

Performance test of a high-performance digital BPM system

Isao Ito¹, Norio Nakamura, Hiroyuki Takaki, Hiroshi Sakai, Kenji Shinoe,
Hirofumi Kudo, Takashi Shibuya, Atushi Ishii

Synchrotron Radiation Laboratory, Institute for Solid State Physics, the University of Tokyo
5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba, 277-8581

Abstract

We adopted "Libera" manufactured by Instrumentation Technologies as a signal-processing system in our development of a BPM system. Libera is a digital BPM system, including digital electronics as well as analog parts, and can perform not only a high-accuracy beam position measurement with a submicron level of the position resolution but also a high-speed beam position measurement such as turn-by-turn and single-pass monitoring. We will report results of Libera performance tests about position resolution, linearity, current dependence and frequency dependence.

高性能Digital BPMシステムの性能評価試験

1. はじめに



図1.Liberaの外観

分解能	0.3 μm (-20dBm)
電流依存性	1 μm (-30 ~ 0dBm)
周波数依存性	0.2 $\mu\text{m}/\text{kHz}$ (-20dBm)
温度依存性	0.2 $\mu\text{m}/$

表1.Liberaの目標仕様

図1はLiberaの外観で、表1は目標仕様である²。Liberaの位置分解能はサブミクロンレベルなので、低エミッタンスビームに必要な高精度の位置計測が可能であるとともに、円形加速器でのTurn-by-turn計測や、線形加速器でのsingle pass計測など非常に高速な計測も可能である。さらには、豊富な入出力ポートによってビーム位置をビーム入射と同期を取って計測したりすることもできる。加えて、高速の入出力インタフェースを付加することもできる構造になっているため、複数のLiberaとの通信や他の制御機器との通信を行うことができる。この機能を用いることで補正電磁石システムと連動させて高速のフィードバック制御を行うことも可能である。

図2はLiberaのハードウェア構成のブロック図である。LiberaはBPM4電極からピックアップされたRF信号を4つの独立した回路によって同時に測定する。

クロスバースイッチ(Quasi-crossbar switch)を働かせることでRF信号を4つのRF channel(A, B, C, D)に切り替えることができる。この切り替え操作によってアナログ回路の個体差が軽減される。RF信号はアナログ部のADC(Analogue to Digital Converter)でアナログ値からデジタル値に変換された後、デジタルクロスバースイッチで元のチャンネルに切り替えられ、デジタル部に送られる。アナログ値のRF信号を早い段階でプログラム可能なデジタル値に変換することで、高度で柔軟性のあるデータ処理を実現できる。

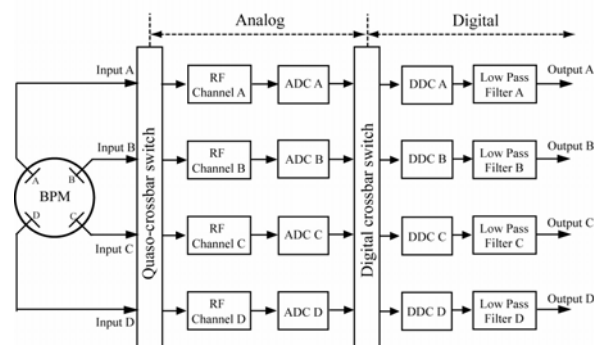


図2. ハードウェア構成のブロック図

2. セットアップ

Liberaには想定している加速器の回転周波数が記録されていて、今回の場合、回転周波数は500.1MHz/468bunches=1.0686MHzである。この性能評価試験では、回転周波数毎にデータを測定するTurn-by-turnモードによってすべてのデータ収集を行った。

図3はLiberaの性能試験のためのセットアップである。BPM電極の電気信号の変わりに、Signal

¹ E-mail: isao-maf@issp.u-tokyo.ac.jp

² <http://www.i-tech.si>

generator (HP8663A) のRF信号(P_s)をPower Dividerで4分割($P_A \sim P_D$)してLiberaに入力する。入力信号はLiberaで処理され、デジタル値 $V_A \sim V_D$ として出力される。以下ではこれらのデジタル値をチャンネル出力と呼ぶ。次式を使ってチャンネル出力から位置情報 X (Horizontal), Y (Vertical)を算出する。

$$X = K_x \frac{V_A - V_B - V_C + V_D}{V_A + V_B + V_C + V_D} \quad Y = K_y \frac{V_A + V_B - V_C - V_D}{V_A + V_B + V_C + V_D}$$

K_x, K_y は感度係数で、今回の試験ではどちらも10mmとした。Liberaでは各チャンネルごとに2つの可変減衰器があり、入力信号電力(電圧)に合わせてゲインを設定できる。今回は、直線性を維持できる最大入力信号電力が0dBm程度になるような設定を行った。また、測定中の室温変動を $\pm 1^\circ\text{C}$ に保った。

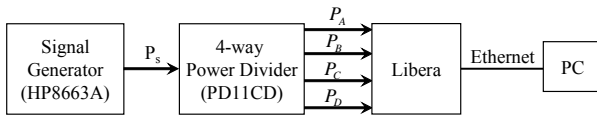


図3.セットアップ

Liberaには高速信号処理のためのFPGA (Field Programmable Gate Array) と制御用のコンピュータが組み込まれていて、操作は外部のコンピュータからLiberaの組込みコンピュータにアクセスして行う。Liberaの組込みコンピュータのOSはLinuxで、Liberaを操作するためライブラリが用意されている。ユーザーはこのライブラリを使って制御プログラムを作成できるが、Instrumentation Technologies社によってコマンド形式の制御プログラムが用意されている。この制御プログラムでクロスバースイッチの切り替えとTurn-by-turnモードのデータ収集を連続的に行うShell Scriptを作成し、組込みコンピュータのShellにLiberaを制御させた。

Input	A	B	C	D
Scheme	RF channel			
1	D	C	B	A
2	A	B	C	D
3	C	D	A	B
4	B	A	D	C

表2.スイッチングスキーム

以下ではクロスバースイッチの切り替えをスイッチングと呼ぶ。表2はスイッチングのスキームの一例である。今回の試験では、クロスバースイッチを使う場合、表2の4通りのスキーム (Scheme 1-4) に対して100ターンずつデータを収集し、各スキームのデータから1ターンずつ取り出して4ターン分の平均を取って100サンプルのデータを作成した。クロスバースイッチを使わない場合は、Scheme 2で100ターンずつの400ターンのデータを収集し、同様に4ターン分の平均を取り、100サンプルのデータを作成した。以下の性能評価試験の結果では、スイッチ

ング有無のそれぞれの場合で、上述のようにして作られた100サンプルの測定データの平均値と標準偏差を使用している。

3. 性能評価

3.1 位置分解能

図4はRF入力電圧に対する位置分解能で、各入力電圧に対する100サンプルの測定データ(位置)の標準偏差で示してある。RF信号周波数は500.1MHzである。RF入力電圧は、RF入力電力[dBm]を入力電圧[mV]に変換したものである。位置分解能はスイッチングの有無に依存せず、今回のようなデータ収集方法の場合ではRF入力電圧が100mV(-10dBm)以下でサブミクロンレベルに到達する。

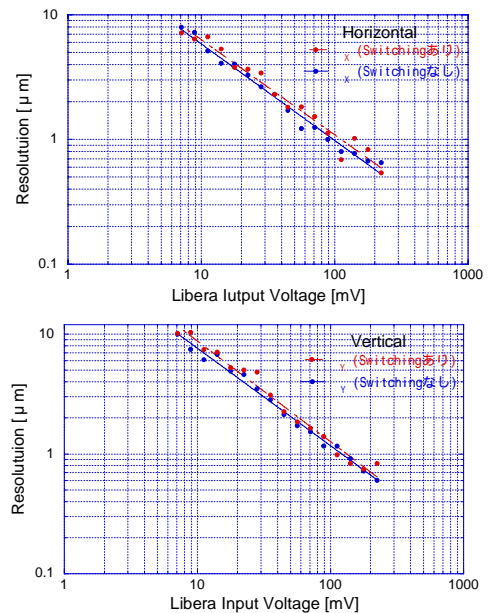


図4.位置分解能

3.2 電流依存性

図5はチャンネル出力の電流(入力信号強度)依存性である。RF信号周波数は500.1MHzである。-30dBm ~ 0dBmという広い範囲でデータには直線性が存在していて、さらにスイッチングを行うことでチャンネル出力の電流依存性の個体差が小さくなっていることがわかる。

図6は位置の電流依存性である。RF信号電力が-30 ~ 0dBmの範囲で、最大値と最小値の差 X, Y はスイッチングなしでは $90 \mu\text{m}$ 程度であるが、スイッチングありでは $10 \mu\text{m}$ 程度まで低減した。RF信号電力が-20 ~ 0dBmに対しては、スイッチングなしでは $X < 12 \mu\text{m}, Y < 23 \mu\text{m}$ であったのに対し、スイッチングありでは $X < 2 \mu\text{m}, Y < 3 \mu\text{m}$ まで低減した。これは図5で示された通り、スイッチングによってチャンネル出力の個体差が低減したことを反映している。

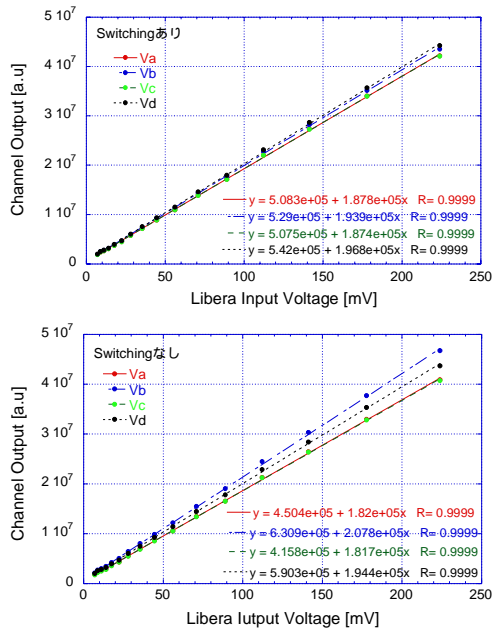


図5.チャンネル出力の電流依存性

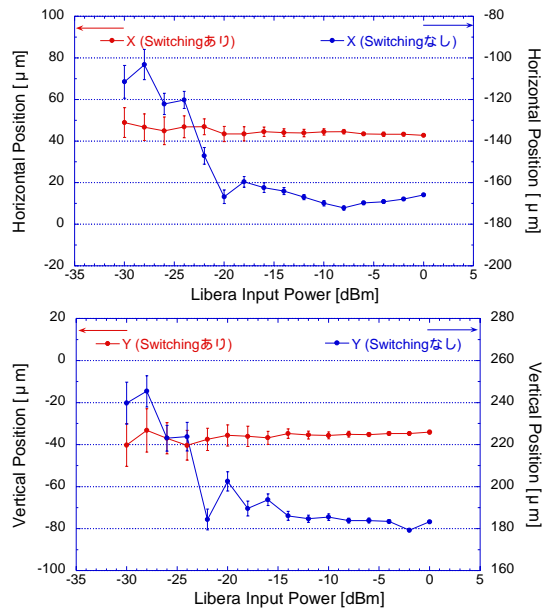


図6.位置の電流依存性

3.3 周波数依存性

Liberaの周波数依存性を評価するために電力が-10dBmのRF入力信号の周波数を500.05MHzから500.15MHzまで10kHzずつを上げながら測定を行った。図7はチャンネル出力の周波数依存性である。クロスバースイッチを使うことでRF信号周波数に対するチャンネル出力の個体差が小さくなっている。図8は位置の周波数依存性である。周波数依存性はスイッチングを行わない場合にX,Yともに最大0.5 μm/kHzだったのが、スイッチングを行うとXで0.004 μm/kHz、Yで0.00004 μm/kHzまで低減した。電流依存性の場合と同様に、スイッチングによるチャンネル出力の個体差の低減が位置の周波数依存性の低

減に反映されている。

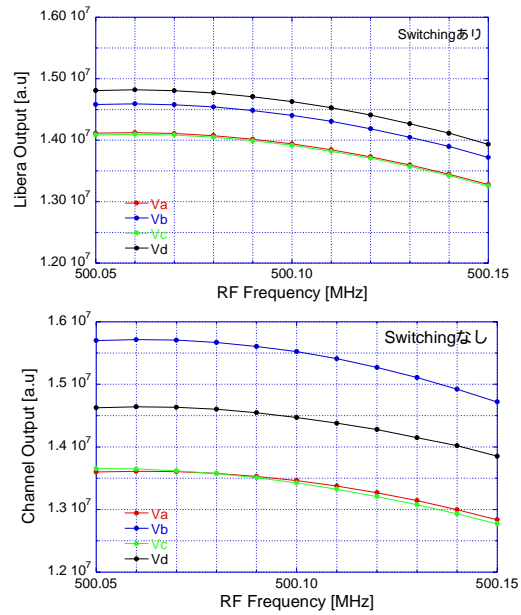


図7.チャンネル出力の周波数依存性

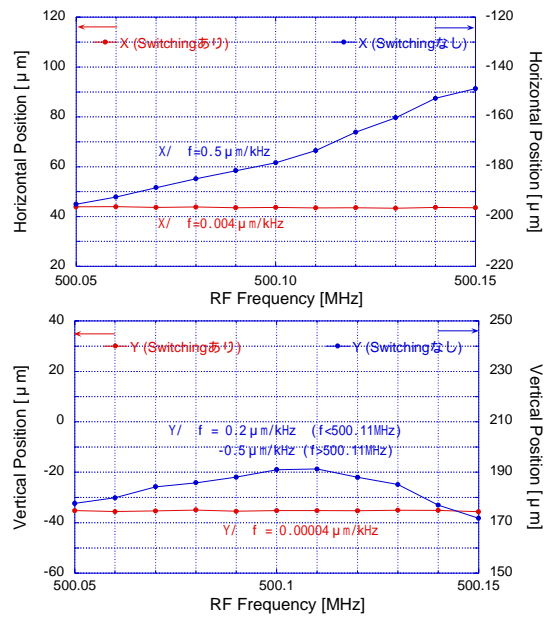


図8.位置の周波数依存性

4.まとめ

Digital BPM systemであるLiberaの性能評価試験を行った結果、優れた位置分解能と直線性を持つことが確認できた。また、クロスバースイッチを使うことで4チャンネルの個体差による電流依存性、周波数依存性を大幅に抑えられることも確認できた。今後は、温度依存性やTurn-by-turn以外のモードでの測定などベンチテストを一通り行うとともに、実際に加速器を用いたビーム試験も行う予定である。

本研究開発において、Liberaの代理店の1つでありますエムティティ(株)の梅田氏には、多大なご協力をいただきました。ここに感謝いたします。