

SPring-8線型加速器のBPMシステム

柳田謙一¹、安積隆夫、小林利明、鈴木伸介、高嶋武雄、田中良太郎、谷内努、
出羽英紀、富澤宏光、花木博文、福井達、増田剛正、水野明彦
(財)高輝度光科学研究センター
〒679-5198兵庫県佐用郡三日月町光都1丁目1-1

概要

SPring-8線型加速器のBPMシステムはBPM、信号処理回路、データ収集系及びそれらを繋ぐケーブル等から成る。BPMはストリップライン型で、出力は2856MHzのRF信号が主な成分である。信号処理回路はLOG検波増幅器ICを用いたもので、SバンドのRF信号を検出する。データ収集系の入力装置はVME（コンピュータ）である。VMEへのデータ転送は光ファイバで行う。

1. はじめに

SPring-8線型加速器ではシングルショットでデータ取得可能なBPMシステムの整備を継続して行っている。それらは最終的に試作機を含み、44式が据え付けられる予定である。1999年度には28台の非分散部（ディスパージョンの無い部分）BPM（ $\phi 32\text{mm}$ ）が製造され、較正試験を行われた後、線型加速器本体に設置された。信号処理回路は2000年度に30台が製造され現在試験が行われている。データ収集系に於いては、現在ハードウェアの試作機を開発中である。

BPMシステム及び信号処理回路に就いては、過去に会議・ワークショップ等で発表されており^{[1][2][3]}、過去のプロシーディング等を参考にされたい。本研究では、BPMシステムに就いての設計思想を述べ、加工・伝送の方式と云う観点から見たアナログ信号及びデジタルデータに就いての仕様を述べる。

2. BPMシステムの設計思想

2.1 検出周波数

BPMによるビーム信号検出方法は概ね、1バンチ毎の信号を出力する方式と、バンチの集合体、即ち積分信号であるマクロパルス波形を出力する方式がある。一般的には前者の検出器は周波数が高く、小型であり、後者の周波数が低く、大型である。SPring-8線型加速器ではマクロパルス幅は最大 $1\mu\text{s}$ であり、マクロパルス波形を検出するにはBPMのサイズが大きくなり過ぎる。そこでBPMは1バンチ毎の信号を出力する方式とし、BPMを小型化させることとした。検出周波数はバンチ間隔（時間）の逆数である2856MHzである。

2.2 出力変化と位置変化

信号処理回路には、4チャンネルの信号入力・データ出力等があり、入力パワー、マクロパルス幅及び温度の変化に因って、位置は変化しなくても、各チャンネルの出力値が変化する。理想的な信号処理回路の場合、出力値の変化は各チャンネル同値で、位置変化は観測されない。しかし、実際にはチャンネル毎の特性によっては位置変化が観測される。

本システムでは、特性の個体差が大きな回路エレメントをユニット化し、特性の測定を行い、入力パワー、マクロパルス幅及び温度の変化に因る観測位置変化が最小になるように組み替えを行う。

2.3 サンプルングレート

本システムでは最大1kHzのサンプルングレートを目標に設計された。その背景には、シングルパスFEL等に使用される将来の線型加速器では、1kpps程度でビーム運転されると予想される為である。ちなみに、サンプルングレートは信号処理回路ピークホールド回路に於いて、コンデンサの放電に要する時間が最大 $500\mu\text{s}$ 必要なことから1~2kHzが上限となる。

2.4 アナログ信号出力

線型加速器の最大平均電流は $12\mu\text{A}$ であり、不必要な機器の放射化を避けるために、磁場の変動等によりビーム位置が中心より大きく外れた場合、ビーム運転を自動停止させる予定である。このような安全管理を目的とする場合は位置演算をCPUに頼らずハードウェアで行う必要がある。信号処理回路の各チャンネルにはアナログ信号出力（DAC出力）があり、この4つの出力を演算モジュールへ入力し、X位置、Y位置、信号和（ビーム電流）及びエラーのアナログ信号として出力させる。位置演算はLOG-Ratio法^[4]に基づいて行う。

2.5 計測範囲と分解能

本システムはビーム位置を測定し、位置及びエネルギーのフィードバック制御を行う予定である。位置の計測範囲に関しては、非分散部で $\pm 5\text{mm}$ 程度、分散部（ディスパージョンのある部分）で $\pm 20\text{mm}$ から $\pm 30\text{mm}$ 必要である。これらの計測範囲内でビーム位置変化に対する計測値がほぼリニアである必要

¹ E-mail: ken@spring8.or.jp

がある。

上記のような条件及びコンパクトに設計する必要から、本システムでは静電型ストリップラインモニタを採用している。分解能は 1σ が電極半径の0.1%～0.01%（小信号レベル～大信号レベル）を目標とし、1%～0.1%を仕様としたが、実際には仕様を若干クリアした程度である。 $\phi 32\text{mm}$ （電極半径16mm）のBPMを使用した場合、 $1\sigma=160\mu\text{m}\sim 16\mu\text{m}$ の分解能が得られる。

2.6 シンプルな回路構成

本システムでは、BPMから検波回路まで、増幅器及び同軸切替器等を含まない。さらに、検波時にレファレンス信号を使用せず、AM/PM法やヘテロダイン検波法で用いられているDBMも使用しないなどシンプルな回路構成となっている。

シンプルにすることの最大のメリットは信頼性を高めることであるが、結果的にコストを抑えることにもなる。本システムではシンプルさを追求した結果、温度変動、再現性に対して安定なシステムとなった。さらに、回路エレメントが少ないため、ノイズの発生源が少なくなると同時に、ピークホールド等のアナログ部分を一枚の基板に配することで、極力ノイズを抑える設計を可能とした。

3. BPMシステムの仕様

3.1 BPM

BPMはストリップライン長27mmの静電型ストリップラインモニタで、基本構造はKEK-ATFで開発されたものと同じである。ストリップラインの上流側はピックアップが取り付けられ、下流側は 0Ω で終端された構造となっている。ストリップライン部分は 50Ω の伝送路となっている。非分散部BPMは断面が $\phi 32\text{mm}$ の円形であり全数が製作・設置済みである。分散部BPMは現在設計中であるが、断面はレーストラックで、ダクトの上下に電極が配置されるものと考えている。

信号出力は、線型加速器電子ビームの1バンチによって、両極性、即ち正負1対のパルスのみが発生する。正負それぞれのパルス間隔は $\sim 175\text{ps}$ である。即ち、出力の周波数成分は2856MHz近傍と奇数次高調波及びその振幅変調成分のみとなる。このシンプルな周波数成分構成のため、2856MHz成分のみを抽出し、検波すれば、S/N比の良い振幅変調成分が得られる。

非分散部BPMに就いて、1バンチ当たりの出力電圧は $\sim 80\text{V}_{\text{p-p}}/\text{nC}$ である。これを単位平均尖頭電流当たりの出力電圧に変換すると $\sim 10\text{V/A}$ となる。BPM

から信号処理回路間のケーブルは、温度位相変動が大きい代わりに高周波減衰率の小さいS10172B-10（SUHNER）を用いている。ケーブルのパワー減衰率は30m長で-6dB程度である。

BPMの較正は3GHzのパルスジェネレータを用いてBPMに模擬電流を流し、各電極からの信号をオシロスコープで観測して行った。

3.2 信号処理回路

信号処理回路は2つのモジュールから成っていて、BPF（バンドパスフィルタ）モジュール及び検波モジュールであり、それぞれ独立した4チャンネルの回路がある。重要な回路エレメントはBPFユニット及び検波ユニットである。ユニット化されているのは、製作・試験後に特性の揃ったものを選別し、組み合わせて使用する為である。

BPFユニットは真鍮で出来ており、中心周波数は $2856\pm 0.01\text{MHz}$ （ $33\pm 0.1^\circ\text{C}$ ）で、-0.01dB及び-6dBパワーバンド幅はそれぞれ0.9MHz及び13.5MHzである。中心周波数の温度変化率は $0.05\text{MHz}/^\circ\text{C}$ であるので、環境温度が $\pm 9^\circ\text{C}$ 変化したとしても、パワー変化は-0.01dB程度となる。ちなみに、ある1つのチャンネルが0.01dBパワー変化すると、観測位置としては $3\mu\text{m}$ 程度の変化したように観測される。

BPFユニットに2856MHzのパルスRF信号が入力された場合、入力電圧を V_{IN} 、入力マクロパルス幅を W_{IN} 及び-6dBパワーバンド幅を Δf とすると、出力電圧 V_{OUT} 及び出力マクロパルス幅 W_{OUT} は概ね；

$$W_{\text{OUT}} = \sqrt{(W_{\text{IN}})^2 + \left(\frac{1.18}{\Delta f}\right)^2}$$

$$V_{\text{OUT}} = V_{\text{IN}} \frac{W_{\text{IN}}}{W_{\text{OUT}}}$$

となる。図1にこれらの関係を図示する。仮に1nC（ $80\text{V}_{\text{p-p}}$ ）のシングルバンチ（2856MHzの1波形）入力あった場合、 W_{IN} は0.35nsであるから、出力電圧0.32V_{p-p}（パワーで-5.9dBm）、マクロパルス幅87nsのパルスRF信号が得られる。この-5.9dBmと云うパワーは検波ユニット入力の最大入力に相当する。

BPFユニットへの入力マクロパルス幅が短い（シングルバンチ等）場合、-6dBパワーバンド幅に比例して出力電圧は大きくなる。これは1組4台のBPFユニットの-6dBパワーバンド幅にばらつきがある場合、出力電圧にばらつきを生じてしまうことを意味する。本システムに於いては、時間をかけてBPFユニットのチューニングを行ったが全体では2%程度のばらつきとなった。仮に1組4台のBPFの内、1台が2%程度-6dBパワーバンド幅が大きい場合、観測位置の変化は図2のように最大で $60\mu\text{m}$ 程度となり、かなり大

きくなる。但し、-6dBパワーバンド幅が揃った4台を選別すれば、1組平均0.2%程度のばらつきとなり、位置変化は $7\mu\text{m}$ （最小 $0.8\mu\text{m}$ ～最大 $31\mu\text{m}$ ）程度となる。

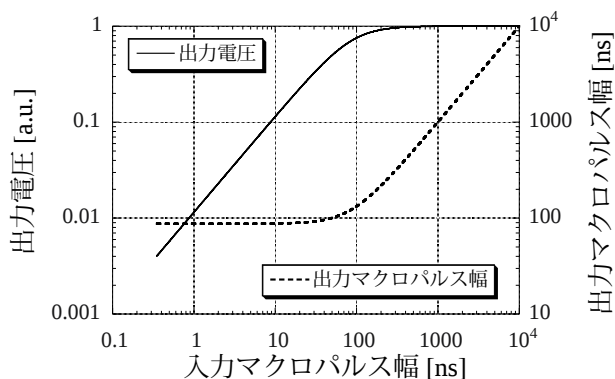


図1：BPFユニットの入力マクロパルス幅に対する出力電圧及び出力マクロパルス幅

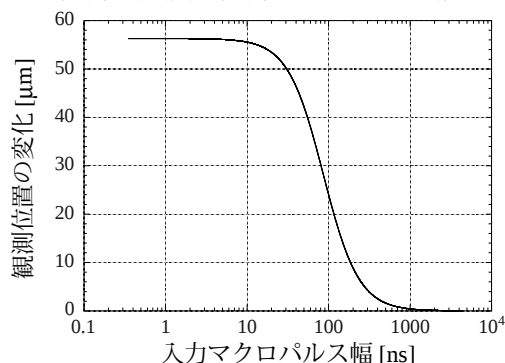


図2：1組4台のBPFの内、1台が2%程度-6dBパワーバンド幅が大きい場合の入力マクロパルス幅に対する観測位置の変化

検波ユニットにはLOG検波増幅器IC（AD8313、ANALOG DEVICES）を使用し、Sバンド高周波信号を検波する。AD8313は9個のディテクタセル（ダイオード）を含み、半波整流した後の信号を出力する。9個のセルを用いているため、入出力特性及び温度特性に就いては個体差が大きい。現在、全台数の入出力特性及び温度特性を測定中であり、測定後はBPFユニットと同様に観測位置変化が最小となる組み合わせを選別して使用する。

4. データ収集系

データ収集系の主要機器は光伝送リモートボード、光伝送VMEボード、共有メモリ及び共有メモリ読み出しVMEから成る。

BPM信号処理回路は16ビットデータ+1ビットのインヒビットデータ（ストローブ信号）を光伝送リモートボードへ送る。インヒビットデータの時間幅は $600\mu\text{s}$ で、インヒビットデータが0から1へ変化して $500\mu\text{s}$ 後の時点で16ビットデータを更新する。

光伝送リモートボードは信号処理回路からの16ビットデータ+インヒビットデータ（4チャンネル分）を受け、シリアル光データに変換した後、光伝送VMEボードへ光ファイバを介して転送する。転送の周期は $20\mu\text{s}$ である。

光伝送VMEボードは $20\mu\text{s}$ 毎に光伝送リモートボードから送られるインヒビットデータが1から0へ変化した時に、16ビットデータを共有メモリに書き込む。

共有メモリ読み出しVMEは共有メモリから全BPM電圧データを一括して読み出し、上位のワークステーションへ転送する。現在のところ、共有メモリの更新周期は5ms（設計値）であるが、将来的には1msは可能だと思われる。

5. 現状総括

BPMシステムの現状で、補正を全く行わない場合、入力のパワー、マクロパルス幅等による観測位置変化は最大で $30\sim 40\mu\text{m}$ となるが、変化の特性が既知であるので、補正して数 μm に抑えることは可能と思われる。一方、温度変化による観測位置変化の補正は困難と思われるが、位置変化が $10\mu\text{m}$ ^[1]程度ならば、 1σ 位置分解能 $16\mu\text{m}$ と同程度なので問題無いと思われる。

データ収集系は60pps運転時に全BPM電圧データをデータベースへ取得可能なシステムとなる予定で、現状では十分な性能である。

謝辞

BPMの構造・設計や電気特性等の情報に関してKEKの早野氏に、信号処理回路にLOG検波増幅器ICを使用する提案をして下さったBELGOZ社のBelgoz氏及びUnser氏に感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 柳田謙一、他、"対数増幅検波回路を用いたBPM信号処理回路"、第25回リニアック技術研究会プロシーディング、姫路、2000年7月、pp.114-116.
- [2] K. Yanagida, et al., "A BPM SYSTEM FOR THE SPring-8 LINAC", Proc. of the 20th Int. Linac Conf., Monterey USA, Aug. 2000, pp. 190-192.
- [3] K. Yanagida, et al., "SIGNAL PROCESSOR FOR SPring-8 LINAC BPM", Proc. of the 5th European Workshop on Diagnostics and Beam Instr., Grenoble France, May 2001.
- [4] F. D. Wells et al., "Log-Ratio Circuit for Beam Position Monitoring", AIP Conf. Proc. **229**, p. 308 (1991)