

同期トリガ・クロック発生装置

SYNCHRONOUS TRIGGER AND CLOCK GENERATOR

大島隆^{#, A, B)}, 岩井瑛人^{A, B)}, 前坂比呂和^{B, A)}, 埜下英児^{C)}
Takashi Ohshima^{#, A, B)}, Eito Iwai^{A, B)}, Hirokazu Maesaka^{A, B)}, Eiji Nonoshita^{C)}

^{A)} Japan Synchrotron Radiation Research Institute

^{B)} RIKEN SPring-8 Center

^{C)} Cadox Systems Inc.

Abstract

High reliability is required for delivering the RF reference signal to users. But, accidental trouble may occur at the master oscillator or trigger generating modules. In such a case, users should shutdown/restart their system, such as a high-power synchronous short-pulse laser or a data acquisition system. These procedures may take several hours. To overcome this situation, we have developed a new synchronous trigger and clock generator (TCG), which provides master trigger and reference clock signals synchronized to an external ones with a low jitter. In case that the RF system is scheduled to be stopped, the TCG switches its operating mode to internal mode. When the external signal is restored, the TCG switches back to external mode. This allows users to keep their equipment running during maintenance of the reference RF system, potentially reducing downtime. The integrated phase noise of the TCG from 10 Hz to 10 MHz was 33 fs rms, which is sufficiently small value. The phase drift between the external reference and the TCG output at 5712 MHz was 0.5 ps PK over 100 seconds. We will try to reduce this drift in the future.

1. はじめに

X線自由電子レーザー施設 SACLA [1]では、極短パルスレーザーシステムや、ショットごとのデータを保存する収集システム [2] など、加速器のトリガやクロックに同期して動くシステム [3] が稼働している。これらのシステムでは、トリガやクロックは連続的に供給されることが前提とされており、供給が停止する場合には、事前に時間をかけてシャットダウンの操作を行うことが必要となる。また、トリガやクロックの供給が再開されたとしても、システムの温度などが安定になるまで、時間単位の待ち時間が生じてしまう。しかし、運転停止期間中にメンテナンスを行うことがあったり、偶発的にトラブルが発生することは避けることができない。そこで、通常は外部トリガ・クロックに同期した動作 (external モード) を行い、外部トリガ・クロックの供給が停止することが予想される場合には内部クロックに切り替えて動作 (internal モード) する信号発生器 (Trigger Clock Generator: TCG) の製作を行うことにした。本報告では信号発生器の構成、動作および性能について報告する。

2. 信号発生装置の構成

2.1 信号発生装置への要求項目

SACLA ではタイミング関連の基準クロックとしては 238 MHz が、また、トリガタイミング基準としては商用 AC 60 Hz に同期したトリガ信号が使用されている [3]。ユーザーが使用する極短パルスレーザーシステムが 238 MHz 信号を 1/3 分周した 79.3 MHz で動作していることから、このトリガ信号は 79.3 MHz に同期したタイミングで出力される。また、SACLA は SPring-8 蓄積リング

(SR) の入射器としての役割も担っており [4]、238 MHz 基準クロックおよびトリガ信号は SR 入射の場合のみ SR のバケットに同期したタイミングで出力される [5]。

上記の要件から、TCG に要求される項目は以下の通りである。

- 入力: 238 MHz 外部基準クロック信号
- 入力: 60 Hz 外部トリガ信号
- 出力: 238 MHz マスタークロック出力信号
- 出力: 60 Hz マスタートリガ出力信号
- 出力: 5712 MHz クロック信号
- モード: 内部・外部
- モード切り替え時の位相変化速度: 20 ps/ms 以下
- モード切り替えの遷移時間: 10 s 以下
- 出力クロック信号の 10 Hz から 10 MHz までの積分したジッタの rms 値:
 - 外部同期時: 50 fs rms 以下
 - 内部同期時: 100 fs rms 以下
- 外部同期で SR 入射時に、バケット同期に対応する位相変調に追従すること。

2.2 信号発生器の構成とその動き

前節で述べた要求を満たす装置の構成として、低位相雑音の 100 MHz VCO (Voltage Controlled Oscillator) を内部に実装したシステムを構築した。Figure 1 にブロック図を示す。

電源投入時には internal モードで動作を行う。このモードでは 238 MHz クロックは 100 MHz VCO 信号を元に作られた 5712 MHz を 1/24 分周して作られる。100 MHz 信号の低周波領域 (オフセット周波数 20 Hz 以下) での位相雑音の低減のために、10 MHz OCXO (Oven-Controlled Xtal Oscillator) の信号を 10 通倍した信号と 100 MHz VCO 信号との位相差信号 (100M_P) が 100 MHz PLL (Phase-Locked Loop) 回路の入力として

[#] ohshima@spring8.or.jp

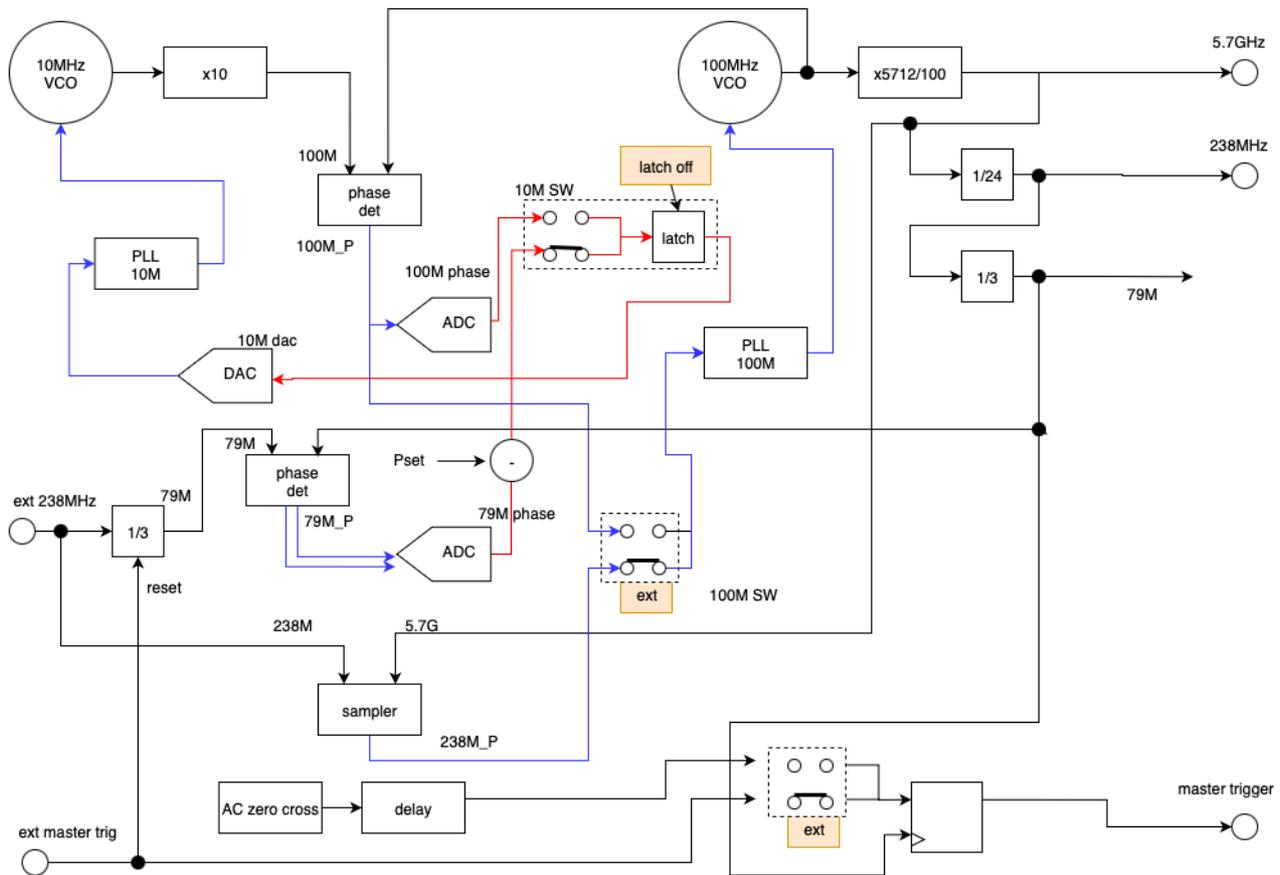


Figure 1: Block diagram of the trigger and signal generator (TCG) in external mode.

用いられる。商用 AC 60 Hz 信号のゼロクロス立ち上がりのタイミング信号を 79.3 MHz クロックで叩き直した信号が internal モードでのマスタートリガ信号となる。

External モードでは外部クロック信号でサンプリングした 5712 MHz 信号 (238M_P) が 100 MHz VCO の PLL 入力として用いられる。外部トリガ信号を 79.3 MHz クロックで叩き直した信号が external モードでのトリガ信号となる。

Internal モードから external モードへの切り替え時には、以下の動作を行う。

- 外部基準クロック信号およびトリガ信号のレベルが適正であることの確認。レベルが低い場合は internal モードを継続。
- 100 MHz VCO の PLL 帯域を狭める。
- 10 MHz OCXO の PLL 経路を外部 79.3 MHz と内部 79.3 MHz との位相差信号 (79M_P) に切り替え、20 ps/ms 以内の変化速度で位相差を小さくする。
- 位相差の追い込み完了後、100 MHz VCO の PLL 経路を 100M_P から 238M_P に切り替える。
- 100 MHz VCO の PLL 帯域を広める。
- マスタートリガの信号を外部トリガに切り替える。
- 10 MHz OCXO の PLL は 79M_P 信号を元に動作を継続する。

external モードから internal モードへの切り替え時には、以下の動作を行う。

- 100 MHz VCO の PLL 帯域を狭める。

- 10 MHz OCXO の PLL を実施している DAC の値を保持する。
- マスタートリガの信号を内部トリガに切り替える。

3. 信号発生装置の性能確認

構築した信号発生装置 (TCG) の性能をテストベンチにて評価した。外部基準クロック信号としてキャンドックス社製マスターオシレータ CDX-RIK003S から出力される 238 MHz 信号を用いた。Figure 2 に CDX-RIK003S から出力される信号、internal 時および、external 時の TCG からの信号の位相雑音の測定結果を示す。5712 MHz 信号に対する Internal / external のモードでの位相雑音は、10 Hz から 10 MHz のオフセット周波数の範囲で積分した値として 57 / 33 fs rms と高い性能を有していた。

外部信号源 CDX-RIK003S からの信号と TCG からの信号との位相差について、ミキサを用いて検出を試みた。Figure 3 に示すようにミキサの出力を低域通過フィルタを介してオシロスコープに接続し、その波形を記録した。Figure 4 a) には internal から external への遷移、b) には external から internal への遷移状態を示す。5712 MHz 信号のミキサ出力は 238 MHz 信号のミキサ出力に比べ 24 倍の速さで振動している。この振動振幅を用いてミキサの電圧を位相に変換することが可能である。Internal 時には若干の周波数差が残っているが、滑らかに切り替えが行われている様子が見られる。

次に、このミキサを用いたセットアップにおいて、外部

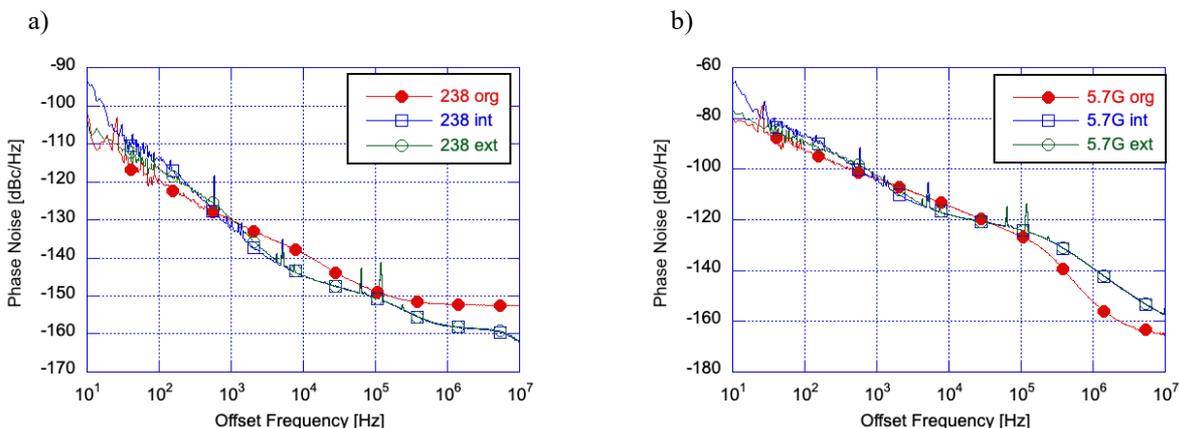


Figure 2: Phase noise spectra of a) 238 MHz and b) 5712 MHz output signals. Blue lines, green lines and red line show the TCG signal with internal-mode, with external-mode and the external reference input signal, respectively.

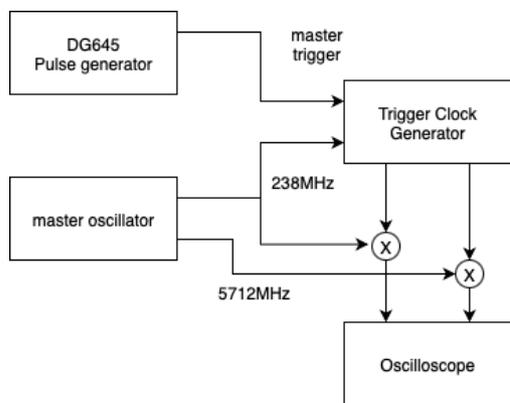


Figure 3: Measurement setup of the phase of 238 MHz and 5712 MHz.

クロックとして実際にSACLAで使用している238 MHz信号を入力して外部同期設定の時の振る舞いについて確認を行なった。Figure 5 に SR 入射がない時間帯での5712MHz 信号の位相のトレンドを示す。図中の縦軸は位相を時間に換算している。238 MHz のミキサ出力のトレンドと5712 MHz のミキサ出力のトレンドとは大まかには同じ傾向が見られている。測定精度は5712 MHz のミキサ

サの出力の方が高い。5712 MHz のミキサ出力では0.5 ps PK 程度のドリフトが見られている。TCG の PLL 回路のパラメータ最適化でこのドリフトを改善することが可能かどうか、今後検討を行う。

SR 入射時には、原理的に110 fs PK 以下の時間変動が発生する。今回の測定では、Fig. 6 に見られるように2 ps PK の変動が2回みられた。この変動はTCG由来ではなく、SR同期システムの設定に何らかの不具合が発生していることが原因である可能性がある。この点について今後調査を進める予定である。

4. まとめ

SACLA のマスタートリガ信号や基準 RF クロック信号が停止した場合でも極短パルスレーザーや同期データ収集システムの動作が継続できるように、内部クロック動作が可能なトリガ・クロック発生装置の開発を行った。外部から供給される基準 RF クロックに同期した信号を出力する external モードから内部クロックで動作する internal モードへの遷移はスムーズで想定通りの動きが確認できた。5712 MHz の位相雑音は、external モード、internal モードでそれぞれ 33 fs rms および 57 fs rms と高い性能を有していた。今後さらに長期安定度の改善が可能かどうか評価を進めていきたい。

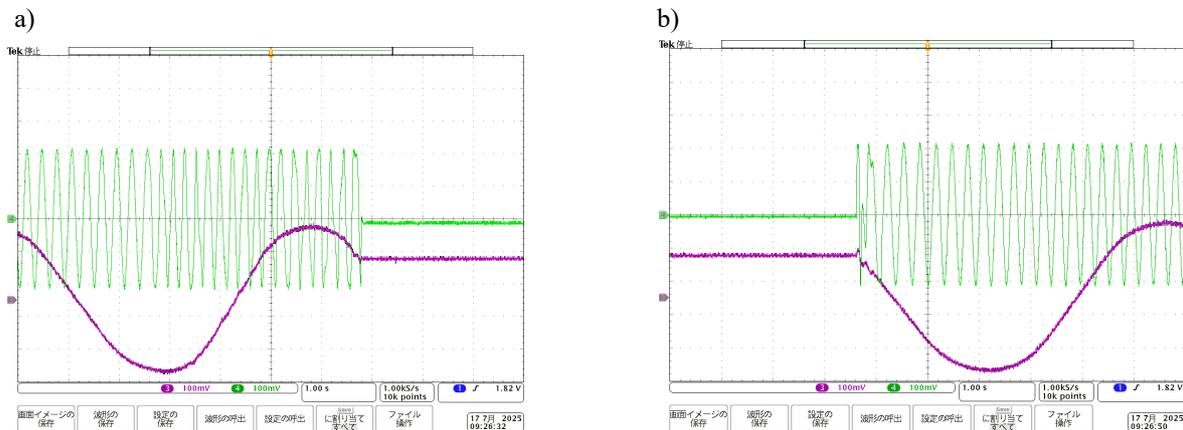


Figure 4: Phase signal at the mode change. a) from internal to external, and b) from external to internal. The phase of 238 MHz is shown in the purple line, and that of 5712 MHz is shown in the green line.

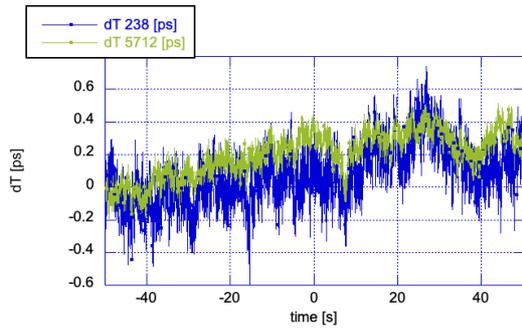


Figure 5: Timing difference between the master oscillator signal and the TCG signal at 5712 MHz without SR beam injection.

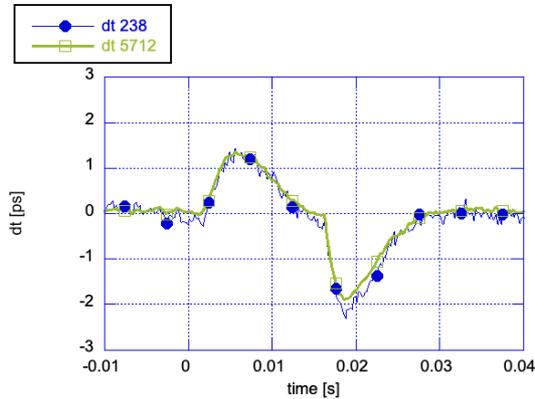


Figure 6: Timing difference between the master oscillator signal and the TCG signal at 5712 MHz at the SR beam injection.

謝辞

本装置の製作に関して協力をいただいたキャンドックシステムズの青野氏、仙石氏、要件出しに協力いただいた SACLA 利用系の富樫氏、藪内氏に感謝の意を表す。また、適切な指導をいただいた理研加速器基盤チームリーダー稲垣氏に感謝する。

参考文献

- [1] T. Ishikawa *et al.*, “A compact X-ray free-electron laser emitting in the sub-ångström region”, *Nat. Photonics* **6**, p. 540, June 2012.
- [2] T. Fukui *et al.*, “Status of the Control System for the SACLA/SPring-8 Accelerator Complex”, in *Proc. ICALEPCS’17, Barcelona, Spain, Oct. 2017*, pp. 1995–1999. doi:10.18429/JACoW-ICALEPCS2017-FRAPL03
- [3] Y. Otake *et al.*, “Timing and low-level rf system for an x-ray laser”, *Phys. Rev. ST AB* **19**, 022001 (2016).
- [4] T. Hara *et al.*, “Low-emittance beam injection for a synchrotron radiation source using an X-ray free-electron laser linear accelerator”, *Phys. Rev. ST AB* **24**, 110702 (2021).
- [5] T. Ohshima *et al.*, “Timing Synchronization System for Beam Injection from the SACLA Linac to the SPring-8 Storage Ring”, 2019, *J. Phys.: Conf. Ser.* **1350** 012141.