

DEVELOPMENT OF FAST GATE MODULE AND ITS APPLICATION

Takao Ieiri[#], Hitoshi Fukuma, and Makoto Tobiyama,
 High Energy Accelerator Research Organization (KEK)
 1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki, 305-0801

Abstract

In present KEKB, the gated beam-position monitor (GBPM) and the gated tune monitor (GTM) are useful for studying the beam-beam effects and various beam dynamics. The present gate module, however, cannot be used for a bunch spacing of less than 4 ns by the limit of a switching time. Thus a fast switching gate module has been developed, which can be used for bunch spacing of less than 2 ns. The specifications of the fast gate module are reported. In upgraded KEKB, it is planned that the optics parameters will be measured using turn-by-turn BPMs installed in the whole rings during the collision. In order to realize the project, a beam test was carried out, where the betatron oscillation was excited for a specific bunch and then damping oscillation was detected by the GBPM.

高速ゲートモジュールの開発とその応用

1. はじめに

KEKB加速器[1]は、周期10 μ sのリングで、1500個以上の電子と陽電子バンチを衝突させている。バンチは約6ns間隔で連なり、1つの大きなバンチトレインを形成している。各バンチはその環境との相互作用によってウェーク場を作り、ウェーク場は後続のバンチに影響を与える。したがって、多数バンチを貯蔵する加速器において、バンチの強度は同じであっても、バンチ毎のビームパラメータは必ずしも同じにはならない。ゲート回路を用いたバンチ毎測定はビームダイナミクスの研究に役立つ [2, 3]。

ゲート測定の信頼性はゲートモジュールの性能に強く依存している。現状のスイッチは、4ns以下のバンチ間隔で信号の分離に問題がある。KEKBの改造計画によれば、バンチ間隔は4ns以下になる予定である。そこで、すべてのバケットにバンチが蓄積されても任意のバンチをクリアに選択できるゲートモジュールが必要になるであろう。

2. アナログスイッチ

電子・陽電子バンチは静電型電極（ボタン電極）で検出される。一般にボタン電極はHigh-Pass Filter特性を示し、伝送ケーブルによる信号損失や電極容量に依存するが、KEKBのボタン電極の検出特性は2~4GHzが最も感度の高い周波数帯域になっている。ビームパルスは最大1V程度になるので、スイッチの最大許容パワーは+20dBm(100mW)以上であることが望ましい。スイッチのオン・オフ/アイソレーション (Isolation) は、60dB以上必要になる。しかし、時間領域での過度的アイソレーションは静的特性より悪くなる。バンチ間隔が最少2nsになると、スイッチの遷移時間は1ns以下でなければならない。このように比較的高パワーと高速スイッチを兼ね備えたスイッチが必要となる。最近のレーダー

[#] Email: takao.ieiri@kek.jp

や通信分野で、HEMT（高電子移動度トランジスタ）を応用した高速で広帯域のFETスイッチが市販されるようになった。表1にスイッチの必要とされる仕様と市販スイッチの性能を比較した。スイッチ1個ではアイソレーションが不十分なので、挿入損失は倍になるが、2段のスイッチにした。

表1：スイッチの性能比較

	Required Specifications	Agilent HMMC-2027	Avago HMMC-2008
Input Power (dBm)	> +20	+27	+14
Bandwidth (GHz)	DC - 10.0	DC - 26.5	DC - 50.0
Switching Time (ns)	0.5	< 1	0.1
Isolation (dB @2GHz)	> 60	55	46
Insertion Loss (dB @2GHz)	< 5.0	1.4	1.6
Control	0/-0.8 V	0/-10 V	0/-3 V

表1に示された2種類のチップをそれぞれ2個直列接続し、図1に示すようにモジュール化した。RF入出力の他にスイッチのコントロールに高速パルスを扱うのでSMAコネクタが使われている。スイッチをオン/オフさせるドライブパルスは、は0Vと-10V又は0Vと-3Vの電圧で制御される。図2にスイッチのオン/オフ周波数特性を示す。挿入損失は、両スイッチともおよそ3dB/2GHzで、これは表1に示されたスイッチのカタログ性能からの推定値と同じであった。しかし、スイッチのアイソレーション特性は、-70dB/2GHzで、これは、仕様を満足しているものの、表1から推定される値よりも悪い。この性能低下の原因は、2つのチップの間での容量的結合が関係していると考えられる。

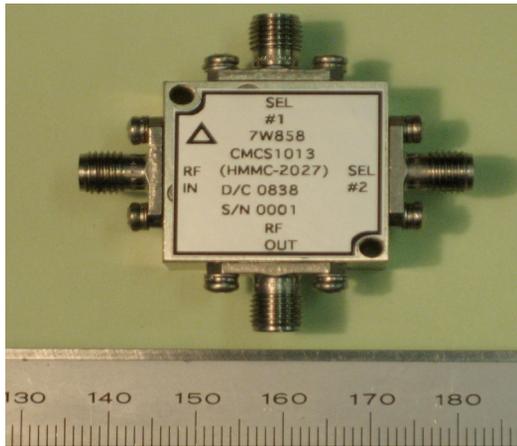


図1：HMMC-2027を2個シリーズに接続したSPST (Single Port Single Transfer)スイッチ。RF入出力ポートと2つの制御入力(SE1,SEL2)がある。

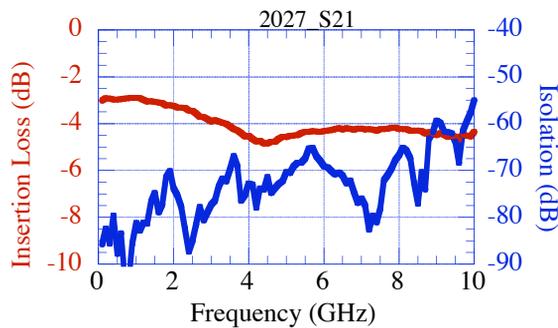


図2：SPSTスイッチ(Agilent, HMMC-2027)のオン/オフ周波数特性(S21)。赤がスイッチオンで挿入損失、青がオフの場合。

3. ゲートモジュール

3.1 ベンチテスト

高速のスイッチを実現するにはそのコントロール電圧も高速で切り替えなければならない。パルスの遷移時間が1ns以下で10Vのパルスを作るのは容易でない。幸いにも、高速パルス発生器が市販されているので、それを利用した。(Avtech AVP-AV-HV3)パルスの遷移時間は200psで最大40V出力する。パルス発生器の繰り返し周波数が1MHz以下に制限されるが、KEKBでの使用には問題ない。スイッチをドライブするために、0Vと-10Vの互いにコンプリメントな2つのゲートパルスを作った。

ゲート回路のパルス特性を見るために、2.5GHzのRF連続波を入力し、1.6ns幅のゲートパルスで入力信号を制御する。図3のように、RF出力信号の遷移時間は、およそ500psを実現した。ゲートパルスを切った後にノイズがおよそ10ns続いた。このノイズの継続時間は出力ケーブル長に依存するので、出力インピーダンスの不整合に関する反射の影響であろうと推測する(VSWR=1.5)。図4はゲートされた信号の振幅を入力信号レベルに対してプロットしたダイナミック特性を示す。入力信号レベルが+20dBm以

上になると出力が飽和傾向を示す。その補正が必要になるかもしれない。

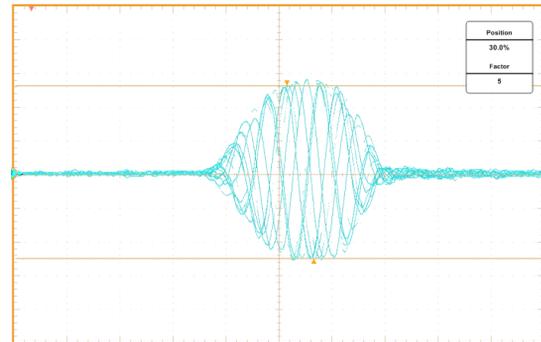


図3：スイッチ(Agilent, HMMC-2027)を用いたゲートモジュール出力, 500ps/div, 1V/div. 2.5GHzRF信号入力。ゲートパルスとRF入力とは同期していない。

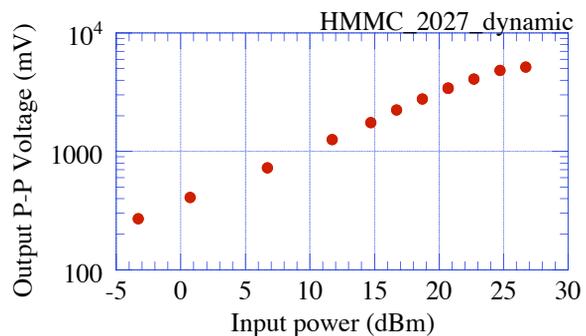


図4：入力連続RF信号レベルに対するゲートされた信号のピーク-ピーク電圧。

3.2 ビームテスト

KEKB電子リングで、10個のバンチを2ns間隔で入射した。そのミニバンチトレイン信号をボタン電極で検出し、ゲートモジュールに入力した。ゲート回路のタイミングを調整した後、図5に示すように、1つのバンチをクリアに取り出すことができた。

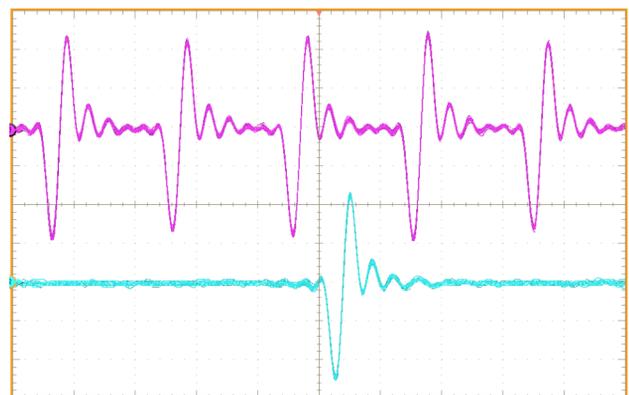


図5：(上) ボタン電極でピックアップされた電子のバンチトレインの一部, 300mV/div. (下) ゲートされたバンチ信号, 200mV/div. バンチ電流は0.5mA, 横軸の全幅10ns.

4. 応用

ビーム位置モニターはビーム軌道を安定に保持させるだけでなく、オプティクス診断に欠くことができない重要な装置である。オプティクス測定は、ビーム軌道の変更やバンチを強制振動させて行われる。しかし、通常の大電流衝突運転では、大幅な軌道変更や振動を誘起させることは、真空コンポーネントや測定器に損傷を与える可能性があるため、現状のオプティクス測定は通常衝突時の1/40~1/50の電流で行われ、バンチの強制振動はシングルバンチで行われている [4]。しかし、オプティクスは、ビーム・ビーム効果、ウェーク場や熱による電磁石の変位の影響でビーム電流と共に変わることが予想される。したがって、通常の衝突状態で測定することが衝突状態を知る上で重要である。それを実現させるために、衝突実験に影響を与えないように、測定するバンチのみを励振し、そのバンチの振動を検出するゲート測定が用いられる。

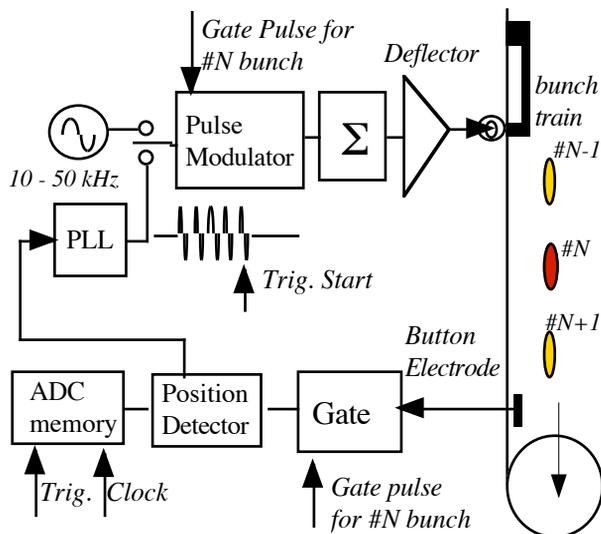


図6：個別バンチ励振と振動検出モニター、図では、#Nバンチのみを励振し、そのバンチをゲートし、振動を検出する。

バンチトレイン内の1つのバンチを励振させるには図6に示すように、広帯域アンプを用いた横方向バンチ毎フィードバックシステム [5] の一部を利用する。ベータトロン周波数に合った信号発生器の出力は、目的のバンチにタイミングを合わせたゲートでパルス変調される。デフレクタで励振されたバンチをゲートし、その振動を検出する。励振を効率よく行うために、被測定バンチのフィードバックを切っておく。この単バンチの励振は、他の衝突バンチに影響与えることなく行うことができた。ターン毎位置モニターのゲートタイミングをトレイン内のあるバンチに合わせ、その振動を検出する。図7は励振を切った直後のベータトロン振動の減衰を示す。振動はほぼ指数関数で減衰している。その時定数は水平方向で10.2ms、垂直方向で4.5msとなった。この減衰時定数は、放射減衰時間よりずっ

と短いので、ヘッドテールダンピング効果と思われる。減衰時間は、バンチ電流とクロマチシティに依存する。この減衰振動を全周のGBPMで検出し解析すれば、オプティクスに関する情報が得られるであろう。図6に示すように、励振に信号発生器が用いられている。この方式では、ベータトロンチューンが変わる毎に発振周波数を変えなければならない不便さがある。そこで、周波数を自動的に追従させるためにPLL(Phase-Locked Loop)を導入した。信号発生器の代わりに、ビーム振動をPLLの参照信号として使い、ビームを含んだフィードバックループを形成する。PLL内のDCオフセットを与えることによりPLLの出力位相を変えることができ、連続励振できる。ビームが安定な場合、最初にビームロックさせるために、何らかの振動の「種」を与えなければならないことがわかった。一度ロックできれば、水平垂直方向に安定に振動させることができた。

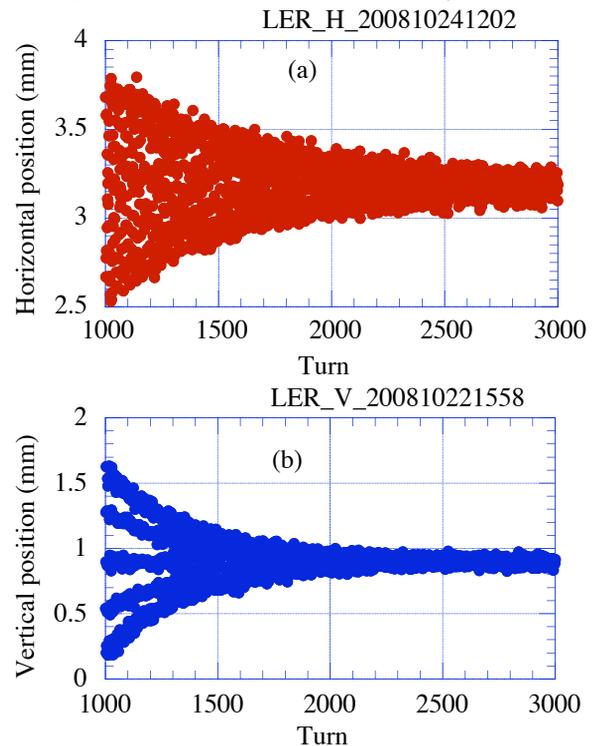


図7：トレイン先頭バンチの水平(a)・垂直(b)方向ターン毎位置、ベータトロン減衰振動を示す。外部励振は1023ターン目でオフ。水平・垂直クロティシティの設定値： $\xi_x=0.1$ $\xi_y=2.0$ 。

参考文献

- [1] K. Akai et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A 499, p.191 (2003).
- [2] T. Ieiri et al., in Proceedings of International Workshop on Electron Cloud Effects (ECLLOUD07), Daegu, Korea (2007), p.152, <http://chep.knu.ac.kr/ecloud07/>, KEK Proceedings 2007-10.
- [3] T. Ieiri et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A 606, p.248 (2009).
- [4] Y. Ohnishi et al., EPAC'00, Vienna, p.1537 (2000).
- [5] M. Tobiyama and E. Kikutani, Phys. Rev. ST Accel. Beams 3, 012801 (2000).