

電子ビーム用線型加速器と円型加速器間の RF を同期化する新しい方法

川島祥孝¹、安積隆夫、高嶋武雄

〒679-5198 兵庫県佐用郡三日月町光都 1 - 1 - 1

SPring-8, 高輝度光科学研究センター放射光研究所 加速器部門

概要

新しく開発された電子ビーム用線型加速器と円型加速器の RF 同期方法は線型加速器において電子ビームがパルス的に発生することに注目し、円型加速器の RF を基準にして線型加速器の RF を電子発生から加速そして出射までの必要な時間だけ発生する。発生した線型加速器の RF と円型加速器の RF は自動的に同期化される。この方法によると両加速器は全く勝手に好きな RF を選択することができる。それも全く任意の周波数について両 RF は新しい同期法により自動的に同期化される。従ってこれまで同期化が不可能と考えられていた任意の独立した 2 つの周波数についてもできるようになる。その方法について述べる。

1. はじめに

電子加速器施設において、線型加速器の周波数と円型加速器の周波数は全く異なった周波数を使っている。例えばヨーロッパでは円型加速器に $f(\text{circ})=500$ MHz、そして線型加速器には $f(\text{linac})=3000$ MHz (3 GHz) を使い両周波数には $f(\text{linac})=6 \times f(\text{circ})$ の関係を保つように周波数を選んでいる。こうすることによって円型加速器と線型加速器の RF が完全にお互いの位相差を一定に保つように作られている。その結果線型加速器のビームは円型加速器へ効率よく入射することができるようになる。さらに円型加速器のビーム蓄積パターンも容易にできるようになる。ところが SPring-8 では線型加速器の周波数は 2856 MHz であり、円型加速器の周波数は KEK の TRISTAN 計画で開発されたクライストロンを利用できる利点を考慮して 508.58MHz を使った。これらの RF には上記したようにお互いの周波数の間には簡単な整数比となる関係は無い。従って世界に全く存在しない方法でかつ新しく両方の周波数を同期する方法を考えなくてはならない。新しい周波数同期の方法の手がかりとなった注目点は線型加速器の電子ビームがパルスで運転されていることである。円型加速器と異なり線型加速器は電子ビームを電子銃から出射し加速そして別の円型加速器に電子ビームを渡すほんのわずかなマイクロ秒以下の間だけ RF を必要とする。ということは円型加速器の RF を用いて線型加速器が必要とするわずかな時間だけ円型加速器の RF か

ら線型加速器の RF を作れば自動的に 2 つの周波数は同期する。これが我々が開発した 2 つの周波数を同期させる方法の基本の考えである。以下 2 つの RF を同期化する新しい方法について説明する [1]。このアイデアはどのような任意の周波数をもってきてもほとんど応用可能であると考えている。

2. 新しい同期化の基本方法について

SPring-8 で作った二つの RF を同期化する方法について具体的に説明する。装置は任意波形発生器と逓倍器から構成される。それらの装置に対し物理的制約から規定される条件がある。まず最初に蓄積リング側の 508.58MHz から線型加速器の 2856MHz を作る方法を示す。508.58MHz を任意の正の整数 N で割った値を f_1 とするとつぎのようにかける。

$$f_1 = (508.58 \text{ MHz} / N) \quad (1)$$

得られた値 f_1 に再び任意の正整数 M をかけると

$$f_2 = f_1 \times M = f_1 \times (M_1 \times M_2) \quad (2)$$

という値 f_2 が得られる。ここで M_1, M_2 も正の整数であり、さらに M_2 は偶数でなくてはならない。その理由はあとで説明する。この f_2 の値が線型加速器の周波数と一致しているのが一番良い。この値と線型加速器の真の周波数 2856MHz との差を f_3 とすると、

$$f_3 = 2856 \text{ MHz} - f_2 \quad (3)$$

と書くことができる。任意波形発生器から出力される周波数 f_4 は、

$$f_4 = f_1 \times M_1 = (508.58 \text{ MHz} / N) \times M_1 \quad (4)$$

の式から得られる値の周波数を発生する。逓倍器は任意の周波数 f_4 の偶数倍の周波数のみ作ることができるので、ここでは M_2 を逓倍器の倍率の値とする。そうすると M_2 は上述したように偶数となる。 M_2 の値が制限されたので M_1 の取りえる値も自然と制限される。例として f_3 が最小になるような N と M について 1 から 10,000 の値の範囲で計算機で求めると $N = 921, M = 5172$ という値が得られる。この場合、 f_3 は 244Hz となる。 M を分解して偶数を用いて書き換えると、

$$M = 5172 = 2586 \times 2 = 1293 \times 4 \quad (5)$$

となる。ここで M_2 として 4 という偶数をとると M_1 は自動的に 1293 となる。従って任意波形発生器で作る信号の周波数 f_4 は

¹ E-mail: kawasima@spring8.or.jp

$$f_4 = f_1 \times M_1 = (508.58 \text{ MHz} / 921) \times 1293$$

$$= 713.999 \text{ MHz}$$

となり円型加速器の周波数より高い値となる。このように単純に f_3 の値が最小値になるような N, M を選択することができない。我々が N, M_1, M_2 を選ぶ時に使った条件を列挙すると (1) f_3 の値は小さい程よい (2) 整数 M_2 の値は通倍器の倍率なのでこれがあまり大きい値にならない、40 以下になるように選択 (3) 任意波形発生器から出力される周波数はリング加速器の周波数より小さく、かつできるだけ狭帯域のバンドパスフィルターが使用できる波長領域を選択する、という条件で探した。我々の場合まず通倍器の倍率を 32 と決めた。その条件の下、できるだけ f_3 の値が小さいものを探すと N と M_1 はそれぞれ $N=359, M_1=63$ という値が得られた。これから任意波形発生器で作る周波数は

$$f_4 = (508.58 \text{ MHz} / 359) \times 63 = 89.249415 \text{ MHz} \quad (6)$$

という値が得られる。これを通倍器に入力すると

$$f_2 = f_4 \times M_2 = 89.24915 \text{ MHz} \times 32$$

$$= 2855.981281 \text{ MHz} \quad (7)$$

となる。これが線型加速器の RF となる。このように任意波形発生器から作られる周波数は必ずリング加速器の周波数を用いて作られなければならない。

3 . 実際に 2856MHz を作る

前章で得られた値を基本として SPring-8 の場合、蓄積リングの周波数 508.58MHz から線型加速器の周波数 2856MHz を作るブロック図を図 1 に示す。任意波形発生器に付いている外部クロック入力部に蓄積リングの RF を入力する。さらに線型加速器のガントリガー信号の一つを任意波形発生器から 89.249415MHz を作るためのスタート信号として入力する。任意波形発生器 (AWG) は一般に市販している製品を手に入れる。我々はソニーテクトロニクス製の AWG2041(8 bit) または AWG500(10 bit) を購入した。これらの市販製品は 8bit または 10bit の D/A コンバーターを用いて任意の波形を出力することができる。出力された 89.249415MHz の信号にできるだけ狭帯域のバンドパスフィルター(BPF)を挿入しなくてはならない。BPF を入れない場合、出力信号をスペクトラムアナライザーで周波数成分に分解してみると 89.249415MHz 信号の周りにサイドバンドとして多くの不必要な信号が混ざっていることがわかる。これらサイドバンドが多いまま通倍器に入力し 2856MHz を発生させた場合、2856MHz 信号の周りにはメインの周波数に比較し、かなり高いレベルのサイドバンドが立つのが見られる。電子ビームが加速空洞(加速管)の中を通過する間にこれらのサイドバンドの周波数によりビームが揺すられ、結果として電子ビームのエネルギー - 変動として観測される。我々の場合任意波形発生器の直ぐあとに 89.249415MHz のサイドバンドを取り除くために

$\pm 3\text{kHz}$ の狭帯域の BPF を挿入している。これにより任意波形発生器の出力信号は目的の周波数以外全く無くほぼ理想的な周波数が得られた。この狭帯域 BPF を挿入したため発生する 2856MHz 信号が正常な出力レベルまで達するのに時間がかかるので任意波形発生器から約 290 マイクロ秒の間 89.249415MHz を発生することにした。また任意波形発生器に入力している 508.58MHz についても 508.58MHz のサイドバンドが任意波形発生器の出力信号に影響を与えるので機器の入力部において $\pm 1\text{MHz}$ の BPF を挿入している。

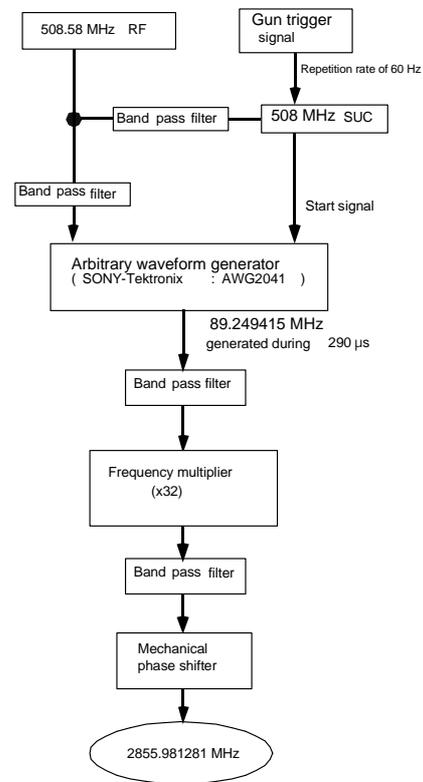


図 1 : 508.58MHz と 2856MHz を同期化するための新しい方法のブロック図

図 1 の方法で作られた線型加速器用 RF 出力信号をスペクトラムアナライザーで周波数分析したところ、(7) 式で得られる値の 2855.981281MHz と完全に一致している。これを図 2 に示す。この図にはシンセサイザーから出力された 2856MHz の信号を並べて示した。我々が作った装置から発信される 2856MHz の周波数は真の値 2856MHz からのずれが約 -18kHz ある。真の値からのずれが電子ビームを加速する際、問題になるか議論する。リング用加速空洞ばかりか線型加速器の加速管にも必ず Q 値 ($Q = f / \Delta f$: f は空洞の共振周波数、 Δf は FWHM における値) が存在する。SPring-8 の線型加速器の場

合 2856MHz の加速管のQ値は 13,500 という値を持つので f は 211.5kHz となる。この周波数幅に比較し-18kHz は十分に小さいので問題にならない。実際これが問題でないことを実験的に確認するためシンセサイザーから出力されている 2856MHz の周波数を 2855.080MHz から 2856MHz まで変えて線型加速器から出てくる電子ビームの物理パラメータを測定した。その結果全く問題ないことが確認された。

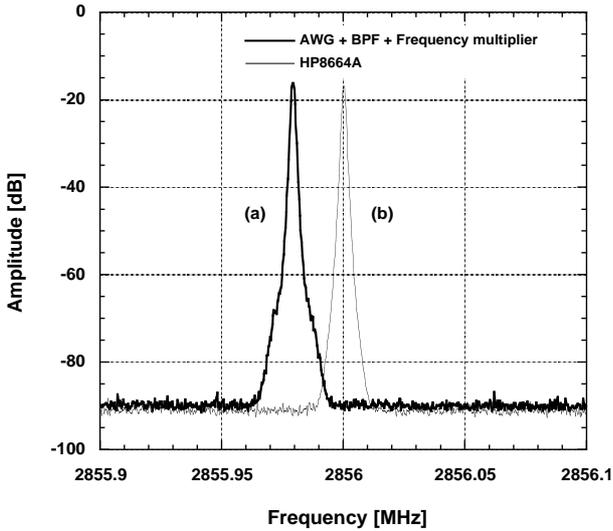


図 2 : (a) 新しく開発した方法で得られた 2856MHz の信号と (b) 従来から用いられているシンセサイザーから発信した信号の比較

我々の作った装置で蓄積リングの RF と線型加速器の RF が同期していることを実際電子ビームを出射して確認する実験を行った。そのブロック図を図 3 に示す。この図でガントリガー信号は 2 つに分岐され一つは任意波形発生器に入る。他方もう一つのガントリガー信号は、508MHz SUC [2] にて約 6 ミリ秒の間遅延させられる。6 ミリ秒遅延した後も当然信号は完全に 508.58MHz に同期している。このパルス信号も光信号に変換され約 150m 送信され最終的に電子銃高電圧発生装置部に送られこの信号により電子ビームが出射される。パルス信号送信によるタイムジッターは小さくなくてはならない。そのタイムジッターは標準偏差値で約 7 ピコ秒と非常に小さい伝送装置を我々が開発したのでそれを用いて送信される [2]。図 3 のメカニカルフェイズシフターを用いて、タイミングとして電子ビームの重心が正確に 2856MHz のゼロクロス点に入るように 2856MHz の位相を微妙に調整する。これは手で電子ビームをパンチャー部の壁電流モニターからのビーム電流強度の安定度を見ながら調整した。その結果、円型加速器の RF と線型加速器の RF が同期することにより得られるメリットが期待したように得られた。

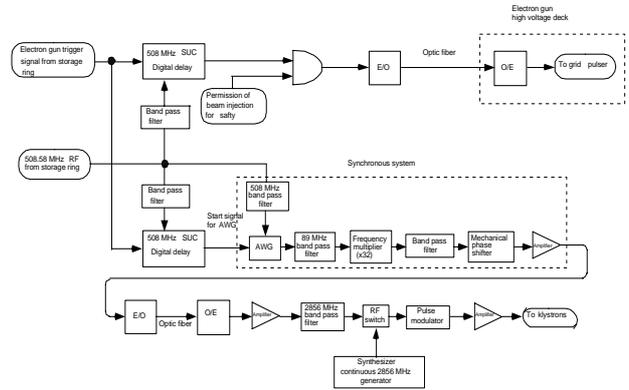


図 3 : 実際に SPring-8 で使用されている同期回路を含む全システムのブロック図

4 . まとめ

ここで紹介した 2 つの RF 同期方法はあらゆる電子ビームを扱う加速器で適用可能である。我々の方法が発明されるまで使用する RF はクライストロンを優先することにより制限されていた。しかしこれからは線型加速器は全く円型加速器のことを考慮することなく独立にかつ任意に好きな周波数を選択しクライストロンを購入すればよい。同じく円型加速器は線型加速器を気にすることなく好きな周波数とクライストロンを選択すればよい。御互い独立に運転しておいて、いざビーム運転する時になってここで紹介した 2 つの RF の同期化の方法を用いて互いの位相を固定すればよい。さらに現在運転中の加速器でも我々の方法を適用することにより少しの設備投資により御互いの位相を固定することが可能となる。SPring-8 の場合、蓄積リングの周波数は毎日潮汐力により周長が変化する [3] ので約 5 分毎に周長を補正 (エネルギー - 補正) するため周波数を変更している。この変化量は線型加速管に対して問題にはならないが、エネルギー - 圧縮システムには問題となる。幸い蓄積リングの周波数は計算機のデータベース上に常に保存されているので、この周波数変化を計算機で読み取りエネルギー - 圧縮システムはその位相を常に補正している。現在 SPring-8 では蓄積リングにある一台のシンセサイザーで線型加速器、ブースターシンクロトロンこれら 3 施設の加速器が完全に同期し安定に運転されている。

参考文献

- [1] Y. Kawashima et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams Vol.4, 082001 (2001).
- [2] H. Suzuki et al., Nucl. Instr. and Meth. Phys. A 431 (1999) 294-305.
- [3] S. Dàte et al., Nucl. Instr. and Meth. A421 (1999) 417-422.