

高工研 佐藤 勇, 福田茂樹, 松本 浩, 田中治郎
東大工 鷲尾オー

§1 測定方法の選定

ビームのバンチは、加速を受ける途中の経過を含めて最終的な結果を表わす、大切な情報源の一つである。このバンチの様子を測定出来れば、加速状態の良否を判断する大変有効な手段を1つ入手した事になる。陽子シンクロトロンのように、数MHz以下の高周波電波で加速するビームのバンチは、時間分解能の良いオシロスコープによって、直接観測することが可能であるが、しかし数百MHz以上の加速周波数である様は線形加速器のビームのバンチは、スコープの時間分解能(≧350ps)の制限から、直接に観測する事が不可能で、サンプリングスコープで時間をかけて測定するか、光に変換してストリークカメラで測定するか、のどちらかである。これらの測定器のいずれも時間分解能が良く、前者は≧25psで、後者は≧8psであるが、ビームと同期させるトリガー信号のジッターを小さくするために、回路に工夫が必要である。又、これらの測定器は、高価であり、手軽にしかも簡単に測定するわけにはいかない。そこでもっと手軽にバンチングビームを測定する方法は、無いものであろうか。その可能性をさぐって見る事にする。

ビームのバンチ状態を測定は、繰り返しパルスのビーム中の広い、狭いによって、測定系を大別した方が良さそうである。例えば、(i) ワンショットのシングルバンチ、(ii) 短パルスで繰り返しが多い場合、(iii) ロングパルスで繰り返しが少ない場合、等に分類して測定系の適性を考えることにする。

§2 シングルバンチモニター

ワンショットのシングルバンチは、そのバンチビームだけで、ビームについての情報を処理しなければならぬので大変困難である。従ってワンバンチビームから全ての情報を得るには、モニターを直列に並べて、その信号を集積してビームのバンチ波形を表示する方法が適当であると思われる。具体的にはFig.1の如くなるであろう。nsのパルスは、~100GHzの帯域に相当するので、パルス波形を忠実に再現するには、信号ケーブルやコネクタの吟味を充分に行う必要があり、一般に帯域が広がると、それらのサイズは小さくなる。従って、検出器等の寸法が、ビームと同程度になるので、destructiveなモニターになる可能性が強い。シングルバンチモ

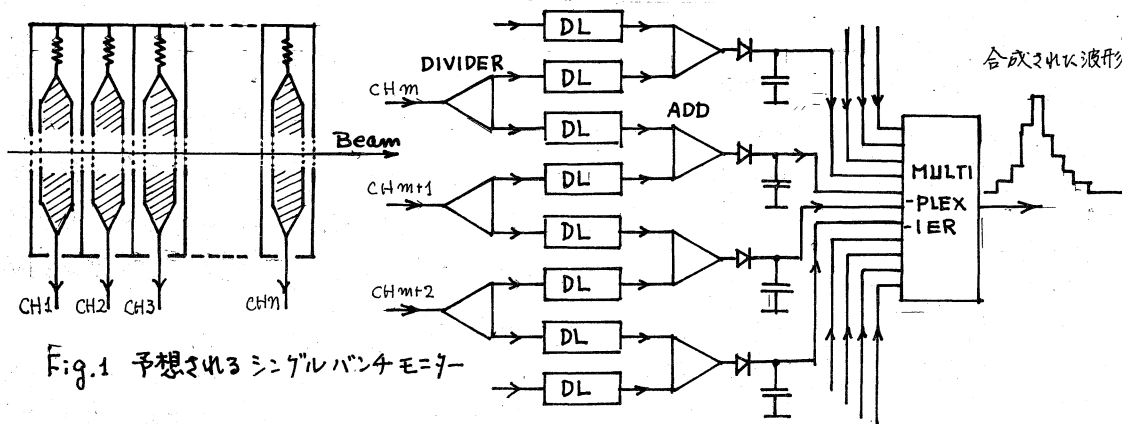


Fig.1 予想されるシングルバンチモニター

モニターヘッドには、2、3の工夫が必要となる。例えば、ヘッドをストリップライン型にすると、ラインの表裏で信号が打ち消すので、ドリフトスペースを持つような構造になる。即ち表裏の信号発生に時間差をつけて、信号処理を行う。ドリフトスペースは、ビームのバンチヤに比較して充分長くなければならぬ。電子線の場合には、1~2cmあれば良い筈である。同軸型の同様なモニターでの Preliminary test の結果、Fig. 2 に示す如く、サンプリングスコープの測定では、表裏の信号を分離出来ぬ。このモニターは、電子線形加速器のバンチを測定するため製作したもので、同軸

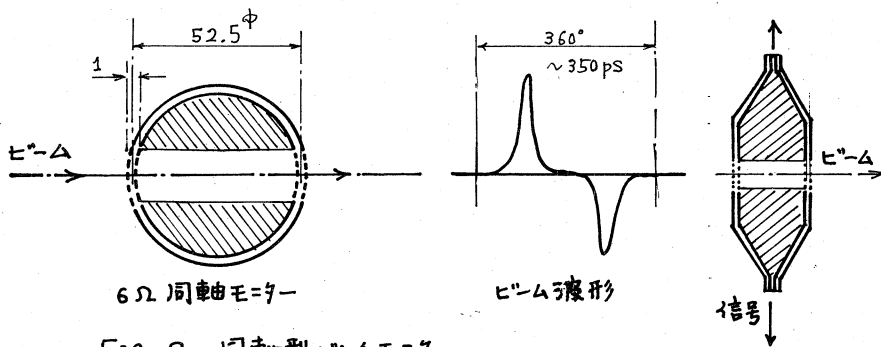


Fig. 2 同軸型バンチモニター

の内径と外径の比が ~ 1 に近い。これはビームのバンチヤに比較して、検出器の大きさを小さくして、ビーム波形が不正確にならない様々している。又、同軸管の平均直径は加速周波数波長の丁度、

2分の1に付いている。これらの測定で、一番問題は、信号ケーブルによる信号の減衰である。一般に高い周波数成分ほど減衰が大きいので、信号ケーブルが長いほど、ビーム波形は乱れてしまう。これを防ぐには、モニターヘッドの近くで、信号を処理することである。

§3. 繰り返しパルスの多いビームモニター

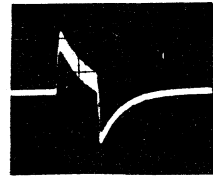
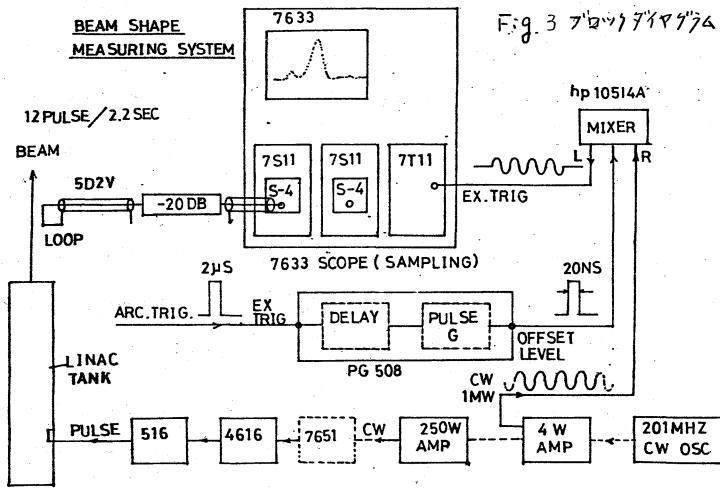
繰り返しパルスが多い場合には、サンプルスコープで測定する方法が、大変有効である。モニターヘッドは、§2で述べたものでも良いが、多少精度の落ちることを許すならば、最も簡単なものとして、ループとコアがある。これらのモニターは非常に手軽に製作出来、大変便利であるが、§2の同軸モニターで測定した時と同様、サンプリングスコープの pre-trigger を、ビームに同期させなければならぬ。又、繰り返しパルスによって、ビーム波形を表示するので、ビームそのものが安定でなければ、一見、ビームは time jitter によって、ゆらんでいる様々観測される。

ループとコアを使ったモニターで、KEK Linac のビーム波形を測定した時のブロック図を、Fig. 3 に、モニターヘッドの構造を Fig. 4 に表示してある。ビームと Pre-trigger との同期は、加速高周波の連続波 (cw) を、イオン源の Arc-trigger で mixer を用いて作り出すことによって、取ることが出来ぬ。

コアモニターで、バンチを測定する場合には、コアに巻くコイルの線間容量や、コイルとケース間の電気容量等によって、立ち上がり波形が乱れてしまうのを避けるために、巻き数を出来るだけ少なくするのが普通である。又、波形の lag を小さくするため、負荷抵抗も小さくするので、当然出力信号も小さくなる。負荷抵抗の周波数特性を良くするために、リング状の抵抗を Cavity の gap に取り付け構造に付た。この one turn monitor で、線形加速器の Pre-buncher によって bunch された beam 波形を測定した。その測定写真を Fig. 5 (a) に示してある。

ループモニターで測定したビーム波形では、ビームのバンチング位相が約 50° 拡張になっている。又、繰り返しパルス中の最初の部分 ($\sim 0.7\mu\text{s}$) と最後の部分 ($\sim 5.5\mu\text{s}$) に多少波形の変化が見

られるだけでなく、ビーム負荷による、加速ビームの遅れ（ $\sim 25^\circ$ ）が観察された。Fig.5b 参照



CORE MONITOR 5μs/div
BEAM SHAPE 50mv/div
465 SCOPE

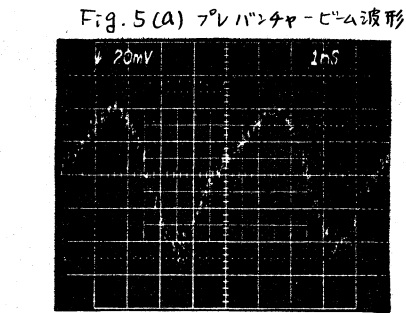


Fig. 5 (a) プレバンチャー-ビーム波形

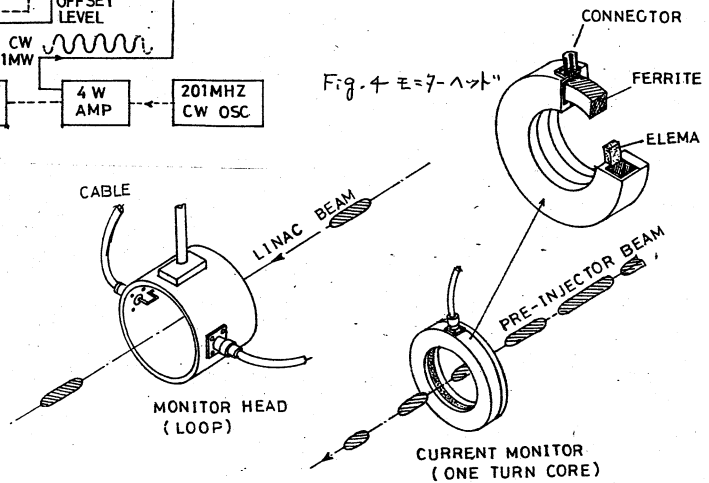


Fig. 4 モニターヘッド

§4 ロングパルスで繰り返しの少ない場合のバンチモニター

ビームの波形を観測して、加速器の調整に役立てようとする場合には、今迄述べたモニターの表示方法では、時間がかかり過ぎて、途り実用的ではない。これ以外にもっと手軽で、素早く測定する方法は、ないだろうか。そこで、長いパルス中の場合には、殊に述べたモニターの出力を、スペクトルアナライザーを用いて、高調波成分を測定し、Fourier 合成すれば、ビームのバンチング波形を再現出来る筈である。しかしパルス中が数μs程度と短い場合には、スペクトルアナライザーで測定することも困難となる。そこで、モニターの出力を、Cavityで、フィルタすれば、同様の事が可能である。まず、Preliminary testを行い、可能性の検討を行う。これから述べる事柄は、その結果に基づいてである。

高周波加速を受けたい結果としてバンチしたビームは、加速周波数、即ち基本波以外に、その高調波成分を持っている。それを数式化すると、余弦波を主体とする無限項展開になる。

$$F(\omega) = A_0 \cos(\omega t + \theta_0) + A_1 \cos(2\omega t + \theta_1) + \dots + A_m \cos(m\omega t + \theta_m) + \dots$$

ここで、 $A_0, A_1, \dots, A_m, \dots$ は、それぞれの高調波の振幅で、 $\theta_0, \theta_1, \dots, \theta_m, \dots$ は、それぞれ位相ずれを表わしている。この位相ずれによって、ビームのバンチングは非対称になる。

Fig. 6 には、基本波、第1高調波、第2高調波、... の振幅が、それぞれ

の場合に基づいて、第4、第6、第8の高調波まで、それぞれ積算した図を表わしたもので

ある。この結果、振巾の比が一定ならば、高調波の次数を上げると、パルス中には余り影響せず、平坦部がガタガタが多少変化する程度である。次にもっとパルス巾が狭い場合について計算してみたが、Fig. 7の図である。これは、簡単化のため、全ての高調波の振巾が一定で、積算する次数を、第6、第8、第10、第12の高調波まで上げてみたものである。この場合には明らかにパルス巾が狭くなって行く。

実際に同軸空洞を用いて、KEKリニアックのバンチングビームの測定を行った。Fig. 8は、その時に使った、測定系を図式化したもので、Fig. 9には、同じビーム検査器（ループ）を使ってサンプリングスコープで測定した、バンチング波形と、同軸空洞を通して測定した、高調波成分の振巾の波形を、表示した。この結果を無修正でFourier合成を行ったと、サンプリングスコープで測定した波形とを重ねて、Fig. 10に示してある。高調波成分の振巾を正確に求めるには、多くの補正を行う必要があり、又、この同軸空洞では、基本波測定では、多くの高調波振巾の和の様相測定となるので、同軸空洞を *perturb* して測定する必要がある。

将来のこの種類のバンチモニターは、それぞれの高調波を、それぞれ単独で測定し、それを計算し、即座に *display* する方法が妥当であろう。電子線形加速器の様々、バンチ位相が極端に狭い場合には、バンチの波形を忠実に再現するため、相当高次の高調波まで、振巾と位相を測定する必要があるが、現実には、せいぜい第6高調波までの測定が、帯域から見て限度と思われる。そこで、それぞれの高調波の移すの傾向から、高次の高調波成分を想定し、計算から求める方が、良策と考える。

Fig 5(b) プロトンリニアックビーム波形

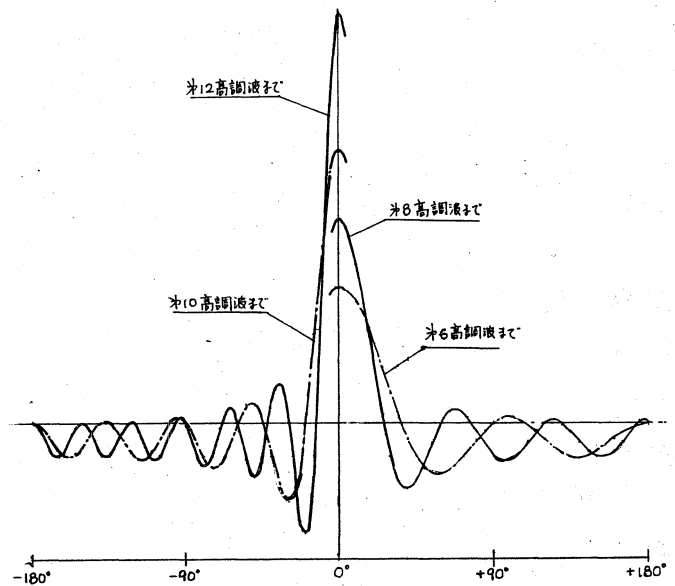
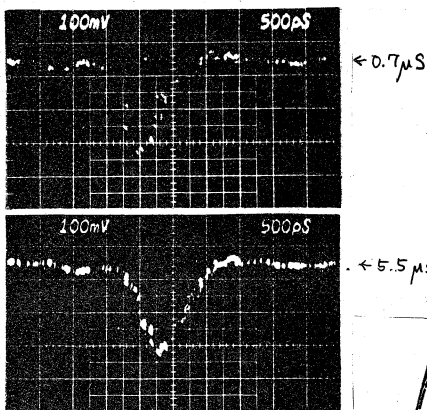


Fig.7 高調波成分の次数によるパルス巾の変化

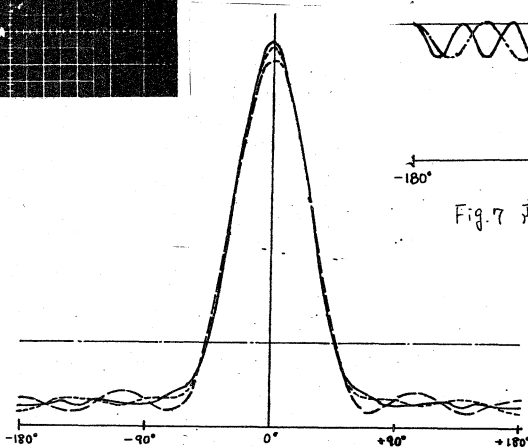


Fig.6 高調波成分の振巾比によるパルス巾の変化

Fig. 8 HARMONICS MEASURING SYSTEM

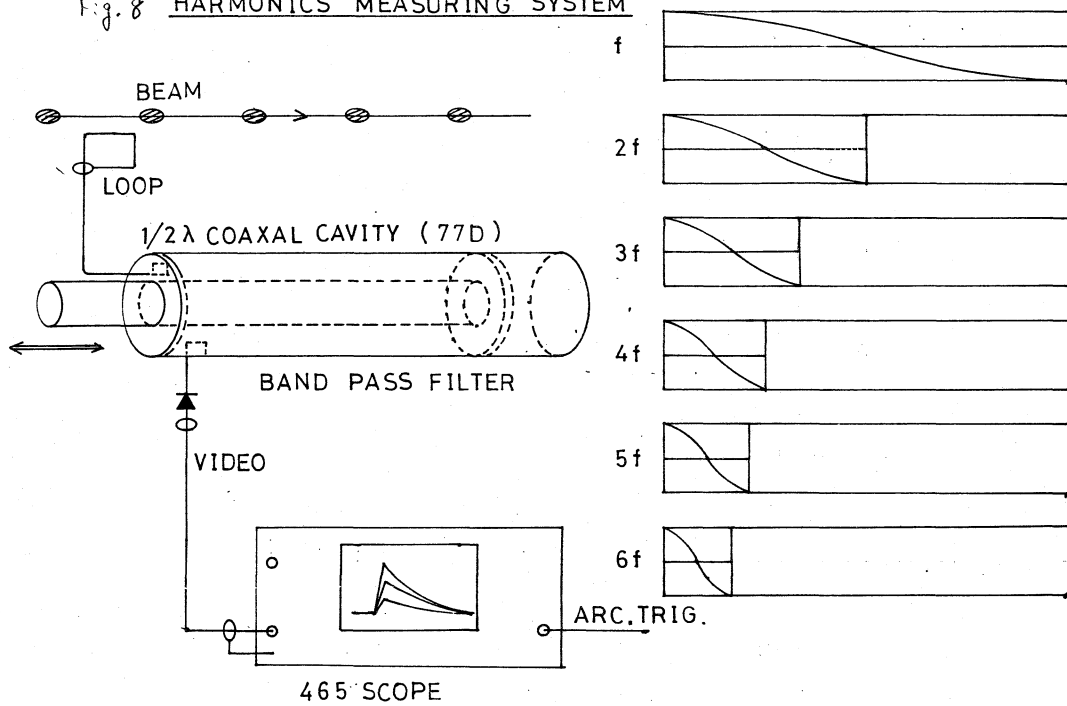


Fig. 10

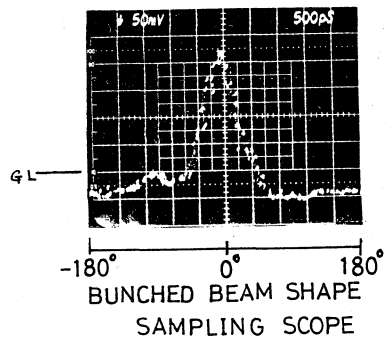
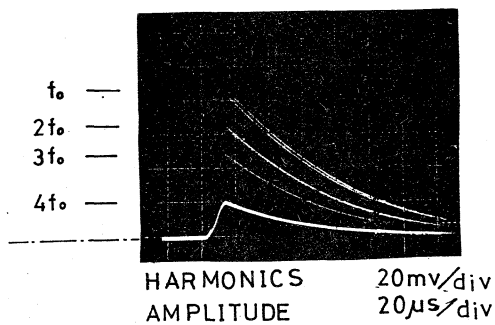


Fig. 9

BUNCHED BEAM SHAPE

— SAMPLING SCOPE
 - - - FOURIER ANALYSIS

