

Multi-Section Electron Linac の Phasing

核理研 小山田正幸

高エネルギー電子リニアックは、多数の加速管を用いて次々にリレー式に加速して所望するエネルギーを得る。核理研の300 MeV電子リニアックもA部は1mの加速管が8本(A1~A8) B部は2mの加速管が2本(B1~B2)あり、入射した電子をバンチするためにはプリバンチャーとバンチャーがある。(Fig 2参照) リニアックの加速効率を最大にし、しかも良好なスペクトラムが得られるように全ての加速管、バンチャー等に供給するRF電力は移相器を用いてA1を基準として最適位相に調整することができる。今回はこの位相合せに對する小さな提案をしたい。

Fig 1 に示したようにバンチされた電子が位相角 α に均一に分布していて、中心の電子とRF電界の最大加速を与える位相との差を θ_n とすれば、全加速管によるエネルギーゲインは

$$\bar{V}_T = \sum V_n \cos \theta_n \quad (1)$$

で与えられ、最高のエネルギーは全ての θ_n が0の場合である。又、エネルギースペクトラムは

$$\frac{\Delta \bar{V}_T}{\bar{V}_T} = 1 - \cos \frac{\alpha}{2} \left[1 + \left(\frac{\sum V_n \sin \theta_n}{\sum V_n \cos \theta_n} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} + \sin \frac{\alpha}{2} \left[1 + \left(\frac{\sum V_n \cos \theta_n}{\sum V_n \sin \theta_n} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (2)$$

で与えられるから全ての θ_n が0の場合は最良のスペクトルが得られる。(2)式からは必ずしも全ての θ_n が0でない場合でも V_n のベクトル和の位相にバンチされた電子を入射してやれば、

すなわち $\sum V_n \sin \theta_n = 0$ としてやれば θ_n の影響を無くすることは出来る。

この方法は“Phase closure 法”と呼ばれ、この場合スペクトルは

$$\frac{\Delta \bar{V}_T}{\bar{V}_T} \approx 1 - \cos \frac{\alpha}{2} \approx \alpha^2 / 8 \quad (3)$$

となりバンチ巾にだけ依存することがわかる。(3)式はバンチ巾を小さくすることの重要性を示している。(しかし、この方法では入射電子の位相をパラメータとしてスペクトラムの変化を見なければならぬので、非常に感度が低く、しかもバンチ巾のドリフトにかくされる場合もある。

進行波型の電子リニアックでは一般に個々の θ_n を0になるように位相を合せる方法がとられる。加速管の出口に出てくるRF電力を見てビームローディングが最大にすればその θ_n は0となる。(Fig 3参照) ビーム電流0の場合の電界を \vec{E}_w とし、バンチされたビームによって誘起される電界を \vec{E}_e とすれば、加速管出口ではそのベクトル合成された \vec{E} が観測される。

$$E^2 = E_w^2 + E_e^2 - 2E_w E_e \cos \theta \quad (4)$$

これを二乗検波してオシロスコープで見ればFig 4のようになる。例えば $E_e = E_w/3$ の場合は $E^2 = \frac{10}{9} E_w^2 (1 - 0.66 \cos \theta)$ となる。これを見ながら移相器を動かしてRF電力が最小になるように調整する。この方法は $\theta = 0$ に近くなると非常に感度が低くなり、正確に位相を合せることは難しい。それは(4)式を θ で微分して $\theta = 0$ といた値 $\lim_{\theta \rightarrow 0} |dE^2/d\theta| = 0$ からわかる。

実例をTable 1に示す。この例は同じ実験の為に独立に初期調整した時の記録であり、本来は夫々一定の値になるべきものである。パトリアルエフェクトというよりはこの方法の宿命といえる。

$\theta = 0$ の処でも感度の高い方法の一つに \vec{E}_w と \vec{E} の間の角度 ϕ を測る方法がある。すなわちビームローディングの有無によって加速管出口に出てくるRF電力の位相が ϕ だけ変化する。(Fig 3) ここで $\theta = 0$ での感度は $\lim_{\theta \rightarrow 0} |d\phi/d\alpha| = (E_w/E_e - 1)^{-1}$ であり $E_e = E_w/3$ の場合には $\Delta\phi/\Delta\alpha = 0.5$ であり、これよりも大電流の場合には理論上は感度は無制限に上がる。実用的には ϕ を 1° ほどの精度で測定出来れば充分である。 ϕ を精度良く測定するために加速のRF電力に位相をロックしたCW波 (\vec{E}_r) を用意する。 $E_r \gg E_w$ としてビームローディングの無い状態で Fig 5 のようなハイブリッド回路で混合して検波する。加速管から出てきた E_w (パルス) の部分が前後のCW波の波高値と一直線状になるようにCW波の移相器を動かす。一直線の状態では \vec{E}_r と \vec{E}_w はほぼ直角になる。この状態で電子ビームを入射すると $\vec{E} = \vec{E}_w + \vec{E}_e$ は ϕ だけ位相を回転する。それが \vec{E}_r と共に検波されると直流成分に加えて位相誤差 ϕ に従って正又は負のパルスが重なる。ビームローディングの有無にかかわらず検波出力が平坦であれば $\phi = 0$ 、すなわち $\theta = 0$ である。加速管の移相器とCW波の移相器を交互に動かしてこの状態に持っていけばよい。実際に ϕ の測定誤差は 1° 以内であった。この方法によればバンチ巾 $\sim 5^\circ$ に比べて充分な精度で位相合せができる。

位相合せの時にビームローディングの有無による波形の比較をするため、現在は入射のタイミングをずらす為、遅延回路のヘリポートを動かしている。Fig 7 に現在のタイミングのブロックダイアグラムを示す。この図の*印の処へ Fig 8 のような回路を挿入することにより自動的にNパルス毎に入射電子のタイミングをはずすことが出来るので、タイミング回路には手と触れずに加速のRF電力と入射電子との位相誤差をオシロの同一画面で同時に見る事が出来る。この装置を用いれば初期調整の時ばかりではなく実験中でも $N > 100$ としておけば実験に悪影響を与えずに常時位相の監視が出来る。

参考文献

G. A. Loew, "Non-synchronous Beam Loading in linear Electron Accelerator", Rept. No. ML-740
 Microwave Laboratory, Stanford University, Stanford, California (August)
 H. A. Hogg et al "§12 The Phasing System" in "The Stanford Two-mile Accelerator"
 edited by R. B. Neal, W. A. Benjamin, Inc. New York, (1968)
 今野 收 他 "核理研リニアックの励振系改造" 2204 リニアック技術研究会, 川渡 (1976)

Table 1

| | A 2 | A 3 |
|----|------|------|
| 1 | 206° | 108° |
| 2 | 190° | 96° |
| 3 | 245° | 44° |
| 4 | 224° | 66° |
| 5 | 187° | 50° |
| 6 | 203° | 88° |
| 7 | 220° | 78° |
| 8 | 224° | 107° |
| 9 | 218° | 108° |
| 10 | 212° | 71° |
| 11 | 248° | 113° |
| 12 | 180° | 111° |

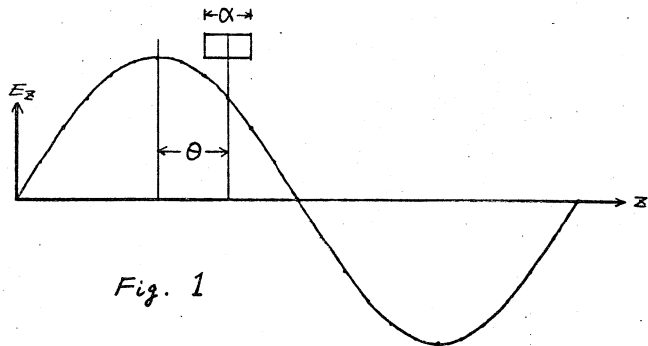


Fig. 1

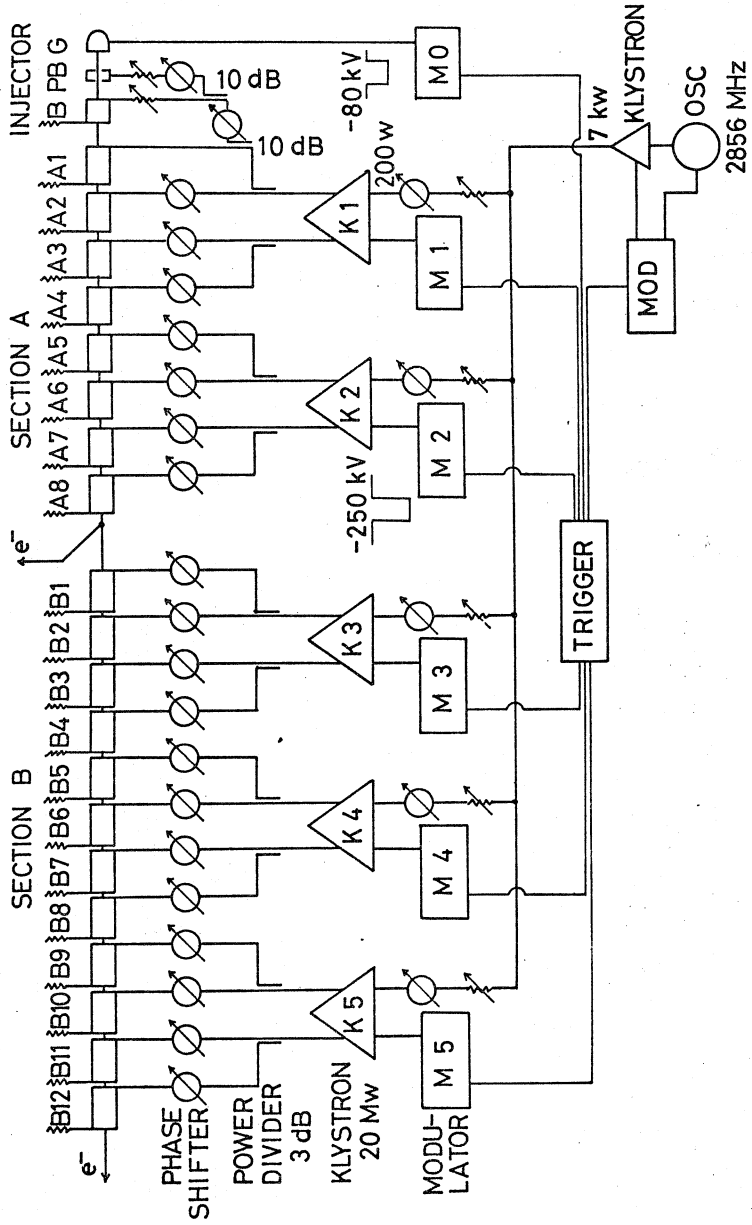


FIG 2 BLOCK DIAGRAM OF THE ELECTRIC ACCELERATOR COMPONENTS

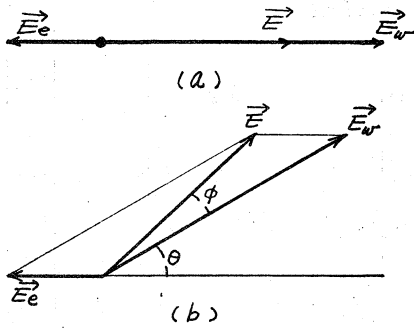


Fig. 3

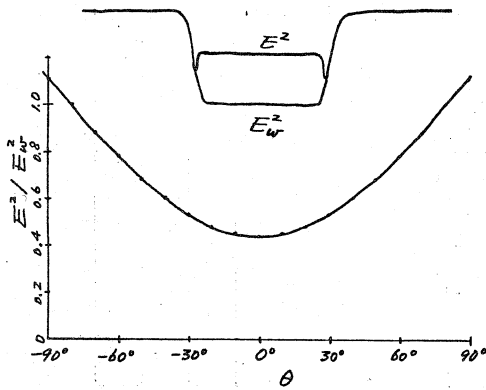


Fig 4

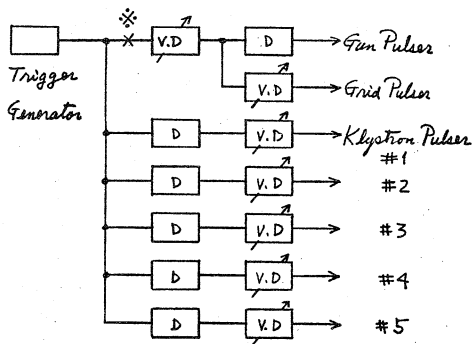


Fig. 7

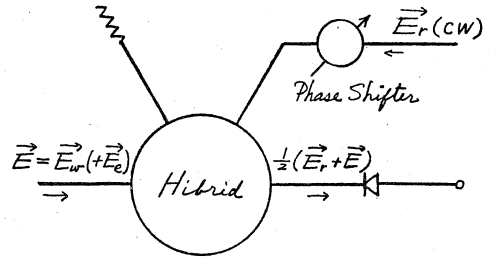


Fig. 5

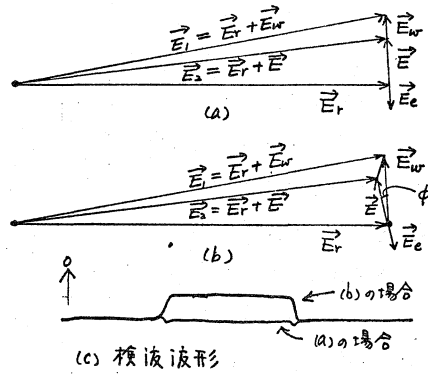
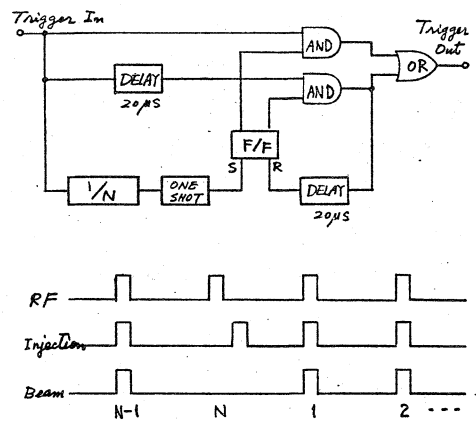


Fig. 6



$N = 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, \infty$

Fig. 8