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)}、磯山悟朗^{A)}、加藤龍好^{A)}、三原彰仁^{A)}、岡本主税^{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、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行っている。 本稿では、現在構築中のタイミングシステムについて、加 速器構成、発生電子ビーム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の L バンド電子ライナックで は、高強度の電子ビームを用いた様々なビーム利用実験が 行われている。最近では、遠赤外領域の FEL 及び SASE の 原理検証実験⁽¹⁾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⁽²⁾などが行われてい る。阪大産研Lバンドライナックでは、こうしたビーム利 用実験を行うにあたり、それぞれのビーム実験の要求に応 じた、異なる時間構造(シングルバンチ、マルチバンチ) をもったビーム発生が可能である。

昨年度より、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 行われている。現在までに、クライストロン及びクライス トロン・モジュレーター、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。その他、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、制御面での高度化および信頼性の向上を行った^[3]。 これらの更新された機器を安定に時間精度よく動作させ、 さらなる電子ビームの安定性向上を目的とし、現在新しい Lバンドライナックタイミングシステムの構築を行ってい る。このタイミングシステムの高度化は各ビーム利用実験 の測定システムの高精度化につながる。

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。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。この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 の分周 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位相・時間 ジッターをできる限り小さく抑える必要がある。

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。

発生モード	SHB	パルス長	バンチ間隔
	運転		
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 µs	0.77 ns
マルチバンチ2	有	< 8 µs	9.2 ns

表1:ビーム発生モード

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子銃より発生された 5~8 ナノ秒の電子パルスが、プリ・



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

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(の)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。

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。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 発生させる。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 用してき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 であ ったが、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ってい るのが観測された。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 ないと考えられる。

我々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 わない。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となる27MH信号とのANDをロジッ クモジュール (PS-756) を使ってとることで、高精度にパ ルスの分割・遅延を実現する。デジタルディレイの 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、27MHz の加速 器基準信号の安定度とロジックモジュール (PS-756) の時 間精度で決定され、5ps以下の時間精度は容易に実現でき る。そして、電子銃のグリッドに供給するトリガーパルス、 レーザーシステムへのトリガー信号、そのほかパルスラジ オリシス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も容易に増やす事が 可能である。更に、ここでデジタルディレイに DG-535 を 使用することにより、GPIB などのインターフェースを使 い計算機制御も可能である。



は2.前期回路部分のタイムノヤート また図1の中で、ビーム繰り返しの同期信号を作り出 す際に、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 ー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 の一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。この信号は、ナノ秒オーダーの時間安定度 でよいが、今回は 27MH z の基準信号を分周して作り出 すことにした^[5]。また、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

- 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