

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

柏木 茂^{1,A)}、磯山 悟朗^{A)}、加藤 龍好^{A)}、三原 彰仁^{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、マイクロ波空洞、及びビーム利用実験用のレーザーシステムなどへ精度の高いタイミング信号を供給する必要がある。昨年度からの加速器システム全体の更新に伴い、タイミングシステムについても安定化及び高精度化を行っている。現在、我々が構築しているタイミングシステムは、スタンダードなNIMモジュールやデジタルディレイを組み合わせて用いる事で、安価に自由度が高くかつ精度の良いシステムとなっている。また、RF発振器のタイムベースにルビジウム原子時計を用いることで、1.3GHzの基準RF信号を極めて安定に発生させシステム全体の安定化を行った。研究会では、このタイミングシステムの構成および性能評価測定の結果について説明する。

1. はじめに

大阪大学産業科学研究所のLバンド電子ライナックは、高強度の単バンチ電子ビームをはじめ、ビームパルス幅やバンチ間隔の異なる幾つかのモードでの電子ビーム発生が可能である。これまでの約25年間の加速器稼働で、電子ビームを用いた様々なビーム利用実験が行われてきている。最近では、遠赤外領域のFELおよびSASEの原理実証実験^{[1][2]}、磁気パルス圧縮によりサブピコ秒電子ビームを発生させるのパルスラジオリシス実験^[3]などが行われている。こうした電子ビーム利用実験の高度化に伴い、加速器に要求される精度や安定度が高くなってきている。昨年度から、クライストロン及びクライストロン・

モジュレータ、サブハーモニックバンチャー用RF源、冷却水システム、電磁石電源など、加速器を安定化させるための機器更新が行なわれた^[4]。また、これまで電磁石の電流調整などの加速器調整は主に手動で行われていたが、プログラマブル・ロジック・コントローラ（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することにより、制御面での高度化および信頼性の向上を行った^[5]。そして、加速器システム全体を安定に動作させるため、また各ビーム利用実験の測定システムの高精度化を目的に、タイミングシステムの更新も今回のLバンド加速器改造で行った。

2. 阪大産研Lバンドライナック

Lバンドライナックは高強度シングルバンチビーム加速のために、入射部は100kV直流型熱電子銃、3台のサブハーモニックバンチャーとプリバンチャー、バンチャー、3m長のLバンド加速管で構成されている。サブハーモニックバンチャーの共振周波数は、2台が108MHz、1台が216MHzである。一台の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。入射部の構成からも分るように、電子ビームを安定にバンチ圧縮し加速するためには、1.3GHzの基準信号に対してサブハーモニックバンチャーに供給される108MHz、216MHzのRF信号、さらには電子銃のグリッドに供給されるトリガーパルスの相対的な時間ジッターをできる限り小さく抑える必要がある。

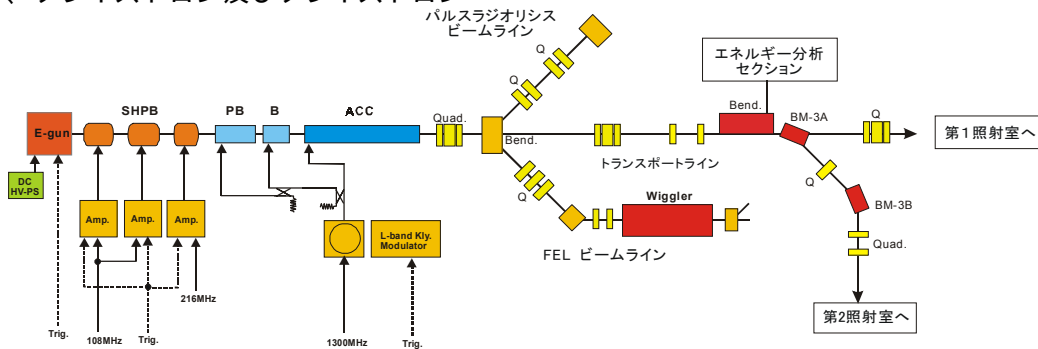


図1 産研Lバンド電子ライナック概略図

¹ E-mail: shigeruk@sanken.osaka-u.ac.jp

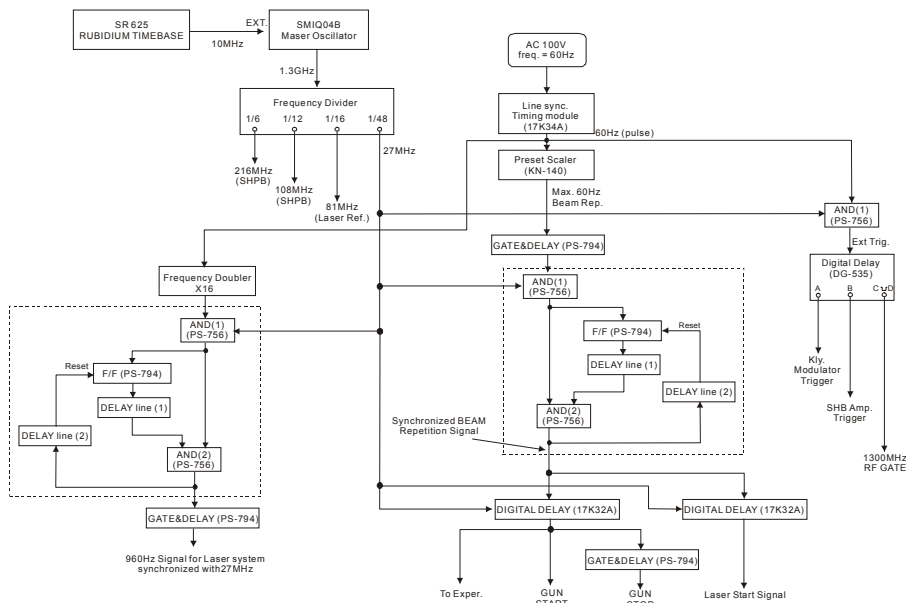


図2 産研Lバンドライナックのタイミングブロックダイアグラム

産研Lバンドライナックでは、先に述べたようにFEL実験、パルスラジオリシス実験をはじめ様々なビーム利用実験が行われている。図1は産研Lバンドライナックの概略図であるが、3m加速管下流の偏向電磁石を使い、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する。その他にも第1、第2照射室へビームを輸送して、様々な電子ビーム照射実験が行われている。中でもパルスラジオリシスビームラインでは、パルスレーザーを用いてのストロボ・スコピック法によるサブピコ秒時間領域の物理化学現象を観測する実験が行われている。そのため、これらの実験に加速器側から極めて安定で精度の良いタイミング信号を供給する必要がある。更に、その他のビーム利用実験でも測定のためにビームに同期したタイミング信号を必要とする場合が多くあるため、今回のタイミングシステムの更新ではこうしたビーム利用者の要求にあったタイミング信号を供給できる自由度の高いシステムにする事にも重点をおいた。

3. タイミングシステム

今回のタイミングシステムの構築では、極めて安定した加速器基準信号を発生させ、その基準信号より加速器の各コンポーネントに必要な信号を作り分配することを行った。また、既存のタイミングシステムは、新たなタイミング信号が必要になった場合、システム自体を改造するしかなく拡張性が不十分であった。そうしたことを踏まえ、本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モジュールタイプを主に使用し、安価に自由度が高く精度の良いシステムにする事を心がけた。図2に構築中の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。このルビジウム・タイムベースの精度は、約 $\pm 5 \times 10^{-11}$ と大変良い。今回、このマスターオシレーター出力の周波数ジッターの測定を試みたが、現在我々が所有している測定器ではジッターが小さく測定する事はできなかった。

マスターオシレーターからは、加速器の基準信号として、加速周波数である1.3GHzのRFを発生させ、それを分周器で1/6 (218MHz), 1/12 (108MHz), 1/16 (81MHz), 1/48 (27MHz) に分周して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へ分配する。(分周器出力には、正弦波とNIMレベルのパルス出力がある)これらの分周信号間に相対的な時間ジッターがあると、パルス毎に異なる位相でビームがバンチングおよび加速されるため、ビームが不安定になってしまう。高速デジタルサンプリングオシロスコープ(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の分周信号と加速周波数1.3GHz間の時間ジッターは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、その他の分周信号に関しては、50ps程度の2値化した時間ジッターが観測された。回路内でレベル調整が不十分であるか、または出力ポート付近での反射などが原因として考えられる。

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し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。まず、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が発生させ、プリセットスケーラーを使いビーム繰り返しを設定

する。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2の点線で囲まれた部分に示したように、Phillips社のスタンダードな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。同期回路部分のタイムチャートを図3に示す。ここでの同期精度は、ビームの安定度に大きく影響する。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（測定結果の例を図4に示す）。また、従来使用していたトリガージェネレーターについても同様のジッター測定を行った。測定結果は、標準偏差で5.9psと新しい同期システムと同程度であった。しかし、測定されたサンプル点を見ると、頻度は低いが100psオーダーでタイミングが飛んでしまっているのが観測される。現在、この原因は不明であるが、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ないと考えられる。

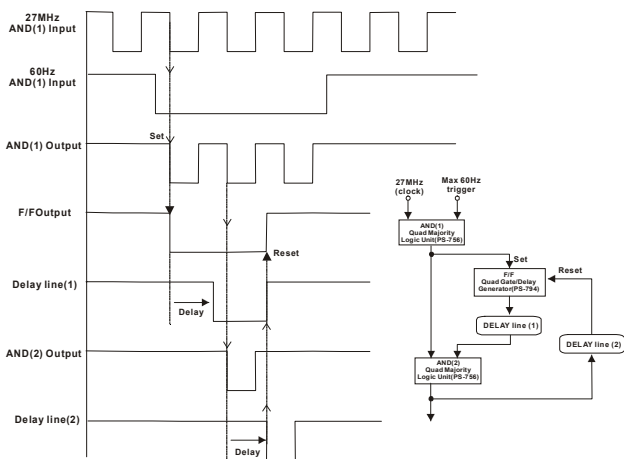


図3 同期回路部分のタイムチャート

また、電子銃のグリッドに供給するトリガーパルスは、実験系に供給するタイミング信号よりも、ミリ秒に近い時間だけ遅延させる必要がある。そのため、Spring-8などでも使用されている時間ジッターが小さくかつ十分な時間遅延をする事が可能な30ビットカウンター（DGITEX LABORATORY CO. LTD., 17K32A）を使用することを検討している^[6]。

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などで使用するレーザーシステムへの基準信号を作り出す必要がある。例えば、81MHzの分周信号や960Hzのタイミング信号は、フェムト秒レーザーのシード共振器やレーザーアンプのQスイッチのトリガーとして供給される。また、クライストロン電源、サブハーモニックバンチャーのアンプなどへ送られるトリガー信号は、デジタルディレイ(Stanford Research Systems DG535)を用いて相対的な時間関係を調整する。

4. 今後の予定

これまでに、タイミングシステムの分周器や同期回路の精度などについて測定を行ってきた。まだ、十分な性能の得られていないコンポーネントもあるので、原因を明確にし修正を行っていく。そして、加速器システム改造後、試験ビーム運転中に新しいタイミングシステムのテスト行っていく、今秋には全面的なタイミングシステムの更新を予定している。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ビーム特性を測定し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よるものかの見極めも大変重要だと思われる。また、ビームシミュレーションを行い、タイミングシステムに必要とされる時間ジッターの許容範囲などについても明確にしていきたいと考えている。

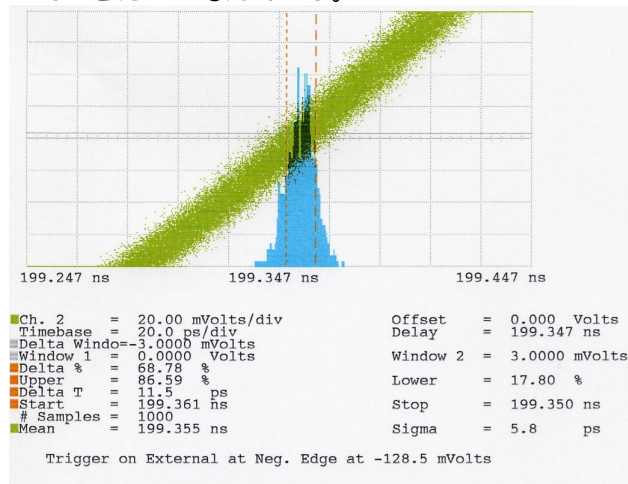


図4 27MHz繰り返し信号とビーム繰り返し信号（最大60Hz）の同期精度測定結果例（ $\sigma = 5.8\text{ps}$ ）

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 **445** (2000) 169-172
- [2] R. Kato et al., Nucl. Instrum. & Methods A **483** (2002) 46-50
- [3] 古澤孝弘 他、“産研サブピコ秒パルスラジオリシス装置の現状”, Proceedings of the 27th Linear Accelerator Meeting in Japan, Kyoto, Aug. 1-9, 2002 pp.225 (7P-37)
- [4] 加藤龍好 他、“阪大産研Lバンドライナックの改造と性能評価”, 本研究会
- [5] 加藤龍好 他、“FL-net上に構築されたPLCベースの加速器制御システム”, 本研究会
- [6] H. Suzuki et al., Nucl. Instrum. & Methods A **431** (1999) 294-305