

KEK 電子入射器におけるタイミングシステム

古川 和朗^{*A)}、諏訪田 剛^{A)}、上窪田 紀彦^{A)}、草野 史郎^{B)}、普家 聡^{B)}

^{A)} 高エネルギー加速器研究機構 (KEK)、〒 305-0801 茨城県つくば市大穂 1 - 1

^{B)} 三菱電機システムサービス、〒 305-0045 茨城県つくば市梅園 2 - 2 - 8

概要

KEK の電子入射器のタイミングシステムは、入射器内の電子銃、マイクロ波、及びビームモニタなどの 100 を超える機器に精度の高いタイミング信号を供給している。このシステムでは、クロックとタイミング信号を重畳させる機構などを導入し、加速ビームの高い安定度を得る工夫をしている。また、下流の 3 つの加速器への入射のために同期を取る機構を用意している。このタイミングシステムの詳細と利用の実際について説明する。

1. はじめに

KEK の電子陽電子入射器は KEKB リングへ 8 GeV の電子と 3.5 GeV の陽電子を、PF リング及び PF-AR リングへ 2.5 GeV または 3 GeV の電子をそれぞれ入射している [1]。リングにおける実験効率を向上させるために、入射ビームにも高い安定度が要求され、長期間にわたる高安定なビーム加速を実現するためのさまざまな機構が導入されている [2]。

KEKB 入射のためのタイミングシステムにおいても、以前の TRISTAN プロジェクトに比べると格段に精度の高いタイミング信号が必要となるため、全面的なシステムの再構築が行われた。特に、リングの rf との同期精度の向上や、エネルギー増強のために入射器全体にわたって使用されたマイクロ波パルス圧縮器 (SLED) への信号供給に注意が払われている。

2. タイミングシステムの構成

入射器のタイミングシステムでは、ビームタイミング信号、マイクロ波発生用トリガ信号、ビームモニタ用トリガ信号、などが必要に応じて精度よく生成されている。それらは基本信号の発生と分配機構、15ヶ所の副トリガステーションにおけるの遅延信号の生成機構などを通して加速器の各構成機器に供給されている。

2.1. 基本クロック

以前の TRISTAN 蓄積リングへの入射には、300ps 程度のタイミング精度で十分であったため、入射器とリングの rf は非同期で、入射タイミングはそれらの間の 2 重同期回路で生成されていた。しかし、KEKB リングに入射されるビームはサブハーモニックバンチャ (SHB)

を用いて、入射器の単バンチャとして加速され、入射には 30ps 以下 (リングの入射位相にして 5 度以下) の精度が求められるので、利用される複数の rf 周波数は表 1 のように整数関係を持つことになった。

表 1: KEKB 入射器の基本周波数

Purpose	Ratio	Frequency
Fundamental	-	10.38546 MHz
Linac SHB1	x11	114.24 MHz
Linac SHB2	x55	571.2 MHz
Linac Main	x275	2856 MHz
KEKB Ring	x49	508.8873 MHz

これらは入射器棟内に置かれた周波数分周通倍器で生成され、マイクロ波ドライブシステムなどに分配されている [3]。タイミングシステムではこれらの周波数のうちあとで述べるように 114MHz と 571MHz をクロックとして利用している。これらの周波数は基本周波数 (10MHz) にして 0.1Hz 単位で変更が可能で、KEKB リングの周長が日格差などで変動した際に軌道補正のソフトウェアによって変更が行われる。

PF や PF-AR の入射に際しては約 2ns 幅の複数バンチャで加速しており、また条件が厳しくないため、リングの rf 周波数との同期は取っておらず、あとで述べるように巡回周波数とだけ同期を取っている。

これらの rf 周波数とは別に、運転用パルスモジュレータの繰り返し周波数 (ビームの最大繰り返し周波数) である 50Hz は、電源等のノイズの影響を低減させるために、商用周波数に同期させて生成している。

2.2. ビームタイミング信号

ビームタイミングは 50Hz タイミングをリングの巡回周波数 (PF は 1.6MHz、PF-AR は 0.8MHz) に同期させて作っている。ビーム繰り返しは最大で 50Hz であるが、分周して繰り返しを少なくすることができる。さらに、必要に応じてリングのバケットを選択する遅延が追加される。KEKB については上に述べたように、基本周波数 10MHz に同期した上で、5120 個のうちのひとつのバケットを選択するので、最大 0.5ms の遅延となる。

2.3. クロック及びタイミング信号の分配

以前の TRISTAN プロジェクトにおいては、ビーム以外のパルスマイクロ波生成等のためのタイミング信号

* <kazuro.furukawa@kek.jp>

には 30ns 程度のジッターを持った非同期の遅延信号が主に使われていた。しかし、KEKB においては安定度の要求と SLED を使用した高電界加速のために精度の高いタイミング信号が必要になった。

そこで、入射器全体にクロック信号を分配し、クロックを計数することにより遅延信号を生成することにした。加速用マイクロ波のドライブラインには 2856MHz が使われているが、遅延信号を作るためには不都合なため、SHB2 に使用される 571MHz をクロックとして分配することにした。

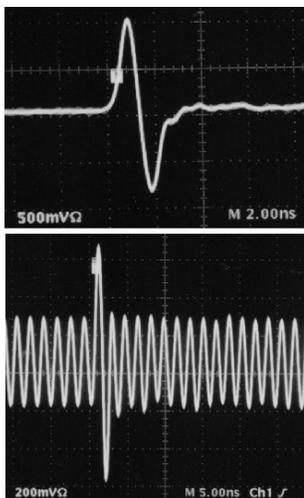


図 1: 50Hz パルス信号(上) 及び 571MHz クロックと 50Hz 信号が重畳された伝送信号(下)

50Hz の各パルスについてタイミング信号が必要になるわけだが、571MHz クロックと 50Hz のタイミング信号を別々に伝送すると、信号伝播の遅れの差により、クロックのずれが懸念される。それを避けるため、クロックとタイミング信号を重畳させる機構を主トリガステーションに用意し、1 本の同軸ケーブルで伝送することにした(図 1)。その信号は同軸ケーブルから方向性結合器によって 1 次的な副トリガステーション 9 ヶ所、及び KEBK 入射用の電子銃ステーション(A1 電子銃)に導かれ、クロックとタイミング信号に再生される。さらに 2 次的な副トリガステーション 5 ヶ所にも導かれる。(表 2)

2.4. 遅延タイミング信号の発生

副トリガステーションでは、受け取った 50Hz タイミング信号を起点にして、571MHz クロックを計数することにより各機器に必要な遅延信号が生成される。従って、1.75ns を単位として遅延が選べることになる。遅延計数には Timing-Delay-4 (TD4) と呼ぶ ECL カウンタを内蔵したモジュールを使用しているが、各ステーションの都合により、VME、CAMAC、RS232C が制御接続に

表 2: タイミング信号の伝送と発生

Station	Beam Station	1 次副 Station	2 次副 Station
場所	A1 電子銃	Sub-booster	副制御室
数	1	9	5
クロックの分離	TD4R	Trigger-Receiver	1 次副 Station より
遅延信号の発生	TD4R	TD4	TD4V
Field Bus	RS232C	CAMAC	VME
主な用途	ビーム	低レベル rf	モジュレータ
		ビームモニタ	

用いられ、それぞれ TD4V、TD4、TD4R と呼ばれている。カウンタは 16bit なので、最大 114 μ s の遅延を行うことができる。¹

機器毎に必要なタイミングが異なるため、それぞれ別に TD4 を設置してあり、現在は合計約 150 台になっている。それらの TD4 (及び loop3 遅延モジュール) は、それぞれに対応したドライソフトウェアを通して、階層的な制御ソフトウェアで他の加速器機器と同様に統一的に管理され、運転ソフトウェアや加速器のオペレータからはハードウェアの違いを認識する必要はない [4, 5]。

2.5. パルスマイクロ波用タイミング信号

マイクロ波用タイミング信号としては、低レベルマイクロ波生成用のタイミングと、大電力クライストロンモジュレータの高圧パルスタイミングがある。

低レベルマイクロ波については、各 1 次副トリガステーションにおいて、パルスエンベロープと SLED の位相反転タイミングが作られ、サブブースタクライストロンに供給される。そこで生成されたパルスマイクロ波がそのセクタ内の大電力クライストロンに送られることになる。この SLED の位相反転タイミングは、大電力マイクロ波の安定度に直接影響するが、上に述べたような機構により十分な精度を持って供給されている。

クライストロンモジュレータの高圧タイミングについては、各 2 次副トリガステーションにおいて、クライストロン毎に TD4V が用意され、個々に遅延を決めた上で信号がモジュレータられるようになっている。

大電力クライストロンは現在 59 台設置されているが、通常は数台が障害時の交換用として待機(スタンバイ)モードに置かれ、運転には使用しない。これらのスタンバイクライストロンもすぐに使用できるように、ビームとはずらしたタイミングで仮の運転状態にしておく必要がある。そのために、低レベルマイクロ波のエンベロー

¹一部の 2 次副トリガステーションでは、loop3 という入射器独自の通信規格に接続された非同期の遅延モジュールが使われているが、2002 年夏に TD4V に置き換わる。

プについては 57 μ s (TD4 の遅延レンジの半分) 離れた 2 つのパルスを供給し、高圧タイミングでそのいずれかを選択する。その選択の組合せは、ビーム種別によって異なり、ビームモードを変更したときにソフトウェアにより切り替えている [6]。

2.6. ビームモニタ用タイミング信号

ビームモニタ用のタイミング信号も上と同様の仕組みを用いて、各 1 次副トリガステーションにおいて発生させている。しかし、ビームの繰り返しは 50Hz よりも低いこともあるので、50Hz タイミング信号の直前に遅いゲート信号を送って、ビームを区別できるようにしている。

ゲート信号は主トリガステーションで、ビーム繰り返し、またはそれより少ない 1Hz や 5Hz など 4 種類を生成して、対より線によって 1 次副トリガステーションに分配されている。副トリガステーション側の TD4 には、50Hz タイミング信号にそれぞれ必要なゲートをかけて、遅延信号が供給される。例えば、ビーム位置モニタのデータ収集用には観測モードによって、1Hz や 5Hz などの信号が配られる。

信号は、19 のビームモニタステーション、2 つのワイヤモニタステーション 4 つのストリークカメラステーションに送られている。これらのステーションからは、ビーム位置モニタ 90 台、ランダムシャッタカメラ 10 台、ワイヤスキャナ 14 台などへタイミング信号が接続されている。また、入射用のセプタム、キッカーのトリガもこの仕組みで用意されている。

3. 考察

図 2 はストリークカメラで観測したビームのパンチ構造である。ビームの観測幅約 9ps はシミュレーションとよく一致する。このことは、タイミングシステムから供給されているビームタイミングとストリークカメラのタイミング、及び加速マイクロ波の間のジッタが 9ps よりも十分小さいということを示しており、タイミングシステムの精度の高さを表している。

このようにタイミングシステムは順調に動作しているが、いくつか障害もあった。まず、メーカーから提供を受けた CAMAC ドライバソフトウェアのバグが解消せず、制御が不能になることがあった。これに対しては、上位のソフトウェアを工夫することにより障害を避けることに成功している [4]。

また、TD4/TD4V のモジュールによって、約 2 週間に 1 回約 200ms の間出力が停止することがあった。KEKB のコミッショニング当初は気がつかず、また、頻度が低いためなかなか理解が進まなかったが、モジュール内の

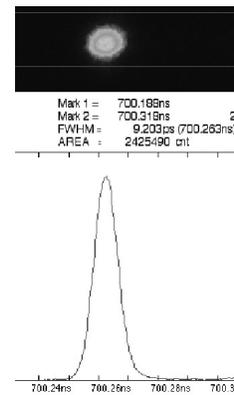


図 2: ストリークカメラによるビームパンチ構造の測定で 10nC ビームの幅が約 9ps に見えている

2ヶ所のコンパレータの不具合であることを突き止め、2002 年夏には全て交換が完了する。

システムの安定度が高まったので、今後をそれを維持するために監視システムの充実を検討している。

4. まとめ

入射器の複雑なタイミングシステムが、順調に運用され、KEKB e^- 、KEKB e^+ 、PF e^- 、PF-AR e^- 、という 4 種類のビームモードの切り替えなどにも大きな問題なく対応できている。タイミングの精度も十分高く、2001 年秋からの KEBB 入射に使われ始めた 2 パンチ加速においても精度の高い SLED タイミング制御を提供することにより、入射器の安定なビーム運転に寄与している。

5. 謝辞

KEKB への入射器増強の際のタイミングシステムの当初の設計は浦野隆夫氏によって行われた。氏の的確な判断によるシステム立上げに感謝します。

参考文献

- [1] A. Enomoto, "Upgrade to the 8-GeV Electron Linac for KEBB", Proc. LINAC'96, Geneva, Switzerland, 1996, p.633.
- [2] K. Furukawa *et al.*, "Towards Reliable Acceleration of High-Energy and High-Intensity Electron Beams", Proc. LINAC2000, Monterey, U.S.A., 2000, p.630.
- [3] H. Hanaki *et al.*, "Low-Power rf Systems for the KEBB Injector Linac", Proc. APAC'98, Tsukuba, 1998, p.139.
- [4] S. Kusano *et al.*, "Timing System Software for the KEK Injector Linac", these proceedings.
- [5] K. Furukawa *et al.*, "Accelerator Controls in KEBB Linac Commissioning", Proc. of ICALEPCS99, Trieste, Italy, 1999, p.98.
- [6] K. Furukawa *et al.*, "Beam Switching and Beam Feedback Systems at KEBB Linac", Proc. LINAC2000, Monterey, U.S.A., 2000, p.633.