

ΔT MULTI-BUNCH BEAM ENERGY COMPENSATION

S. Kashiwagi, ¹H. Hayano, ¹T. Korhonen, ¹K. Kubo,
¹T.Naito, ¹K. Oide, ¹S. Takeda, ¹J. Urakawa, ²S. Nakamura, ³F. Tamura and ⁴S. Morita

The Graduate University for Advanced Studies
 1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki, 305, Japan

¹High Energy Accelerator Research Organization
 1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki,305, Japan

²Department of Physics, Faculty of Education, Yokohama National University
 156 Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama-shi, Kanagawa, Japan

³University of Tokyo

7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, Japan

⁴E-CUBE Co., Ltd

5988-8 Hino, Hino-shi, Tokyo, 191, Japan

Abstract

By using the SLED cavity, the RF high power test for ΔT energy compensation was performed at Accelerator Test Facility (ATF) in KEK. To compensate multi-bunch beam energy for various beam currents, the input waveform into accelerating structure is changed by controlling the phase and combining the rf-power from two klystrons with a 3dB hybrid combiner. In this test, an arbitrary waveform was generated by changing the rotating speed of the each klystron phase into the opposite direction.

ΔT マルチバンチビームエネルギー差補正

1. はじめに

現在計画されているリニアコライダーでは、ルミノシティーを高くするために衝突点での非常に小さいビームサイズと大電流のマルチバンチビームによる運転が必要不可欠である。しかし、大電流のマルチバンチビームを線形加速器（リニアック）で加速すると、ビームローディングによりバンチトレイン内の後方バンチは前方バンチよりも大きな減速力を受け、一つのバンチトレイン内でエネルギー差が生じてしまう。そして、リニアックのある距離をビームが進むときビーム内にエネルギー差があり粒子によってphase advanceが異なる（収束力が異なる）と、横方向の運動についてのphase space上で異なる回転をするためエミッタンスが増大し、ビーム輸送効率を下げるなどの問題を引き起こす。このマルチバンチ加速におけるバンチ間のエネルギー補正はリニアコライダーにとっては本質的に重要な課題であり、その補正法はリニアック加速方式の設計を左右するものである。

リニアコライダーの前段リニアック（Pre-linac）などの低周波数（おもにS-band）リニアックにおいてはマルチバンチエネルギー差補正方法として次の様な方式が考えられている。1つは、基本加速周波数（ f_0 ）と僅かに異なる周波数（ $f_0 \pm \Delta f$ ）の加速管をリニアックに設置し、マルチバンチビームを加速することによってエネルギー差補正をする $\pm \Delta F$ 方式 [1]。この $\pm \Delta F$ 方式では加速と補正がリニアック中で別々に行われる。またその他に、加速と補正を同時に行うエネルギー差補正方式としてRF位相調整方式（ΔT方式）がある。このΔTエネルギー補正方法は、すべての加速管の出口でエネルギー差を最小にすることができるため、ビーム光学的に優れたマルチバンチビームエネルギー差補正方法である。

2. ΔTマルチバンチビームエネルギー差補正方法

このエネルギー補正方法は、ビームローディングによって生じたバンチトレイン内のエネルギー差を、RFパワーが完全に加速管に充填される前にビームを注入し、かつ加速管に供給するRFの振幅を変化させることによって、図1のV(t)スロープの傾きを調整し補正するものである。またΔT方式では大電流のマルチバンチビームの場合、V(t)スロープの傾きを大きくし補正効果をあげるために、フィリングタイムの短い（ $T_f = 300 \sim 500 \text{ ns}$ ）加速管が有効である。

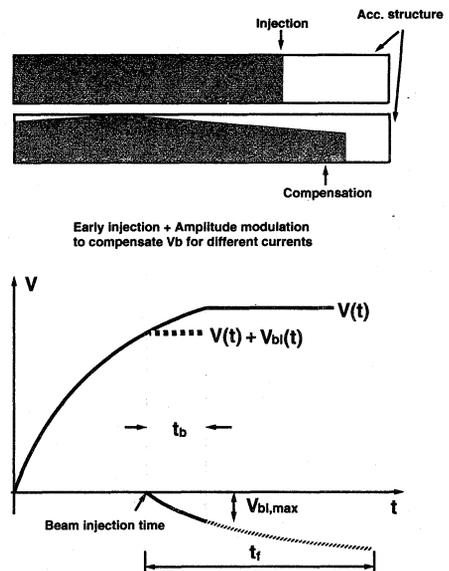


図1 ビーム入射タイミングとエネルギー利得

SLEDを使用するRFユニットにおいて、加速管に供給するRFパルスの波形を変化させるためには、位相反転後のクライストロンの出力波形を変化させる必要がある。しかし、直接クライストロンに入力するRFパワーの振幅を変化させると、クライストロンでのRFパワーの入力・出力特性が非線形であることやクライストロンにかかる電圧の僅かな変化でRFパワーゲインが変化してしまう事などから、安定にRFを出力することが困難になってしまう。そのため、クライストロンは最大効率の状態 (saturation mode) で運転しなくてはならない。そこで、2台のsaturation modeで運転しているクライストロンからの出力を3 dB結合器を用いて合成し、RF位相をそれぞれのカイストロンで反対方向に180度変化させることにより、SLEDへのRFパワーの振幅を変化させる (図2) [2]。

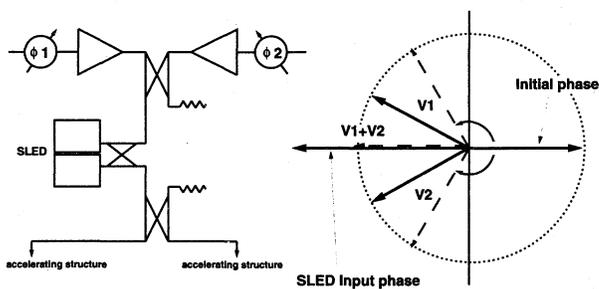


図2 位相を変化させることによるRF振幅調整

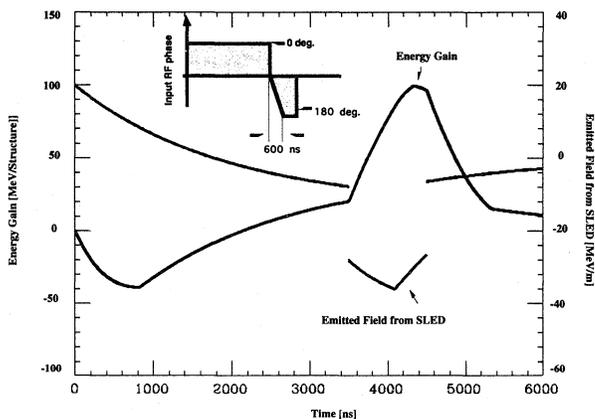


図3 エネルギーゲインとSLED出力波形 [2本のカイストロン出力各30MW ($T_{r_acc} = 830$ ns)]

SLEDを用いた位相調整式による任意波形の生成では、SLEDでパルス圧縮した後の波形は図3のような三角波になる。ビームを加速管の定常状態で加速する場合には、RFパルスのフラットな部分があると大変都合が良いが、現在のリニアコライダのデザインではビームパルス幅はおおよそ100 ns程度と考えられているため、S-band 加速管ではマルチバンチビームは過渡状態で加速される。そのため、加速管に供給するRF波形で特にフラットな部分は必要ないと思われる。また、位相をゆっくりと変

化させることにより、RF振幅もゆるやかな変化をするため、急激に変えることによる加速管への急激なRFの突入を防ぐことができ、この位相調整方式ではDark Currentを減少させることができると思われる。そして、この補正方法をリニアコライダのPre-linacなどのS-band リニアック部で採用した場合、85バンチ、バンチ間隔1.4 ns、1バンチ当りの電子数 7.2×10^9 個のマルチバンチのエネルギー差を、各加速管 ($T_r = 830$ ns) の出口でおおよそ0.10%に圧縮することができる (図3)。

3. 位相調整方式ハイパワーRF試験 ハイパワーRF試験セットアップ

今回のRF試験は、ATFリニアックの8つのRFレギュラーユニットのうちの、2つのRFユニットのカイストロン出力パワーを合成して行った (図4)。合成後のRFパワーはSLEDでパルス圧縮をした後2本の加速管 (L1、L2) に供給された。そして、加速管入口の-70 dB方向性結合器を用いてRF波形を測定した。

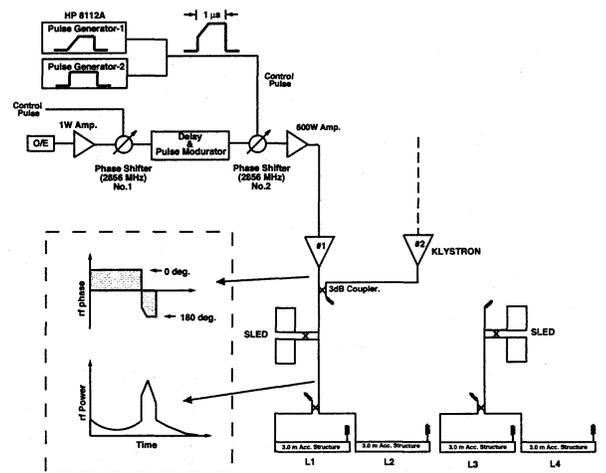


図4 位相調整方式試験用RFユニット

図4のローレベル回路のうち、phase shifter (No.1) は2台のカイストロンの位相関係の調整および本RFテスト後に行うビーム実験でビームの加速位相を調整するために用いる。Delay & Pulse Modulatorを用いて、CWのRFから任意のパルス幅のRFを作り出し、クライストロン電源のメイントリガーに対するタイミングを調整できるようにした。通常、ATFではパルス幅が4.5 μ s、位相反転 ($0 - \pi$) をパルスの始まりから3.5 μ sのタイミングにし運転している。実際には、クライストロンにかかる負担を軽減するために、電源パルスのフラットトップは4.5 μ s以下であるため、クライストロンの出力波形は完全な方形波ではなく立ち上がり、立ち下がりがなまってしまう。今回の測定では、クライストロンの出力波形の立ち下がりの部分ができる限りなまらぬように、通常よりもクライストロンへの入力RFのタイミングを早めた。そして、phase shifter (No.2)に位相コントロール用のパルスを入力することにより、クライストロン入力

RFの位相をコントロールした。また、今回はコントロール用パルスは2つのPulse Generator (HP 8112A) の出力を合成し、片方のPulse Generator のパルス立ち上がりエッジ (LEE) を調整することにより作り出した (図4)。

測定および測定結果

今回の測定では導波管組み替え後、導波管及びダミーロードの十分なRFプロセッシングが行えなかったため、RF合成試験では各クライストロン出口でRF出力は約20MWであった。測定では、同じ大きさのRFパワーを合成するために、まず1台ずつクライストロンを運転しSLED入口で同一ケーブルを用いてRFパワーを測定し調整した。次に合成する2つのRFの位相調整およびタイミングの調整を行った。そして、Phase Shifter (No.2) のLEE設定を数段階変え、加速管入力RF波形を観測した (図5)。

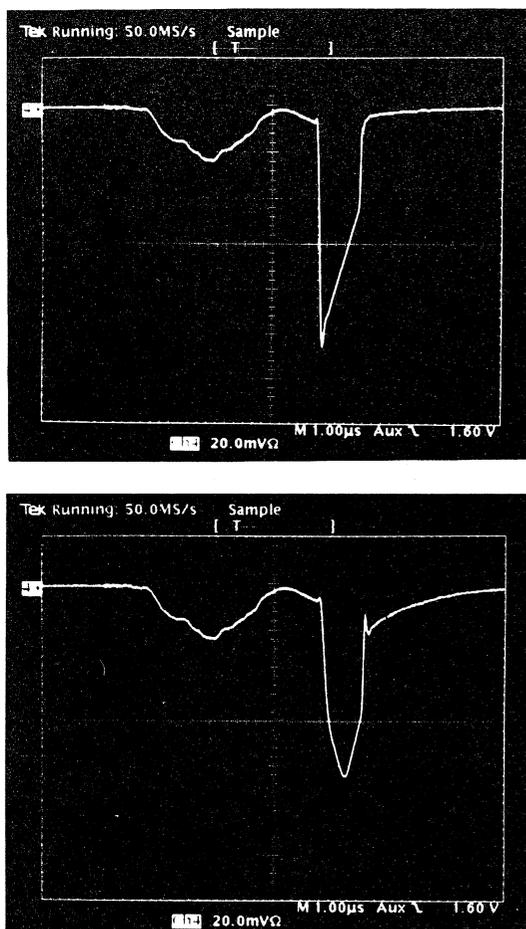


図5 加速管入口でのRF波形
(上: LEE = 5.5 ns 下: LEE = 500 ns)

測定に使用したPhase Shifterの速度応答性を調べたところ、図6に示したように位相コントロールパルスに対してRF位相の変化が十分に追従していない。これでは、任意のコントロールパルスを作り出せたとしても、RF位

相を制御することができないので、今後高速応答性をもつPhase Shifterの開発が必要である。

また位相反転の際、合成されたRFパワーがダミーロード側に全て入力される時間帯がある。時間としては数10~数100nsと短い時間であるが、合成部での反射によりクライストロン側にRFが戻っていないかなどを方向性結合器などを増設し調べる必要があると思われる。

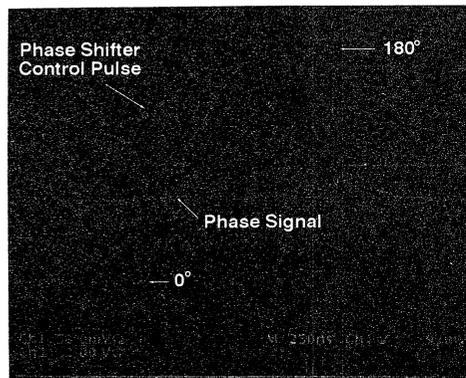


図6 Phase Shifter コントロールパルスとRF位相変化

4. まとめおよび今後の予定

今回の測定から、位相調整をするためのローレベル系の回路の改良が必要と思われる。また、実際にオペレーションなどがしやすいようRFパワーのモニターなどを、どこに設置すべきかなども考える必要がある。

今後このRF波形によりマルチバンチビームでのエネルギー差補正実験をATFリニアックの上流部にて行う予定である。

謝辞

今回の実験を行うにあたり、終始助言とご協力を頂いた高エネルギー加速器研究機構のATFグループの方々に深く感謝いたします。また、(有)イーキューブの松井氏、和知氏、宮本氏には、導波管の組み替え作業などに協力していただき、本実験が実現できました。ここに、深く感謝致します。

参考文献

- [1] S. Kashiwagi et al., "Preliminary Test of $+\Delta F$ Energy Compensation System". Proc. 1996 Int. Linac Conf., (LINAC96)
- [2] T. Shintake et al., "C-band RF Main Linac System for e+e- Linear Collider at 500 GeV to 1 TeV. C.M. Energy", Proc. of EPAC96, pp. 2146-2148.