

阪大産研 L バンド電子ライナックタイミングシステムとビーム安定性

柏木 茂^{A)}、加藤龍好^{A)}、三原彰仁^{A)}、岡本主税^{A)}、磯山悟朗^{A)}
山本 保^{A)}、末峰昌二^{A)}、安積隆夫^{B)}、川島祥孝^{B)}

^{A)} 大阪大学産業科学研究所量子ビーム発生科学研究分野
〒567-0047 大阪府美穂ヶ丘 8-1

^{B)} 高輝度光科学研究センター放射光研究所
〒679-5198 兵庫県佐用郡三日月村光都 1-1-1 SPring-8

概要

阪大産研 L バンド電子ライナックのタイミングシステムは、電子銃、クライストロンなどの RF システム及びビーム利用実験系へ、高い時間精度の基準 RF 信号やタイミング信号を供給する。昨年度からの加速器システム全体の更新に伴い、加速器の安定化及び高精度化を目的とし、新たなタイミングシステムの構築を進めている。本稿では、このタイミングシステムについて、加速器の構成や運転モードなども含め説明する。

1 はじめに

大阪大学産業科学研究所では、L バンド電子ライナックからの高強度電子ビームを用いて、遠赤外領域の FEL 及び SASE の原理検証実験やナノ秒からサブピコ秒の時間幅の電子ビームを用いたパルスラジオリシス実験など様々なビーム利用実験が行われている^[1, 2]。こうしたビーム利用実験を行うために、L バンドライナックは、シングルバンチやマルチバンチなど異なる時間構造をもったビームの発生が可能である。

高品質でかつ極めて安定な電子ビームを各ビーム利用実験に供給するため、L バンド加速器の改修が昨年度より行われている。現在までに、クライストロン及びそのパルスモジュレーター、サブハーモニックバンチャー(SHB)用 RF 源、冷却水システム、電磁石電源など、加速器を安定化するための機器更新が行なわれた。これに加えて、プログラマブル・ロジック・コントローラー (PLC) とパーソナル・コンピュータ (PC) を主体とした計算機制御システムを導入し、ビーム調整の再現性を向上させると共にビームライン真空度など加速器状態をモニターする事も可能にした^[3]。そして現在、更新された RF コンポーネントなどを含めた加速器システム全体を時間精度よく安定に動作させるため、新しい L バンドライナックタイミングシステムの構築を進めている。新たなタイミングシステムを導入するで、RF と電子ビーム間の時間 (位相) 揺らぎを極めて小さくし、安定にビームをバンチ圧縮・加速することを行う。また、本システムから各ビーム利用実験に供給するタイミング信号とビームを含めた加速器システムとの高精度な同期を実現する事で、高い時間分解能を必要とするビーム利用実験において測定的时间精度向上が期待できる。

今回の新たなタイミングシステムの構築では、極めて安定な加速器基準信号 (1300MHz) を発生させ、その基準信号から RF コンポーネントやレーザーシステムなどで必要な分周 RF 信号およびクロック信号を作り出すことを行

った。そして、各実験系へのタイミング信号の分配には、市販のデジタルディレイと NIM 規格のロジックモジュールを組み合わせて使用し、自由度が高くまた拡張性があるようタイミングシステムの構築を行った。また、既存のタイミングシステムについても時間ジッター測定などを行い、新しいタイミングシステムとの比較なども行った。

2 産研 L バンドライナック

2.1 加速器構成

L バンドライナック入射部の構成は 100kV 直流型熱電子銃、3 台の SHB とプリバンチャー、バンチャー、3m 長の L バンド加速管で構成されている。SHB の共振周波数は、2 台が 108MHz、1 台が 216MHz である。1 台の L バンドクライストロンより出力された最大 30MW の RF パワーは、ハイパワー分配器を用いて、プリバンチャー、バンチャー、L バンド加速管へと供給される。L バンド主加速管で加速された電子ビームは、加速管下流の偏向電磁石により、FEL ビームラインとパルスラジオリシスビームラインへとトランスポートされる。その他に第 1、2 照射室へビームを輸送しての様々な電子ビーム照射実験が行われる。

2.2 電子ビーム発生

前述したように、L バンドライナックでは異なる時間構造をもった電子ビーム発生が可能である。電子銃のグリッドに供給するパルス幅を変化させると共に、SHB によるビーム圧縮の有無により、発生する電子ビームのパルス長およびビームパルス内の副バンチ間隔を変化させることが可能である。これらの電子ビーム発生モードは、ビーム利用実験の種類により使い分けされる。

表 1: ビーム発生モード

発生モード	SHB 運転	パルス長	バンチ間隔
シングルバンチ	有	~ 20ps	-
過渡モード	無	5 / 8 ns	0.77 ns
マルチバンチ 1	無	< 8 μ s	0.77 ns
マルチバンチ 2	有	< 8 μ s	9.2 ns

シングルバンチビームの発生においては、1.3GHz の基本加速周波数と SHB に供給される RF の相対的な位相ジッターやこれらの RF 信号と電子銃へ供給されるトリガー信号の時間ジッターが、ビームエネルギーやバンチ圧縮へ直接影響する。また、過渡モードでの電子ビーム発生では電

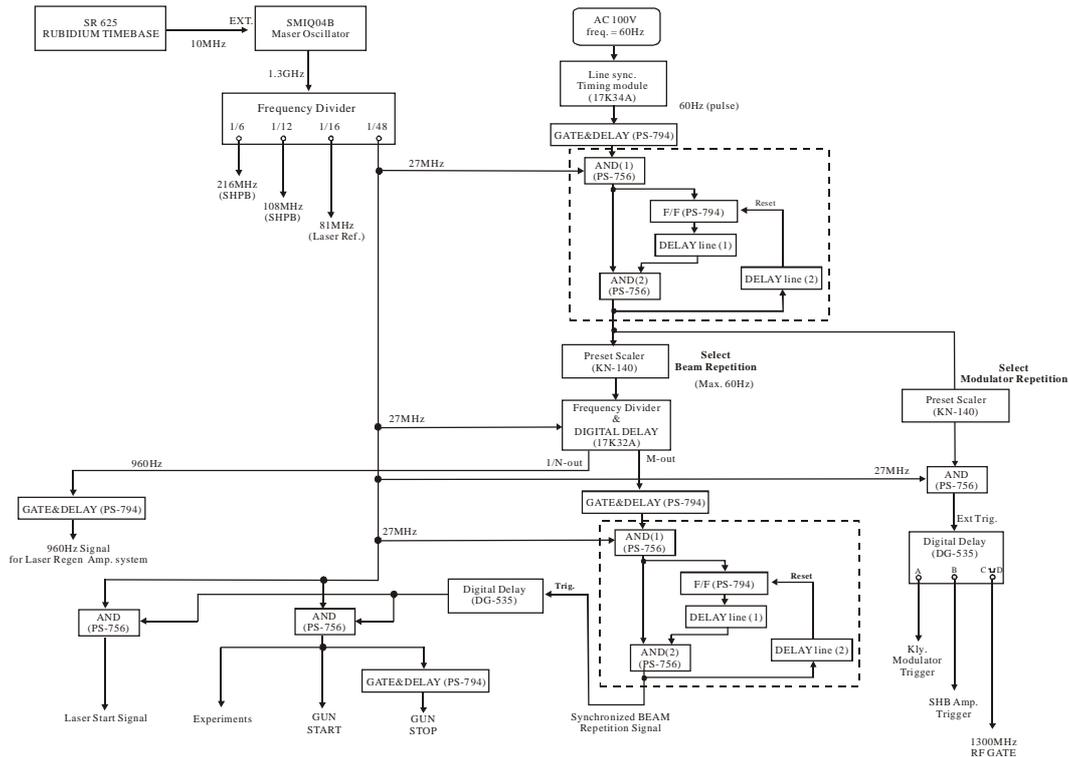


図 1：産研 L バンドライナックのタイミングブロックダイアグラム

子銃より発生された 5~8 ナノ秒の電子パルスが、プリバンチャーとバンチャーにより L バンドの 1 周期毎 (0.77 ns 秒間隔) にバンチ化される。加速管へのビーム入射タイミングは、過渡的ビームローディングによりビームパルス内に生じるエネルギー差を補正するため、加速管のフィリングタイムより前に調整される。そのため、ビームの加速管への入射タイミングと RF パルスの加速管への供給のタイミングが時間的に揺らいだ場合、直接ビームエネルギーの変動になってしまう。

3 タイミングシステム

これまで阪大産研 L バンドライナックで使用されてきているタイミングシステムは、新たなタイミング信号やクロック信号が必要になった場合、システム自体 (ユニット) を改造するしかなく拡張性が不十分であった。このことを踏まえ、今回のタイミングシステム構築では、同期回路などはスタンダードな NIM モジュールを主に使用し、安価に自由度が高く精度の良いシステムにする事を目的の 1 つとした。図 1 に現在構築中の L バンドライナック全体のタイミングシステム図を示す。

まず、安定な加速器の基準信号を発生するために、マスターオシレーター (ROHDE & SCHWARZ SMIQ04B) の外部基準信号に、ルビジウム・タイムベース (Stanford Research Systems SR625) の 10 MHz 出力信号を使用した。これにより、長期的な周波数安定度を良くすることができる。この基準発信機の長時間周波数安定度を測定する方法については現在検討中である。また、加速器では短時間の周波数安定度も極めて重要であるため、ルビジウム・タイムベースを使用した場合のマスターオシレーター (SMIQ04B) の位相ノイズを、時間領域復調法^[4]を用いて測定することを予定している。

マスターオシレーターから出力される 1.3GHz (基本加速周波数) の RF を、分周器を用いて 1/6 (218MHz), 1/12 (108MHz), 1/16 (81MHz), 1/48 (27MHz) に分周した後、サブハーモニックバンチャーなどの各加速器コンポーネントおよびレーザーシステムへと分配する。(分周器出力には、正弦波と NIM レベルのパルス出力がある) ここで使用する分周器の性能が、加速器全体の安定性を大きく左右する。そこで、広帯域のデジタルオシロスコープ (HP54121A (チャンネル部), HP54120B (モニター, 制御部)) を用いて、分周器の各分周信号 (NIM レベル) をトリガーに、1.3GHz の rf 信号を観測し時間ジッターを評価した。108MHz と 27MHz の分周信号 (NIM レベル出力) と基準信号 1.3GHz (rf) 間の時間ジッター (σ) は 2ps 以下であった (測定器の測定エラーは差し引いていない)。また、その他の NIM レベルや正弦波出力の分周信号についても測定を行った結果、50ps 程度の時間差の 2~3 値化した時間ジッターが観測された。原因として考えられるものとしては、4 つの分周信号発生を共通の電源でまかなっているため、その僅かな変動が分周信号に現れている事が考えられる。その他にも、基板上でのクロストークや回路のレベル調整不足、また出力ポート付近での反射などが原因として考えられる。この原因については現在調査中である。

一方、電子銃のグリッドや各実験の測定系などに供給するビームの繰り返りに相当するトリガー信号は、27MHz の分周信号と電源同期のとれた最大 60Hz のパルス信号を同期させる事により作り出される。電源同期タイミングモジュール (DGITEX LABORATORY CO. LTD., 17K34A) により商用電源周波数 (60Hz) に同期した遅延パルスを生じさせる。そして、RF 信号 (48 分周信号: 27MHz) と最大 60Hz のビーム繰り返し信号との同期回路は、図 1 の点線で囲まれた部分に示したように、Phillips 社の標準的な

NIM モジュール (PS-756: Quad Majority Logic Unit, PS794: Quad Gate/Delay Generator) と遅延回路で構成されている。この同期回路部分のタイムチャートを図2に示す。この同期回路の精度についても、サンプリングオシロスコープを用いて同期回路出力信号(ビーム繰り返しパルス)と加速周波数 1.3GHz 間の時間ジッター測定を行った。測定結果は、標準偏差で 5.8ps であった。また、これまで使用されてきたトリガーシステムについても同様にビームトリガーと分周信号間のジッター測定を行った。測定されたサンプル点を見ると数千パルスに何パルスか 100ps オーダーでタイミングが飛んでしまうという問題がある事が分った。このようにタイミングが大きくジッターすると、電子ビームは安定せず加速管の下流まで到達しえないと考えられる。

現在構築中のタイミングシステムでは、同期回路部分より出力されたタイミング信号を直接、分割・遅延しビーム繰り返し信号として各加速器コンポーネントに配ることは行わず、同期回路出力(ビーム繰り返し信号)をトリガーにデジタルディレイ(Stanford Research Systems DG535)を動作させ、それより作り出された任意遅延パルスと加速器全体の基準クロック信号(27MHz)との AND をロジックモジュールによりとり、高精度にパルス遅延・分割することを検討している。DG535 自身は 50ps 程度の遅延時間ジッターを持っているが、ここで必要な任意の遅延パルス(DG535 出力)の時間精度は、基準クロック 27MHz の半周期(18ns)もあれば十分である。この遅延システムの時間精度は、加速器基準信号の 27MHz 分周信号の安定度とロジックモジュールの時間精度で決定される。上記のシステムでどの程度まで時間ジッターを抑え込むことができるか今後測定等を行っていく。そして、電子銃のグリッドに供給するトリガー信号、レーザーシステムへのトリガー信号、その他ビーム利用実験系に供給するタイミング信号の間には、数百マイクロ秒からミリ秒の大きな遅延時間が必要であるが、上の方法を使うことにより、パルスを大きく遅延させる事も、また遅延時間の異なるパルスの数を容易に増やす事も可能である。また、デジタルディレイに DG-535 を使用することにより、GPIO などのインターフェースを使い計算機制御することも可能である。

また図1の中で、ビーム繰り返しの同期信号を作り出す為に、2段に同期回路を構成しているのは、モジュレータの繰り返しとビーム繰り返しを独立にプリセットスケラーを使い設定することができるようにするためと、加速管

に供給する RF パルスとビームタイミング信号(電子銃トリガー)の間にジッターを持たせないためである。Lバンドライナック既存のタイミングシステムでは、27MHz の1周期分に相当する約 37ns の時間ジッターがビームタイミングとモジュレータへのタイミング信号の間で存在する。この時間ジッターは、過渡モードでの加速器運転の場合にエネルギージッターとして問題となってくる。

その他、産研Lバンドライナックのタイミングシステムでは、パルスラジオリシス実験で使用するレーザーアンプシステムへ、960Hz という繰り返しの遅い信号を供給する必要がある。他の加速器の機器と高精度に同期をとるため 27MHz の基準信号を分周して 960Hz 信号を作り出すことにした^[5]。また、SHB アンプなどへ送られるトリガー信号は高い時間精度を必要としないので、クライストロンのトリガー信号をもとに、DG535 を用いて直接遅延時間の異なる複数のパルスを生成する。

4 タイミングシステムとビーム不安定性

現在、Parmela などの計算機コードを用いて、SHB や加速管に供給される RF と電子ビームの時間関係が変化した場合、ビームの安定性にどのように影響を与えるか調べている。また、前述した過渡モードの電子ビームが加速管へ入射するタイミングが変化した場合に、ビームの平均エネルギーがどの程度変動するか計算より求めると、既存のタイミングシステムのように 27MHz の1周期分(37ns)の時間ジッターがあった場合、ビームのエネルギーは約0.6%揺らぐという結果になる。(加速管への入力パワーは 20MW) 今回のタイミングシステムでは、電子ビームと加速管への RF 供給の時間ジッターは数ピコに抑えられているので、このようなエネルギー揺らぎは無い。今後、最終的なタイミングシステムの評価は実際に加速された電子ビームのエネルギーや時間ジッターなどを測定して行いたいと考えている。その際、タイミング系に起因したビーム不安定性であるか、その他の加速器コンポーネントに起因するものかを見極める必要がある。また、ビームシミュレーションでタイミングシステムに必要とされる時間精度を明確にしていきたいと考えている。

5 謝辞

高輝度光科学研究センター (SPring-8) の花木博文先生には、タイミングシステム更新にあたりご協力頂きました。ここに感謝致します。

参考文献

- [1] R. Kato et al., Nucl. Instrum. & Methods A 483 (2002) 46-50
- [2] 古澤孝弘 他、Proceedings of the 27th Linear Accelerator Meeting in Japan, Kyoto, Aug. 1-9, 2002 pp.225 (7P-37)
- [3] 加藤龍好 他、Proceedings of the 28th Linear Accelerator Meeting in Japan, Ibaraki, , 2003 pp.51-53 (WD-5)
- [4] H. Tsuchida, Opt. Lett. 23 (1998) 286
- [5] H. Suzuki et al., Nucl. Instrum. & Methods A 431 (1999) 294-305

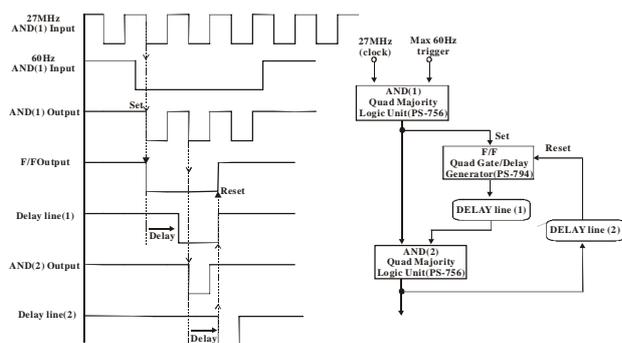


図2: 同期回路部分のタイムチャート