

SACLA と SPring-8 蓄積リングの高周波基準信号の同期システム

SYNCHRONIZATION SYSTEM BETWEEN TWO MASTER OSCILLATORS OF SACLA AND SPRING-8 STORAGE RING

大島隆^{#, A, B)}, 細田直康^{A, B)}, 小林和生^{A)}, 前坂比呂和^{B)}, 松原伸一^{A)}

Takashi Ohshima^{#, A, B)}, Naoyasu Hosoda^{A, B)}, Kazuo Kobayashi^{A)}, Hirokazu Maesaka^{B)}, Shinichi Matsubara^{A)}

^{A)} Japan Synchrotron Radiation Institute

^{B)} RIKEN SPring-8 Center

Abstract

Study of a timing system to inject a beam from the linac of SACLA to the Storage Ring (SR) is underway at SPring-8. It is demanded not only to prepare the upgrade plan of the storage ring, but also to reduce the consumption of electricity by shutting down the current injector synchrotron and the linac. One of the challenges is to synchronize two accelerators without degrading the performance of the XFEL operation of SACLA. When injection to the SR is requested, the timing difference between SACLA's clock and SR's one is measured by using an ADC of a MTCA.4 platform. The FM control signal is applied to the SACLA's master oscillator to synchronize the ejection timing to the timing of the aimed SR bucket within one period of AC 60 Hz. We developed a proof of principle module and the performance test was done. The rms value of the timing jitter at the ejection timing was 1.2 ps. A test was carried out at SACLA with this module. The XFEL was still obtained with only 10 % intensity reduction for the timing adjusted shot, where the phase noise of the reference rf was increased by the FM modulation. The influence by this timing adjustment will be further reduced at the following shot because the modulation is stopped. We found a large phase variation caused by this FM modulation in a phase lock loop circuit of an ultrashort pulse laser used for pump-probe experiment located at SACLA's experimental hall. We have an idea to improve the situation by reducing the FM amplitude at the expense of jitter of the master trigger to AC 60 Hz and validation test is planned near future.

1. はじめに

放射光施設や高エネルギー実験施設では、高いエネルギーの粒子ビームを蓄積し、そこから得られる放射光を使った実験や、衝突したビームから得られる粒子の計測などの実験が行われる。ここで使われる蓄積リングには別の加速器で加速されたビームが入射される。2 つの異なる加速器の間でビームのやりとりを行うためには、高い時間精度で入射/出射のタイミング同期を取る必要がある。同期を取る方法の1つは、高周波加速に用いる基準信号の周波数を同一かまたはハーモニクス関係を保つように、加速器の周長や加速空洞の周波数を決定する方法である。SPring-8 のブースターシンクロトロンでは蓄積リングと同一の加速周波数をもつように設計されていて、蓄積リングとの周長の比は 672/2436 となっている[1]。また、KEKB 蓄積リングと入射用線形加速器の高周波基準信号の周波数はそれぞれ 10.39 MHz の通倍の値が選択されている[2]。同期を取るもう一つの方法として、パルス運転を行う加速器の高周波基準信号を蓄積リングのそれと合わせるように調整する方法が考えられる。SPring-8 ブースターシンクロトロンへの入射を行う線形加速器のパルス高周波基準信号は、シンクロトロン基準信号をクロックとする任意波形発生装置から生成されている[3]。

さて、SPring-8 では、更なる蓄積リングの低エミッタンス化を図る SPring-8-II 計画が検討されている[4]。低いエミッタンスを実現するリングでは、ダイナミックアパー

チャーが狭く、入射ビームに対しても低エミッタンスが要求される。このため、エミッタンスが大きい現行の入射器を使用することができない。そこで、X 線領域で FEL 発振を実現させている SACLA [5]の低エミッタンス線形加速器を入射器として使用することが検討されている[4,6]。この計画の準備段階として、また、現行の入射器であるブースターシンクロトロンと線形加速器を停止することによる消費電力低減を目的として、XFEL マシンである SACLA を蓄積リング (SR) への入射器として前倒して使用するためのタイミングシステムの準備を進めている。このタイミングシステムに許容されるジッタの大きさとしては、現行の SR の電子ビームのバンチ長である 30 ps より十分小さいことが望まれる。SPring-8-II では、バンチ長はさらに短い 6 ps rms であるので、ジッタの許容値は数 ps と厳しくなる。

SACLA では高い精度・安定度が要求される XFEL の実験が行なわれているが、この実験と SR への入射を両立させるための方法を検討した。加速周波数を整数比に保つ方法では、SACLA の周波数を SR の基準信号に合わせることになる。SR の基準信号の周波数は、潮汐などの要因で変化する周長に合わせて制御されている。そのため、基準信号の周波数はおよそ $2 \times 10^{-8}/\text{day}$ 、およそ $1 \times 10^{-6}/\text{year}$ の変化率で変化することになる。これは、SACLA の XFEL 安定運転を阻害する可能性がある。一方、任意波形発生装置から生成される信号を入射器の基準信号とする方式では位相雑音が高くなりすぎて XFEL 生成運転に支障が出る可能性がある。そこで、SR から入射要求がある場合にのみ、SACLA のマスターオシレータの位相を動かして SR と同期させる方式を採用

[#] ohshima@spring8.or.jp

することとした。このシステムでは、SR からの入射要求のタイミングで2つの高周波基準信号の位相差を検出し、SACLA のマスターオシレータに FM 変調を加え、ビーム出射のタイミングを SR のターゲットバケットに同期させる。我々はこのシステムの原理検証装置を製作し、試験を行った。本稿では、SACLA から SR への入射を行うために使用する制御プロセスの概要、SACLA と SR のタイミング同期をとる装置の詳細と現時点で達成した結果、今後の予定について述べる。

2 SACLA から SR へのビーム入射のプロセス

2.1 SACLA のタイミング系

SACLA では電子ビームの加速に 5712 MHz の加速管が使用されている。また、電子銃下流のバンチ圧縮部の空洞では 5712 MHz の分周信号も使用されている。これらの空洞で使われる高周波基準信号は 1 台のマスターオシレータから出力されている。加速器のパルス運転のタイミング基準となるマスタトリガ信号は、基準高周波信号と、商用電力の AC 60 Hz 信号に同期した信号となっている。高周波基準信号およびタイミング信号は加速器の上流に設置されたマスターオシレータ室から、各ユニットに伝送されている[7]。各加速ユニットでのパルス運転のタイミング制御は、マスタトリガをカウンタディレイ (Trigger Delay Unit: TDU) で遅延させたトリガで駆動されている。この TDU のクロックとしては 5712 MHz を 1/24 に分周した 238 MHz の信号が使用されている。ただし、SACLA のポンプ・プローブ実験で使用している超短パルスレーザーの繰り返し率が 79.3 MHz であることから、現在は、238 MHz を 1/3 に分周した 79.3 MHz に同期してマスタトリガは出力されている。SACLA から出力されるビームを、2436 個ある SR のバケットのうちの狙ったバケットに入射するためには、マスタトリガのタイミングおよび高周波基準信号の位相を目的とするタイミングに合わせる必要がある。

2.2 SR への入射シーケンス

SACLA から SR へのビーム出射を制御するシステム構成の例を Figure 1 に示す。ここで使われるのは、SR の電流を監視し入射要求を出す「入射要求プロセス」、SACLA と SR の同期を司る「同期プロセス」、加速器パラメータを XFEL 実験用のセットと SR 入射用のセットに切り替える「パラメータ切り替えプロセス」である。

入射要求プロセスは、SR の DCCT で計測した総電流値を監視する。蓄積電流が閾値を下回った場合に入射シーケンスを開始する。SR の各バケットの電流値は放射光ユーザーからの要望に応じて複数のパターンがある。この設定値に応じたバンチ電流を実現するために、各アドレスのバンチ電流を計測し[8]、目標電流値からの低下が激しいバケットアドレスを探し出す。そして入射要求をそのアドレスの情報と共にパラメータ切り替えプロセスに伝送する。パラメータ切り替えプロセス[9]は、どの時刻に SR 入射を実施するかを決定し、同期プロセスや各加速ユニット制御装置、振り分け磁石制御装置に入射実施のマスタトリガカウント数を伝送する。同期プロセスは、マ

スタトリガカウントが指定された値になった時のビームショットに対して、SACLA のマスターオシレータに FM 変調を印加し、ビーム出射タイミングが SR の狙ったバケットへの入射に適したタイミングとなるように調整する。各加速ユニットのパラメータもこのショットのビームに対しては、SR 入射に適したエネルギー、バンチ長、電荷量となるように変更される。振り分け磁石はこのショットのビームを XSBT へと導き、SR へ入射する[10]。これらのプロセスのうちタイミング同期回路について次の節で説明する。

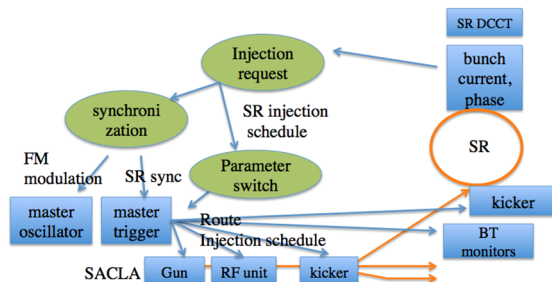


Figure 1: Schematic diagram of the control processes used for the beam injection from the SACLA's linac to the storage ring.

2.3 マスタトリガの同期と位相差の検出・制御

SACLA と SR のタイミング同期の第1段階は、SACLA のマスタトリガのタイミングを SR のバケットタイミングに近づけることである。SR からの入射要求信号を受けたのち、目標となる SR のバケットアドレスのタイミングに対応する 208 kHz の周回周波数、商用 60 Hz、および SACLA のタイミング基準クロックの 79.3 MHz の3つの信号の同期を取ったマスタトリガ信号を出力することで、タイミングのズレを 79.3 MHz の 1 周期 (12 ns) 内に合わせる。Figure 2 にタイミングチャートを示す。

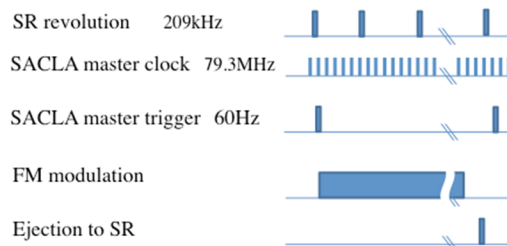


Figure 2: Timing chart of the injection process.

次に SACLA の基準高周波信号(ω_{sac})と SR の高周波基準信号(ω_{sr})との間の位相差を測定する。測定した位相差をもとに SACLA のマスターオシレータの位相を FM 変調によって制御する。2つの異なる周波数間の位相の計測は、次の方法で行った。同期させたい側 (SR) の信号 $a_{clk}(t)$ のゼロクロスタイミングをクロックとして動作する ADC に、制御される側 (SACLA) の信号 $a_{in}(t)$ を入力する。このとき ADC から出力される k 番目のデータは時刻 $t(k) = 2\pi k / \omega_{clk}$ の信号振幅 $a_{in}(k)$ であり、次の式で表される。

$$a_{in}(k) = \cos(\omega_{in}t(k) + \phi) = \cos\left(\omega_{in} \frac{2\pi k}{\omega_{clk}} + \phi\right)$$

$= \cos\left(\frac{\omega_{in}-\omega_{clk}}{\omega_{clk}} 2\pi k + 2\pi k + \phi\right) = \cos\left(\Delta\omega \frac{2\pi k}{\omega_{in}} + \phi\right)$
 ここで ϕ は $t=0$ での2つの信号の位相差である。 $a_{in}(k)$ のデータ列では、 ω_{in} と ω_{clk} のうなりの周波数 $\Delta\omega=\omega_{in}-\omega_{clk}$ の信号が見られることとなる。この信号に、 a_{clk} に同期して駆動される Numerically Controlled Oscillator (NCO)の直交する2つの信号

$$a_{NCO_r}(k) = \cos(\Delta\omega \cdot t(k))$$

$$a_{NCO_i}(k) = \sin(\Delta\omega \cdot t(k))$$

を乗じて得られる値 $I(k)$ 、 $Q(k)$ は、

$$I(k) = a_{in}(k) \cdot a_{NCO_r}(k)$$

$$= \cos(\Delta\omega \cdot t(k) + \phi) \cdot \cos(\Delta\omega \cdot t(k))$$

$$= \frac{1}{2} \{ \cos(2\Delta\omega \cdot t(k) + \phi) + \cos(\phi) \}$$

$$Q(k) = a_{in}(k) \cdot a_{NCO_i}(k)$$

$$= \cos(\Delta\omega \cdot t(k) + \phi) \cdot \sin(\Delta\omega \cdot t(k))$$

$$= \frac{1}{2} \{ \sin(2\Delta\omega \cdot t(k) + \phi) - \sin(\phi) \}$$

と表される。 $I(k)$ 、 $Q(k)$ のデータ列に対して $2\Delta\omega$ の周波数成分を十分に抑制する低域通過フィルタ(LPF)を通すことにより $\cos(\phi)$ 、 $\sin(\phi)$ のデータを得ることができ、

$$\tan(\phi) = \frac{\sin(\phi)}{\cos(\phi)} = -\frac{Q}{I}$$

の演算から位相 ϕ を求めることができる。この位相が0になると、SACLAの基準信号 a_{in} は、SRのクロックと同期したNCOの位相とそろそろ。SACLAのマスターオシレータにFM変調を印加して、位相 ϕ がゼロの状態を維持し、出射のタイミングを a_{in} のクロックの整数倍に固定すれば、SACLAから出射されるビームのタイミングとSRのバケットのタイミングは一定の時間関係に保たれる。タイミングのオフセットの調整は目標とする位相 ϕ にオフセットを与えることで実現できる。我々は a_{in} としてSACLAのタイミング基準周波数 ω_{saccla} の79.3MHzの信号を、 a_{clk} としてSRの基準信号 ω_{sr} を1/6に分周した84.8MHzの信号を用いることにした。

3. 原理検証試験

この原理の検証をFigure 3に示す回路で行った。ここではDESYで開発が進められているMTCA.4規格[11]の高速デジタイザSIS8300-L[12]を使用した。このデジタイザはサンプリングクロックの最大周波数が125MHz、AC結合での入力信号帯域が350MHz、ADC分解能が16bitであり、2chのDACを備えている。Xilinx社製FPGA (Vertex-6)を搭載しており、ここに次の機能を実装した。

- 1) 信号発生器SG1からの信号(84.8MHz)をADCのクロックとする。これはSRの基準信号を模擬する。
- 2) 信号発生器SG2からの信号(79.3MHz)をADCの入力とする。これはSACLAの基準信号を模擬する。
- 3) トリガ発生器FG1からの入射要求信号(10Hz)をトリガとしてSG1の信号をクロックとして動作するNCO(84.8MHz - 79.3MHz = 5.4MHzで動作)のリセットを行う。
- 4) トリガ発生器FG2からの周回信号(208kHz)をトリガ

- として、NCOとADC入力信号の積をLPFした値の演算を行う。結果から位相差 ϕ を算出する。
- 5) 位相差をもとにFM変調量を計算し、DACからFM変調信号をSG2に対して出力する。
 - 6) 周回信号を規定数だけ計数した時点(出射タイミング:15ms)でFM変調を停止する。

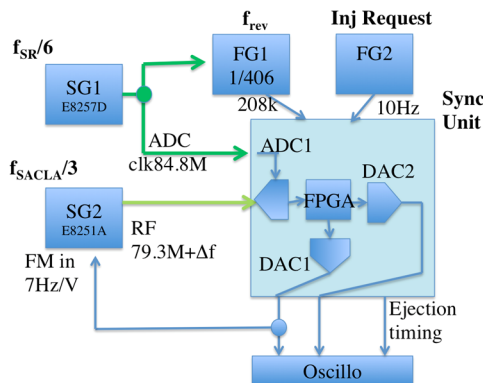


Figure 3: Block diagram of the synchronization system.

3.1 ベンチテスト

この試験のためのテストベンチの外観をFigure 4に示す。ここで得られた結果の一例をFigure 5に示す。SG1, SG2, FG1, FG2のモジュール類はすべて10MHz基準信号を同期させた条件で試験を行った。出射タイミングで計測した $\Delta\omega=5.4$ MHz信号の位相1000個のデータのばらつきはrms値で0.034degreeであった。これは79.3MHz信号の時間ジッタのrms値として1.2psに対応する。

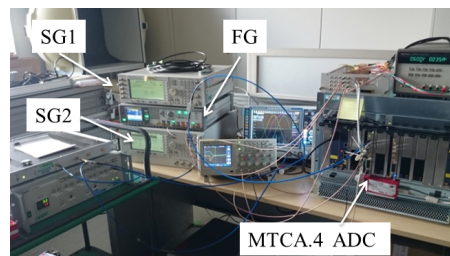


Figure 4: Photo of the test bench.

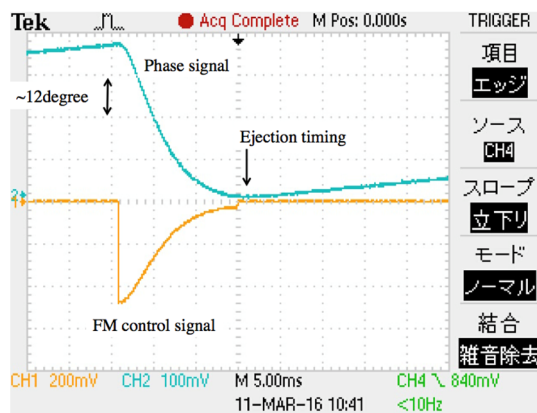


Figure 5: An example of the measured phase signal (Purple line) and the FM control signal (Orange line).

3.2 SACLA のマスターオシレータの変調試験

次に、同期システムを SACLA のマスターオシレータ室に持ち込み、実際にマスターオシレータに対して外部から 10 MHz 信号を供給し、SR の基準信号を模擬した信号発生器との同期動作を試みた。SACLA の線形加速器から出射される 10 pps の全てのビームに対して同期操作を適用し、そのビームを BL3 に通して得られる FEL の強度、エネルギーなどの変動について測定を行った。その結果を Figure 6 に示す。FM 変調を印加し、基準高周波信号の位相ノイズが増加した状態においても、XFEL 発振が継続することが分かった。強度については通常時より強度の低いショットが増加したが、平均値は 550 μJ から 500 μJ へと約 10% の低下に抑えられていた。インラインスペクトロメータで計測した FEL 光のエネルギーについては 10 keV の設定値に対し、ばらつきが通常時の 13 eV から 23 eV へと若干の増加が見られた。実際には、SR 入射ビームの次以降のビームが FEL に使用され、そのビームに対しては変調を実施しないので、FM 変調が FEL に与える影響はさらに小さいと考えられる。

一方で、この FM 変調操作によって発生する問題があることが分かった。それは、ポンプ・プローブ実験で使用する超短パルスレーザーの同期回路への影響である。超短パルスレーザーの照射タイミングは XFEL と同期させる必要がある。ここで使用されているレーザーの共振器長制御回路は高い安定度を得るために帯域を狭くしてある。そのため、基準信号に早い変動があると位相飛びを発生してしまうことがわかった。Figure 6 には加速器の高周波基準信号に対する超短パルスレーザーの位相の推移を示す。FM 変調なしでは 1 ps 以下の変動となっているが、FM 変調ありでは 4 ns の変動が見られた。この変動は許容できるものではなく、対策を取る必要がある。

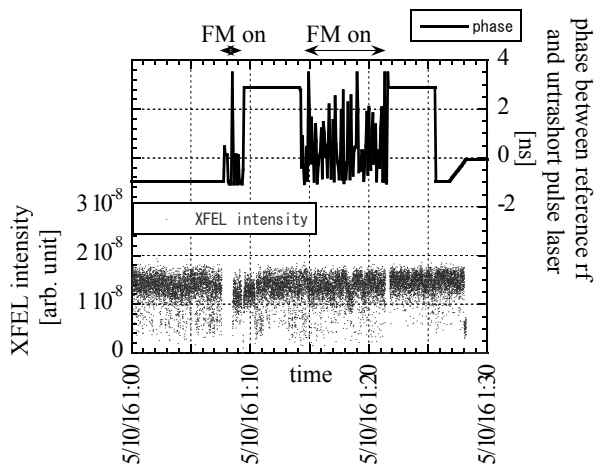


Figure 6: Trend of XFEL intensity (dot) and phase between the reference signal and signal from an ultra-short pulse laser used for a XFEL pump-probe experiment (solid line).

4. まとめと今後

SACLA の線形加速器を SR の入射器とする運転で必要となる、タイミング同期回路の構築、原理検証試験を行った。その結果、模擬信号源の 10 MHz を同期させた条件で、スタートトリガから 15 ms 後のタイミングにおいて、2 つの発振周波数の異なる信号源から得られる正弦波

のタイミングジッタを 1.2 ps rms に抑えられることを確認した。

同期回路を SACLA のマスターオシレータに接続して動作確認試験を行った。同期動作時のビームを使った XFEL 発生試験では FM 変調が印加され位相雑音が増加した状態においても XFEL 発振が見られ、その強度低下は 10% 程度に抑えられた。実運用では、同期操作の次以降のショットのビームが FEL 発振に使用されるため、その影響は更に小さいことが予想される。一方で、今回試みた FM 変調振幅では実験棟に設置されているポンプ・プローブ用の超短パルスレーザーの PLL ロックが外れてしまう事象が見られ、改善が必要であることがわかった。

この問題点の解決策の 1 つとして、SACLA のマスタトリガのタイミングを SR の周回時間 4.7 μs だけ遅らせると 79.3 MHz と 84.8 MHz の位相差が -100ps だけ変化することを用いて、SACLA のマスターオシレータに対する FM 変調の最大値を 12 ns から 100 ps に減らす方式を検討している。この方法では FM 変調量が抑えられるが、SACLA のマスタトリガの商用 60 Hz に対する時間差が最大で 200 μs ずれることとなる。この処置が加速器の運転に影響を与えないかどうかの確認、および実用運転に向けた問題点のさらなる洗い出しなどの検証を進めていく予定である。

謝辞

同期試験を行うにあたって協力いただいたスプリングエイトサービス運転員の方々、および、様々な段階での確な助言を与えてくださった大竹雄次氏に感謝の意を示す。

参考文献

- [1] SPring-8 Project Facility Design (1991).
- [2] H. Kaji *et al.*, "Upgrade of Event Timing System at Super KEKB", Proc. of ICALEPCS2013, (2013) pp.1453-1456.
- [3] Y. Kawashima *et al.*, Phys. Rev. S. T. 4, 082001 (2001).
- [4] SPring-8-II Conceptual Design Report; <http://rsc.riken.jp/pdf/SPring-8-II.pdf>
- [5] T. Ishikawa *et al.*, Nat. Photonics, 6 (2012), p. 540.
- [6] H. Ego *et al.*, "RF System of the SPring-8 Upgrade Project", Proc. of IPAC2016 (2016) pp.414-416.
- [7] Y. Otake, "State-of-the-Art RF Distribution and Synchronization Techniques", Proc. of FEL2011 (2011) pp.633-640.
- [8] T. Ohshima *et al.*, "Beam Phase Measurement of Stored Bunch", Proc. of EPAC2006 (2006) pp.1133-1135.
- [9] H. Maesaka *et al.*, "Shot-by-Shot RF Parameter Switching for Bunch Length Control at the SACLA Linac", in these proceedings.
- [10] T. Hara *et al.*, "Toward the Multi-Beamline Operation of SACLA", in these proceedings.
- [11] <http://mtca.desy.de/>
- [12] <http://www.struck.de/sis8300-l.html>