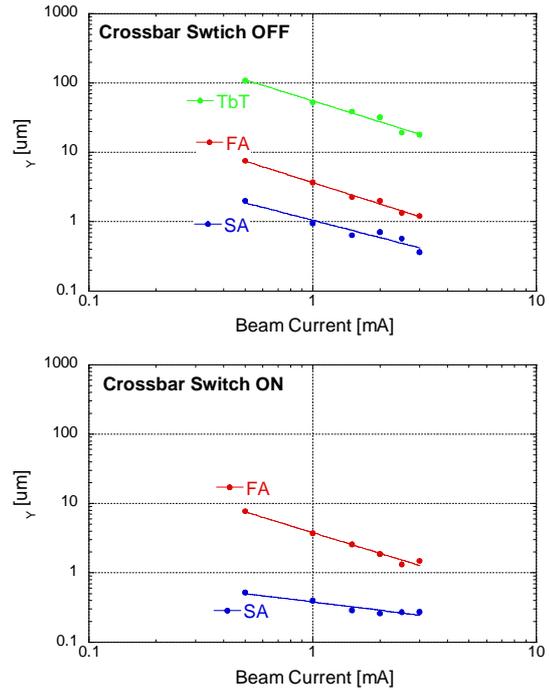


図3.100点のビーム位置データの標準偏差

図3では100点のビーム位置データの標準偏差をビーム電流の関数としてプロットした。標準偏差はビーム電流の増加に伴い向上し、クロスバースイッチを使わない場合、ビーム電流3mAに対してTbTモードでは18 μm 、FAモードでは1.3 μm 、SAモードでは0.4 μm であった。さらにクロスバースイッチを使った場合はSAモードで0.2 μm まで到達した。

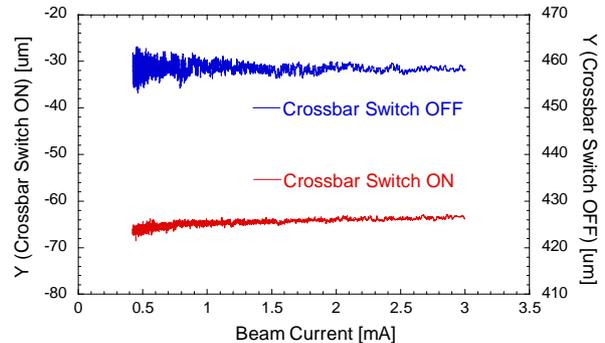


図4.Liberaのビーム電流依存性

図4.はLiberaのビーム電流依存性を示している。

ビーム電流が3mAから0.5mAまで減少する間にSAモードで計測を行った。3mA ~ 0.5mAの範囲でLiberaの電流依存性は5 μm 以下であった。

以上のビームテストの結果を表2にまとめた。3mAのビームの位置を計測した場合のBPM信号強度はベンチテストの-50dBm(0.7mV)の入力信号電圧に相当する。ビームテストの結果はベンチテストの結果と矛盾しない。ただしビームテストで得られたSAモードの標準偏差がベンチテストの結果より大きい、原因の1つとして実際のビームの位置変動や信号強度の変動による影響が考えられる。

	標準偏差 (3mA)	電流依存性 (0.5 ~ 3mA)
TbTモード (2.16MHz)	18 μm	—
FAモード (10kHz)	1.3 μm 1.3 μm	—
SAモード (10Hz)	0.2 μm 0.4 μm	1 μm 3 μm

表2.ビームテストの結果。上段(赤字)がクロスパススイッチを使った場合、下段(青字)が使わない場合

4. ビーム変動探索

ビームテストによってLiberaが超低エミッタンスビームに対しても高速で高分解能のビーム位置計測が可能であることが確かめられた。この性能を活かし超低エミッタンスビームの微小な変動の観測を行った。

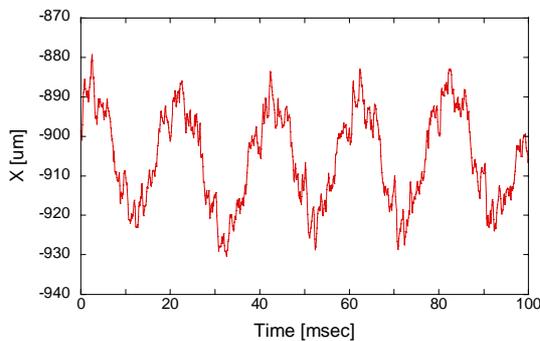


図5.FAモードで計測した水平方向のビーム位置

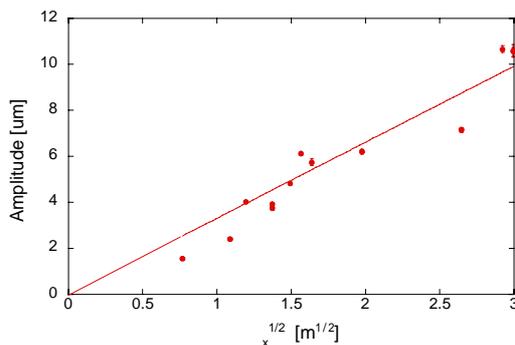


図6.50Hz振幅とベータatron関数 の関係

図5はFAモードで計測した水平方向のビーム位置である。50Hzで振動している様子が観測できる。図6ではダンピングリングの複数地点のBPMで50Hz振動を計測し、その振幅をベータatron関数 の関数としてプロットした。振幅がベータatron関数 に比例することから、50Hz振動は実際のビームの振動であると考えられる。

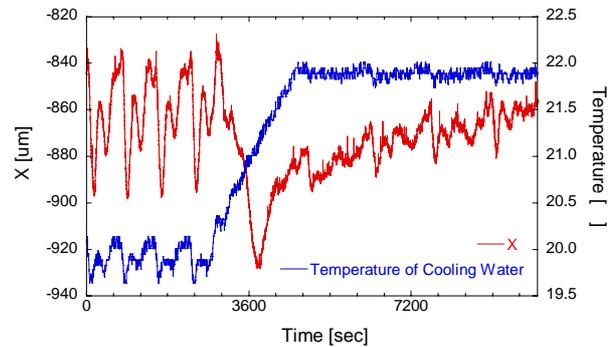


図7.Libera (SAモード)で計測したビーム位置(赤線)と真空チェンバーの冷却水温度(青線)

図7はダンピングリングの直線部のBPMにLiberaを設置してSAモード(10Hz)により計測したビーム位置と、それと同時に測定した真空チェンバーの冷却水温度である。冷却水温度は19.5 でフィードバック制御されている。計測を始めてから50分の間にビーム位置が10分周期で変動している様子がわかる。さらに真空チェンバーの冷却水の温度と比較すると、冷却水の温度変化とBPMの計測値の変動が同期していることがわかる。計測を始めてから50分後に冷却水の温度設定を22.5 に上げたところ、冷却水温度は30分かけて上昇した後安定になり、BPMの計測値も冷却水温度の変化に連動して変化した。直線部のBPMで計測しているため、放射光の熱によりBPMが動いたとは考えにくい。冷却水の温度変化がビームの長期的な変動を起こしていると考えられる。

5.まとめ

最先端の加速器で必要とされるサブミクロンレベルのビーム安定化技術の確立を目指して、超低エミッタンスビームを実現するKEK-ATFダンピングリングにおいてBPM用デジタル信号処理システム "Libera Brilliance"を用いた高速高精度ビーム位置計測を行った。超低エミッタンスビームの位置計測においても優れた分解能と電流依存性を示すことを確認できた。さらにこれまで詳細に計測できなかった長期的および高速な微小ビーム振動を確認できた。

最後にMTT梅田昌治氏のご協力に感謝します。

参考文献

- [1] <http://www.i-tech.si/>
- [2] F.Hinode, et al, KEK Internal 95-4, June 1995.
- [3] H.Sakai et al., Phys. Rev. STAB 10, 0401801 (2007)
- [4] H.Hayano, et al., in Proceedings of APAC 2004, Gyeongju, Korea, p.533.