

Development of Multi-bunch Beam Position Monitor

H. Hayano

National Laboratory for High Energy Physics
Oho 1-1, Tsukuba, Ibaraki 305 Japan

Abstract

A beam position monitor for multi-bunch beam trajectory control is required to have around 1 μ m resolution for linear collider main linac. The multi-bunch BPM measures beam position of selected bunch at one time but with high resolution. The design and development study of the BPM has been proceeding. The beam test using ATF multi-bunch beam was done and the position of each bunch was measured using strip-line BPM and fast S/H circuit. In this paper, the beam test results are described.

マルチバンチビーム位置モニターの開発

1. はじめに

リニアコライダでは1.4ないし2.8 ns 間隔の100バンチ程度のマルチバンチビームとなり、その軌道制御のために全バンチ平均のビーム位置測定その他、個々のバンチの位置変化も測定する必要があるが、特にエミッタンスの増大しやすい後半部のバンチの位置を高分解能で測定することは必須である。リニアコライダのための試験加速器(ATF)の1.5 GeVリニアックでは2.8 ns 間隔、20バンチのビームで運転されるが、マルチバンチBPM開発のために、ストリップラインBPMと高速サンプルホールド回路を組み合わせたマルチバンチBPMビーム実験を遂行中である。本稿では特に高速サンプルホールド回路の評価のためストリップラインBPMからの信号をサンプルホールドしその直流化された出力をオシロスコープで測定しビーム位置をもとめたテスト結果について報告する。

2. マルチバンチビーム位置測定

ATFのマルチバンチは、バンチ間隔は2.8 ns、電荷量は 2×10^{10} 個、20バンチであるのでバースト長は53 ns というビームである。この個々のバンチの重心位置を測定するためには現状のパルスストレッチ及びトラックホールド型のエレクトロニクスでは時間分解能が20 ns 程度しかないのでバンチ信号が時間的に重なってしまい不可能である。時間分解能を10倍あげるためには、単純に考えてエレクトロニクスも10倍高速にしなければならぬ。またケーブルによる信号伝送も数m程度まで短くしなければ長く尾をひく信号テールが次のバンチ信号にかかってしまい測定位置に系統的誤差をもたらす。これらを考慮し、ピックアップ電極は低周波領域のエンハンス効果のあるストリップラインを選択するとしてその電極長を決めなければならない。これはバンチ間隔、最低必要なケーブル長、パルスストレッチャーのフィルター帯域、必要なS/Nとから決める事になる。具体的にはフィルターのインパルス応答からそのテールが2.8 ns 後方で十分減衰するフィルター時定数を求める。そして最低必要なケーブル長としてビームラインからエレクトロニクスが放射線損傷を受けない場所までの距離3 mを使いそれによる伝播波形歪でテールが2.8 ns 後方で十分減衰する事を確認する(もし減衰しなければケーブル長を短くするかケーブルを変える)。最後に必要なS/Nとフィルター時定数からストリップ長を決め、再度テールが2.8 ns 後方で十分減衰する事を確認する。減衰しなければトライアンドエラーをする。これを具体的に実行しその結果ストリップ長は40 mm、フィルター帯域幅は850 MHz、ケーブル長は5 mまで可能となる。これを高速のサンプルホールド回路に入力すれば供給するサンプルホールドタイミングをずらしていくことにより個々のバンチをサンプルホールドできる。この場合サンプルホールド回路内でテールが混じってはいけないのでフィルター帯域の2ないし3倍の帯域(1.5~2.5 GHz)の高速サンプルホールド回路が必要である。しかしながら、この場合2.8 ns 後方で振幅が12 mVでありこれは主信号9 Vの1/

750であるので後に述べる様に0.13%の系統的混ざり込み誤差を生じ高精度測定の際にはまだ問題が残る。

3. ピックアップ信号テールの隣接バンチに及ぼす影響

ストリップラインチェンバーからの信号のテールが次のバンチ信号のピークに重なった時のビーム位置測定に及ぼす影響を考えよう。ビーム位置測定計算は次の式で行う事とする。

$$x = k_x \frac{V_2 - V_4}{V_2 + V_4}, \quad y = k_y \frac{V_1 - V_3}{V_1 + V_3}$$

ここに、 k_x 、 k_y はx方向、y方向の位置感度係数であり、 V_1 から V_4 は電極1から4までのビーム信号ピーク電圧である。いま、1番目のバンチ信号を

$$V_1^1, V_2^1, V_3^1, V_4^1$$

とし、混ざり込みがない信号とする。このとき、2番目のバンチのみの信号を

$$V_1^{20}, V_2^{20}, V_3^{20}, V_4^{20}$$

とすると、1番目の信号テールの2番目のピーク電圧値への混ざり込みを等しく κ としたとき、観測される2番目の信号電圧 V_1 および V_3 は

$$V_1^2 = V_1^{20} + \kappa V_1^1, \quad V_3^2 = V_3^{20} + \kappa V_3^1$$

となつて、2番目のビームチャージの1番目からの変化を α とすると、結局ビーム位置は、位置計算式に上記の信号電圧を代入して、

$$x^2 = \frac{1}{1+\kappa/\alpha} x^{20} + \frac{\kappa}{\alpha+\kappa} x^1, \quad y^2 = \frac{1}{1+\kappa/\alpha} y^{20} + \frac{\kappa}{\alpha+\kappa} y^1$$

となる。すなわちビームチャージ変化 α が1で一定のときは2番目のビーム位置は真の位置および1番目のバンチ位置からそれぞれ κ だけ影響をうける。例えば κ が2%であれば、おおむね

$$x^2 = 0.98 x^{20} + 0.02 x^1, \quad y^2 = 0.98 y^{20} + 0.02 y^1$$

となり、ビームが大きなオフセットを持つ場合それに比例した大きな誤差を持つことになる。ビームチャージがバンチ毎に増大していつているようなライジングエッジでは α が1より大きく、ビーム位置測定への影響は緩和されるが、フォーリングエッジでは逆に影響は大きくなる。これは混ざり込みの比率が変わるためである。

4. 高速S/H回路の特性

本マルチバンチBPM開発のために使用された高速S/H回路(ナノ技研製)のブロック図を図1に示す。この回路は最大立ち上がり350 psまでの高速信号土1 Vを400 psゲート区間でサンプルホールドし、ゲイン10で直流に直すものである。サンプルホールドの最大繰り返しは25 kHzである。トリガーは外部からの供給となっているので、ビームテスト時にはビーム同期トリガーを可変ディレイを用いて遅延させビーム信号

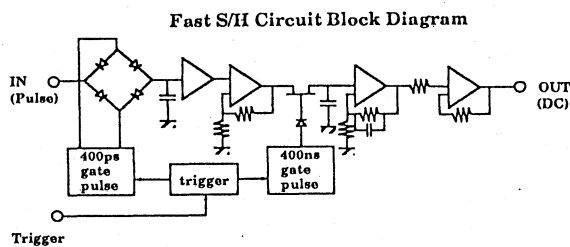
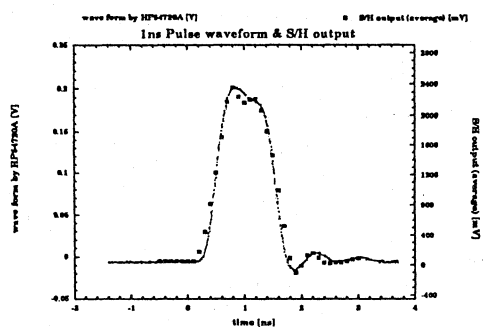
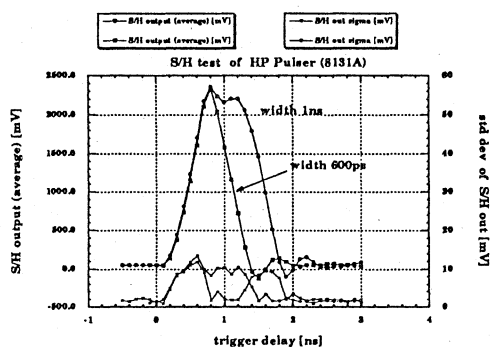


図1 高速S/H回路 (ナノ技研製) のブロック図

ピークをサンプルホールドすることになる。このS/H回路をテストするため、HPパルスジェネレーター (8131A) のパルス信号を用い、可変ディレイにより次々とサンプルホールドしていった結果得られた波形とオシロスコープ (HP54720A、4Gs/s、1.1GHz帯域、等価サンプリングモードデータ取得) の波形と比較した。図2 (a) にはそれらの比較を示したが、S/H回路出力の立ち上がり、立ち下がりがオシロスコープの波形より少々鈍いのでオシロスコープの1.1GHzほど帯域はないが、1GHz程度であることがわかる。なおサンプリング間隔は100psでパルスジェネレーターの内部遅延で行った。したがって横軸の精度はHP8131Aで決まっています、仕様値で精度5%、ジッター0.025%以下であるので十分正確である。図2 (b) には、1ns幅と600ps幅のパルスのサンプルホールド出力をプロットしたが、同時にその出力の揺れの標準偏差も併せてプロットしてある。これによると600ps幅のパルスもそのピーク値を損なうことなくサンプルホールドできており、このような波形のパルス (例えばストリップラインBPMからの信号) を十分捕えることができる事を示している。しかしながら出力の揺れの標準偏差は台形的な波形のフラットトップでは小さいが、その立ち上がり立ち下がりのスロープでは大きい。さらに三角波的な波形では、その標準偏差は信号のあるどの位置にもかかわらず大きく一定で約10mVであった。これはサンプルホールドタイミングまたはサンプルホ-



(a)



(b)

図2 S/H回路出力とオシロスコープとの比較

ルドゲート幅にジッターがあることを示唆している。その効果をスロープ波形の積分から単純化して見積ってみると、約5psのジッターに相当する。したがってこの揺れをさらに下げるためには5ps以下のタイミングジッターおよびサンプルホールドゲート幅ジッターを実現しなければならない。また、このS/H回路のリニアリティーを調べるため、HP8131Aの出力パルス振幅を変えS/H回路の出力をプロットしたのが図3である。図中にリニアフィットからのずれを併せてプロットした。これによると0.2~1Vの入力パルス振幅に対し1%以下の直線性をもっている。しかしながらHP8131Aの振幅精度は仕様値で5%以下であるのでこれ以下の精度は保証していない事に注意しておく。

ストリップラインBPMからの信号をサンプルホールドした例を図4に示す。この信号はATFリニアック用ストリップラインBPM (中心から半径15mmの位置の4ストリップで、電極長80mm) から38mのRG-213/uケーブルおよび20dBアッテネーター、さらに850MHzガウシアンローパスフィルターを通した後の波形である。使用したタイミングは電子銃のグリッドパルサー用のディレイモジュールTD2と並列に設置したTD2からのNIMパルスを浜松トニクス製C1097ディレイユニットとおしたものである。C1097ディレイユニットによるタイミング遅延は遅延ステップ110psで順次変えていった。以前の測定によると、ビームとこのようなTD2によるタイミング信号とのタイミングジッターは標準偏差で約10ps程度であるので、その出力の揺れの標準偏差もHP8131Aの時より悪くなっていてピークにおいて出力3152.6mVに対し出力標準偏差33.9mVとなった。この揺れにはケーブルの通線経路がクライストロンのそばを通っているのでクライストロン変調器内のサイクロンノイズを多く含んでいるので、別の通線経路ではもっと小さくとなると考えられパルスジェネレーター実験時の5psのデータから類推して20mV程度となると考えられる。

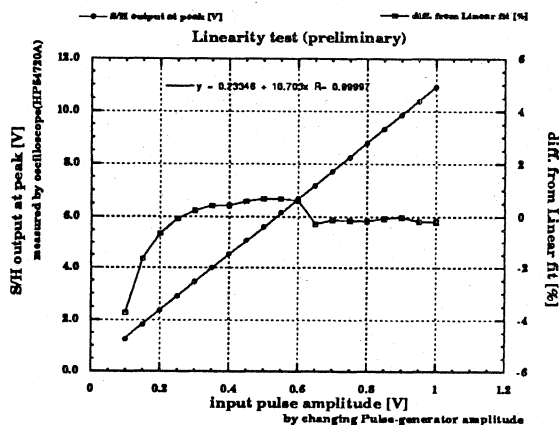


図3 S/H回路のリニアリティー

5. S/H回路のS/N比とビーム位置分解能

本S/H回路自身の出力熱雑音は、AC50Hzと同期した成分を除くと標準偏差で1.2mVであるので、最大出力10V時に最大S/N比となり、 $S/N = 10000/1.2 = 8300$ となる。しかしながら、タイミングジッターによるS/N比の減少の効果は非常に大きく、前節で述べたように外来ノイズがないとして10psのタイミングジッターがあると、出力揺れは約20mVとなると考えられ、この時最大S/N比は、 $S/N = 10000/20 = 500$ となる。ATFリニアック用ストリップラインBPMでは位置感度係数が9250μmであるので、以下の分解能計算式で最大分解能を見積ると、

$$\sigma_x = k_x \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{1}{S/N}$$

より、外来ノイズおよびタイミングジッターがないとき $\sigma_x = 0$ 。 $8 \mu\text{m}$ で外来ノイズなしでタイミングジッターが 10 ps のとき $\sigma_x = 13 \mu\text{m}$ となる。現状のビームテストでは 10 ps 程度のタイミングジッターが避けられなかったので最大分解能は $13 \mu\text{m}$ 程度となる事が考えられる。

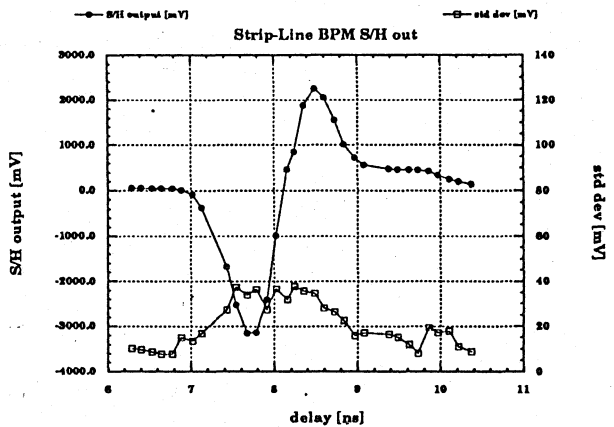


図4 ストリップラインBPMからの信号のサンプルホールド例

6. マルチバンチビーム位置測定テスト

本S/H回路を2台使用してストリップラインBPMの対向する2つの電極からの信号を同時にホールドしビーム位置を測定するテストを試みた。そのセットアップを図5に示す。ストリップラインBPMからの信号は10mのRG-213/uケーブル、アッテネーター、チョークコイル、850MHzガウシアンローパスフィルターを通しさらに40ps可変の位相トリマーを通した後それぞれS/H回路へ入力する。タイミングは電子銃のグリッドバルサー用トリガーと並列の同期ディレイモジュールTD2からのNIMパルスを浜松ホトニクス製C1097ディレイユニット(最小ステップ幅30ps)をとおしたものを2台のS/H回路に同時に供給する。そのタイミングはオシロスコープにも同時に供給し2つの出力を同時に取得する。取得したオシロ上のデータは適当な時間窓内で平均値をとりそれを出力電極電圧とした。位置計算のために、その電圧値からベダスタルを差し引き、2台の回路のゲイン比の補正をして、前述の位置計算式からビーム位置を計算した。図6にマルチバンチビ

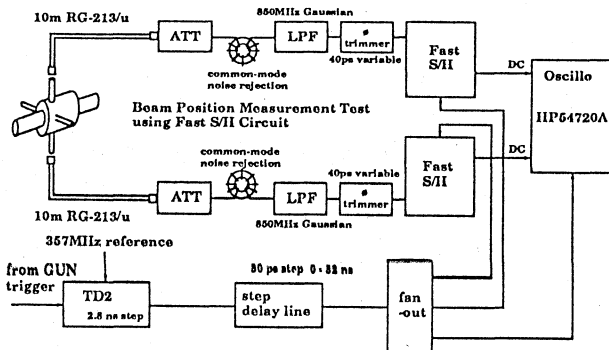


図5 本S/H回路によるビーム位置測定セットアップ

ム時のストリップラインBPMからの信号の波形と各バンチのYビーム位置をプロットしたものを示す。バンチトレインの前縁におおきな位置変位があるがビームダイナミクスからの考察はつぎのステップの研究に委ねる事とする。これと同じセットアップでシングルバンチ時の波形測定から、主ビークから2.8ns後方位置(次のバンチ位置)では信号テール残留が1.9%であったので、このマルチバンチ位置測定には1.9%の系統的誤差を含んでいると考えられる。例えば最大変位位置 $1609 \mu\text{m}$ の近傍では約 $30 \mu\text{m}$ の誤差を含むと考えられる。一方位置測定は各バンチ毎に10回ずつ行ったがその標準偏差はトレイン中心付近が最小であり $11 \mu\text{m}$ 程度であった。これは前節で述べた 10 ps タイミングジッターからの寄与 $13 \mu\text{m}$ と一致する量であり、ビーム位置はこれ以下で安定であった事を示している。

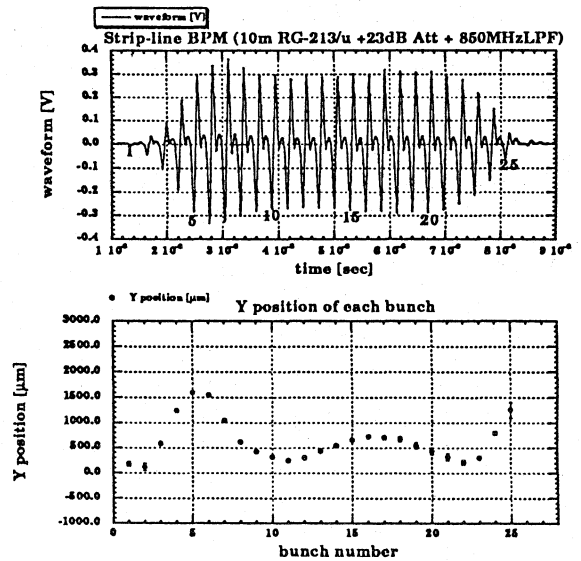


図6 BPM信号の波形と各バンチのYビーム位置

7. 問題点と今後の課題

本ビーム測定実験はオシロスコープを使った高速サンプルホールド回路のテストであったが、今後、低価格、コンパクトで高速測定できるようなモジュール開発をしていく事となる。その際問題となるのがトリガージッターおよび信号テールの混ざり込み、そして外来ノイズである。トリガーは自己トリガー型のほうが望ましいがBPM信号を微分するなどしてトリガー生成を行うには数GHz以上の高速なタイミング回路が必要となるであろう。またそのジッターは数ps以下にしなければならないので高度な回路技術が要求される。信号テールの混ざり込みは現状80mm長のストリップを例えば40mmに縮めたり、ケーブル長を縮めるなどしてBPM信号の高速化を計らなければならない。出力はDCである必要はなく、 $20 \mu\text{s}$ 程度保持できれば16ビットADCでデジタル化可能である。以上の様な開発を今後する事により簡便にマルチバンチのビーム位置を測定できるようになると考えられる。

8. 謝辞

本ビーム実験にあたり準備、ビーム運転等にわたりATFスタッフの方々およびATC(株)の森田成基氏に御協力いただいたことを感謝いたします。