

レーザープラズマ航跡場入射用極短パルス線型加速器トリガーシステムの開発

DEVELOPMENT OF A TRIGGER SYSTEM FOR A LINAC TO INJECT ULTRASHORT PULSED ELECTRON BEAMS INTO LASER PLASMA WAKEFIELDS

増田剛正[#], 益田伸一, 熊谷教孝, 大竹雄次

Takemasa Masuda[#], Shinichi Masuda, Noritaka Kumagai, Yuji Otake
Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI)

Abstract

We are developing a linac to generate ultrashort pulsed electron beams with a bunch length below 10 fs(rms) for injection into subsequent plasma wakefields. A trigger system, which decides the accelerator repetition cycle and activation timing of accelerator instruments such as a C-band klystron modulator, a pump laser and a beam monitor, is one of the key elements to realize highly stable electron beams injected into a capillary and accurate beam monitoring. The stability of an accelerating RF is required below 10 fs (rms) as mentioned above, on the other hand, the stability of the activation timing of most accelerator components is sufficient at several tens of picoseconds. A master trigger unit (MTU) has newly developed for this linac to generate trigger pulses synchronized both with a 79.3 MHz clock from the already developed master oscillator for mode locking of lasers and commercial ac power with 60 Hz. The trigger pulse is a repetition cycle from 0.1 to 60 Hz and a width from 2 to 10 μ s. The low temporal jitter (~ 3 ps(rms)) trigger pulse generated by the MTU will be distributed via a White Rabbit (WR) network using the RF over WR technology. Based on information of the input trigger pulse together with the 79.3 MHz clock into a master node on the WR network, slave nodes received the information regenerate a synchronous 79.3 MHz clock and a trigger pulse with arbitrary delay. As the preliminary results, a jitter performance of the output trigger pulses is ~ 10 ps (rms), which is sufficient for the trigger signals for the most accelerator components. The current development status of our trigger system is reported in this paper.

1. はじめに

レーザー航跡場加速は、高強度極短パルスレーザーをガスに照射することで励起されるプラズマ波（レーザー航跡場）が作る高い加速勾配を利用して電子を加速する方法である[1, 2]。その加速勾配は従来の高周波技術に基づく加速勾配よりも三桁程度大きいため、高エネルギー物理をはじめとした学術分野において高い加速エネルギーを得るために巨大化している加速器施設を大幅に小型化することが期待されている。また、医療分野や産業分野においては、テーブルトップの電子線源や放射光源としての加速器の利用が期待できる。

レーザー航跡場加速はフェムト秒領域の極限現象であり、その詳細な物理は未だ明確にはなっていない。この新たな加速法を用いた電子加速器を実用化するためには、その加速特性を詳細に解明する必要がある。この目的のため、科学技術振興機構の未来社会創造事業[3]の実施機関の一つである高輝度光科学研究センターでは、確立された技術である高周波加速技術を用いることで、安定で再現性の高い極短バンチ電子ビームを生成するCバンド線型加速器の開発を進めている。開発中の線型加速器の構成を Fig. 1 に示す。追加速するレーザー航跡場の時間空間位相に対して電子ビームをスキャンしてマッピングを取ること、レーザー航跡場の詳細を明らかにすることが本線型加速器開発の最重要課題である。従って、本加速器では、レーザー航跡場の横方向サイズ(~ 100 μ m)よりも小さく、縦方向サイズ(10 \sim 100 fs)よりも短い電子ビームを生成し、かつ航跡場を生

成する極短パルスレーザーと10 fs以下の精度で同期して入射する必要がある。前者については、プラズマに入射する電子ビームのサイズが縦方向に10 fs未満に圧縮され、同時に横方向に数10 μ m以下に収束されることをシミュレーションにより示している[4, 5]。後者については、加速器高周波機器の基準信号とレーザーパルス間の正確なタイミング制御のために、世界最高レベルの低位相ノイズ性能をもつ高周波マスターオシレータ(MOSC)を開発している[6]。

上述した高精度の同期性能の実現に加えて、加速高周波機器やビームモニター機器の起動タイミングと繰り返し周期を決めるトリガーシステムもまた、電子ビームの安定度やビームモニターの精度を決める重要な要素となる。トリガーシステムは、正確な基本繰り返しパルス信号を生成する1台のマスタートリガーユニット(MTU)、MTUが生成する基本繰り返しパルス信号を機器の近傍まで伝送するトリガー伝送系、機器の近傍に置かれ、伝送されたトリガー信号に対して機器毎に決められた遅延時間を加えるトリガーディレイから構成される。従来の加速器のトリガー伝送は殆どが個別設計であったが、より一般性を持たせた光ネットワークを使用する方策を考へることとした。この方が従来と性能が同等ならコストを低く抑えられる。本稿では本加速器のトリガーシステムとその構成要素の開発の状況について述べる。

2. マスタートリガーユニット(MTU)

2.1 MTUに対する要求

MTUは、加速高周波やレーザー機器、ビームモニター機器を起動するための基本繰り返しパルス信号を正

[#] masuda@spring8.or.jp

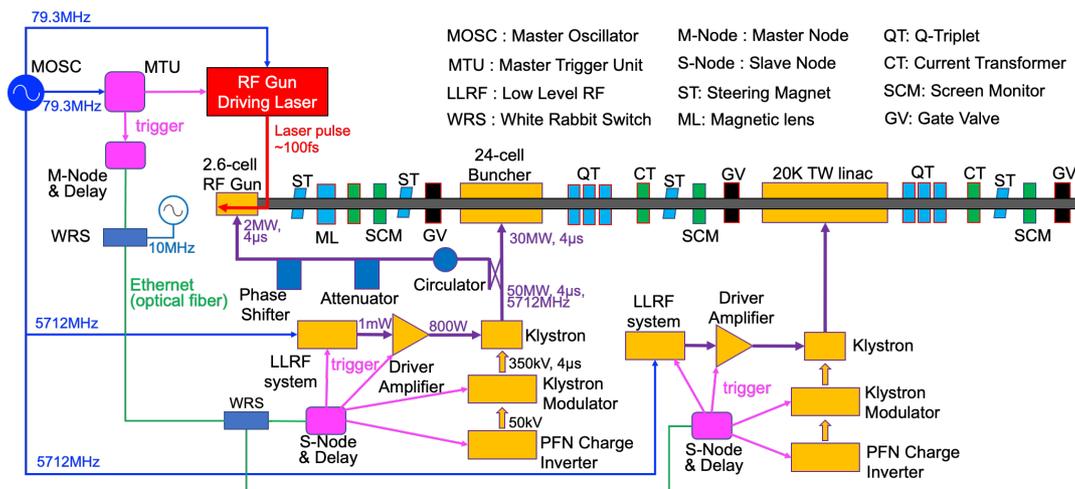


Figure 1: Configuration of a linac under development to generate ultrashort-pulsed electron beams.

確なタイミングで作り出す装置である。本件における MTU に対する主な要求は以下の通りである。

- 商用電源 (AC100V) の周波数変動による電子ビームへの影響を抑えるため、商用電源を基準信号 (60 Hz または 50 Hz) とし、MOSC からレーザーモードロック用 79.3 MHz クロックと二重同期したトリガー信号を出力すること。
- 79.3MHz クロックに対するトリガー信号の peak-to-peak の時間ジッターが、最終同期を掛ける可能性がある C バンド加速高周波 5,712 MHz の 1/4 波長以内に十分に収まること。温度変化によるドリフトを考慮し 30 ps(p-p) を実現すること。
- 周囲温度の変化によるトリガー出力信号のドリフトが、通常室内環境において 10 ps/K 以下であること (目標は 4 ps/K 以下)。
- 基準信号を 1 ~ 600 の範囲でプログラマブルに分周し、トリガー信号として出力できること。
- 19 インチラックにマウント可能で、EtherCAT を介して遠隔から制御可能な独立したユニットであること。

2.2 実装

上記の要求を満たすよう設計・製作した MTU のブロック図を Fig. 2 に、外観を Fig. 3 に示す。19 インチラックにマウント可能な、高さ 5U の独立ユニットとして製作した。

D 型フリップフロップ (ON Semiconductor 社製 NB7V52M) によって、商用電源から生成した基準信号と MOSC からの低位相ノイズ 79.3MHz クロックとの二重同期を実現し、出力トリガー信号の低ジッター化を図った。また同期カード内やカード間の配線には CML 等の差動信号を用いることで高速化を図り、低ジッター化に繋げている。信号は LVPECL レベルと LVTTTL レベルに変換されてトリガー信号として出力される。

周囲温度の変化によるトリガー出力のドリフトを抑えるため、温度変化が出力タイミングの変動に敏感な同期カードを温調ステージ上に載せてペルチェ素子による温度制御を施した。ペルチェコントローラには 10 mK 以下の精度で制御可能な株式会社セルシステム[7]の TDU-5000AG を使用し、同期カードの温度の安定化を図った。

商用電源 (AC100V) はトランスで 3V まで降圧し、バン

ドパスフィルターとコンパレータを通して System-on-a-chip (SoC) モジュールに基準信号として取り込まれる。分周比 (1 ~ 600) とパルス幅 (2 ~ 10 μ s) の設定は、ユニット前面に取り付けられたタッチパネルまたは EtherCAT 経由で行なわれ、SoC モジュールのプログラマブルロジック部で行なわれた設定を基に分周とパルス幅の制御が行なわれる。分周比やパルス幅が設定された基準信号は同期カードに渡される。

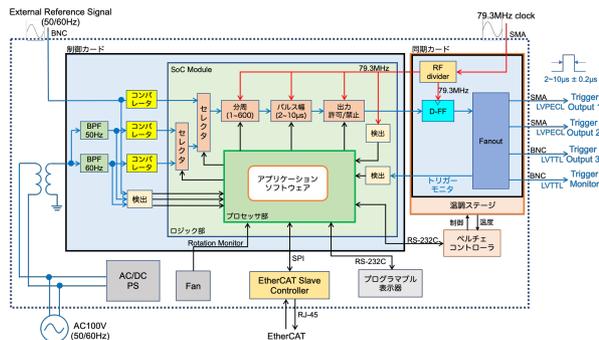


Figure 2: Block diagram of the Master Trigger Unit.



Figure 3: Photo of the Master Trigger Unit.

遠隔からの EtherCAT を介した制御は、EtherCAT スレーブ機能を提供するルネサス エレクトロニクス社の R-IN32M3 モジュール[8]を実装することによって実現した。

2.3 性能

帯域幅 13 GHz の高速オシロスコープ (Keysight 社製 DSA9130A) を用いて、79.3 Hz クロックに対するトリガー

出力の時間ジッターを測定した結果を Fig. 4 に示す。ジッターは 20.3 ps(p-p)、3.0 ps(rms)であり、要求を満たしていることが確認できた。この時の測定条件は、基準信号は外部信号(50 Hz sin 波±1V)、79.3 MHz クロック入力 0 dBm、分周比1、パルス幅 2 μ s、恒温槽温度 25 $^{\circ}$ C、ペルチェ設定温度 33 $^{\circ}$ Cであった。

長時間の時間ジッターの安定度試験を行った結果が Fig. 5 である。8 時間にわたる時間ジッターの変化は 0.1 ps(rms)であった(恒温槽温度を 25 $^{\circ}$ C、ペルチェ温度を 33 $^{\circ}$ Cに設定)。また恒温槽の温度を 20 $^{\circ}$ C→25 $^{\circ}$ C→30 $^{\circ}$ Cと変えた時の時間ジッターの平均値の変動を調べたところ 0.7 ps(rms)/Kを実現していることが確認できた。この時、ペルチェ温度は 33 $^{\circ}$ Cのまま、恒温槽の温度を変更した後は1時間にわたってエージングを行なってから測定を行なっている。

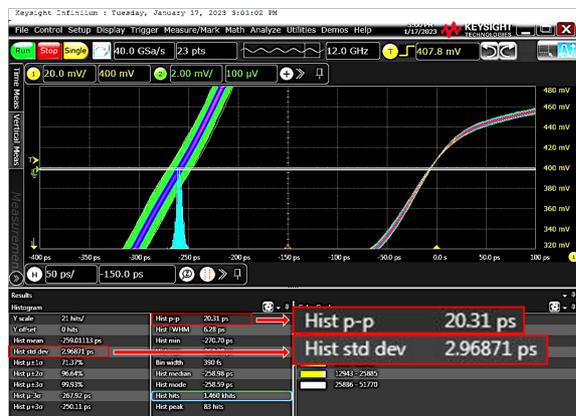


Figure 4: Result of time-jitter measurement of MTU. Peak-to-peak jitter of 20.3 ps has been achieved.

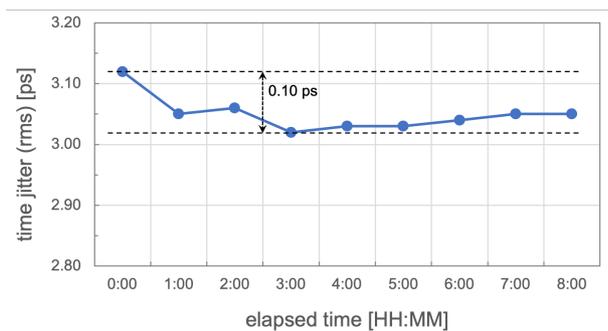


Figure 5: Result of time-jitter fluctuation for eight hours of MTU. The stability of 0.1 ps (rms) has been realized.

3. トリガー信号伝送系とトリガーディレイ

3.1 トリガー信号伝送系とトリガーディレイに対する要求

MTU で生成した低ジッターのトリガー信号は、トリガー信号伝送系によって加速高周波機器やレーザー機器、ビームモニター機器の近傍まで分配される。ストリークカメラなどの一部ビームモニター系については上述の MTU と同等の時間ジッター性能が求められるが、他の加速器機器については環境温度の変化に対するドリフトを含めて数十 ps (rms) の起動タイミングの安定度があれば十分である。また伝送系はクライストロン等の大電力高

周波機器の近傍を通るため、それらの機器が引き起こすノイズに対して十分な耐性が必要となる。

トリガーディレイについても上記の安定度が必要である。機器の起動の繰り返し周期は 0.1 Hz ~ 30 Hz を想定しているため、遅延時間の設定範囲は 0 ~ 10 秒以上が必要となる。遅延時間の設定分解能は、レーザーパルスの 79.3 MHz を同定できる 12.6 ns 以下が必要となる。

3.2 RF over White Rabbit

我々はトリガー信号の伝送に RF over White Rabbit (RFoWR) [9, 10] を適用することとした。RFoWR は、サブナノ秒オーダーの正確度(真値からのずれ)とピコ秒オーダーの同期精度(再現性)を提供する White Rabbit (WR) [11] ネットワークを経由して、Ethernet の 125 MHz の同期クロックとは異なる周波数の RF 信号を分配する技術である。我々が WR および RFoWR を採用したのは主に以下の理由による。

- 過去の RFoWR の研究[12]により、6 ~ 7 ps (rms) 程度のジッターで 79.3 MHz クロックの伝送が期待できること。
- 拡張や増設が容易であること。
- 通信にシングルモードファイバを用いており、十分なノイズ耐性を持つことが期待できること。
- 同期ネットワーク・クロックの位相トラッキングを実装しており、温度等の変化によるタイミングのドリフトを補正できることが期待できること。
- パケットの優先度制御により低遅延の通信を実現していること。

RFoWR では、分配したい RF 信号をマスターノード (M-Node) に入力し、それと位相が揃うような RF 信号を Direct Digital Synthesis (DDS) によって生成するためのチューニングを同期クロックに従って FPGA で行なう。そのチューニングのプロセスを時刻情報と共にネットワークにブロードキャストし、受信側のスレーブノード (S-Node) でも同じ DDS のチューニングプロセスを(一定の遅延時間を加えた上で) 共通の同期クロックに従ってトレースする。それにより、マスター側の入力 RF 信号と同期した RF 信号をスレーブ側で生成することができる。

トリガー信号の伝送機能は、文献[13]にあるように、トリガー信号の入出力処理を RFoWR に加えることでその実現を目指す。

3.3 システム構成

RFoWR を用いて構築する予定のトリガー伝送系の構成図を Fig. 6 に示す。MOSC からの 79.3 MHz クロックと MTU からのトリガー信号を入力する1台の M-Node、加速器機器の近傍に設置され RFoWR によって 79.3 MHz クロックとトリガー信号を出力する必要台数の S-Node、周波数標準器からの 10 MHz クロックと 1 pulse-per-second (PPS) 信号を受信する Grand Master(GM)モードの WR Switch[14]、GM モード WR Switch と光ファイバーで接続される下位レイヤの Boundary Clock(BC)モードの WR Switch で構成される。今回は出力信号の低時間ジッター化を期待して Low Jitter 版 WR Switch (WRS-LJ)[15] を導入した。我々の測定によれば、WRS-LJ を導入することで 30 ~ 40% のジッター低減が期待できる。

M-Node と S-Node は同じ構成で、FPGA として Spartan

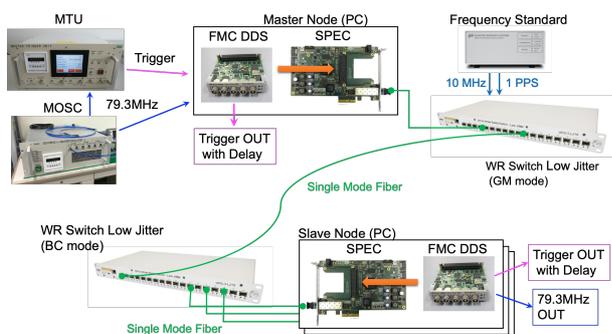


Figure 6: Configuration of the trigger transmission system using the RFoWR technology.

6 を載せている Simple PCIe FMC Carrier (SPEC)[16] ボードに FMC DDS[17]メザニンを取り付けて PC に実装した。FMC DDS は RF クロック入力とトリガー入力を1チャンネルずつ、RF クロック出力とトリガー出力を1チャンネルずつ持つカードで、同じものを M-Node 側、S-Node 側で使用する。トリガー出力は、Fig. 7 に示すように FPGA から制御する信号(図中の DELAY_IN)を DDS によって生成したクロックと同期を取り、デジタルディレイ (SY82950)を介して出力される。

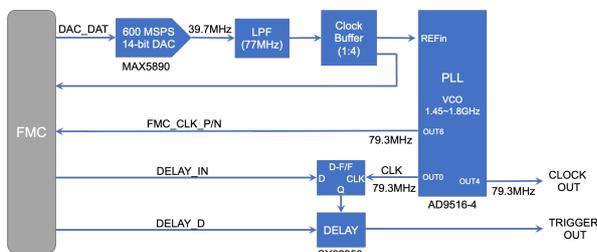


Figure 7: Block diagram of the clock and trigger outputs of the FMC DDS.

CERN から提供された FPGA ロジック (gateway) や FPGA 上のソフトコア CPU(RISC-V)上で動作するソフトウェア (firmware) が確実に動作するよう、PC の OS には CERN での使用環境と同じ Ubuntu 14.6 LTS を用いた。

3.4 トリガー出力の時間ジッター性能の評価

トリガー出力のジッター性能の評価を行なうために、S-Node から $5 \mu\text{s}$ 幅で 100 Hz のトリガー信号が出力されるように gateway を改修した。その時の出力の様子を Fig. 8 に示す。S-Node からの RF クロック出力 (Fig. 8 青色) が 79.3 MHz であり、入力 RF 信号 (79.3 MHz、Fig. 8 桃色) と同期していることがわかる。また S-Node からのトリガー出力 (Fig. 8 黄緑色) が両クロックに同期していることが分かる。このトリガー出力の RF 信号発生器 79.3 MHz 出力に対する時間ジッターを 43 時間にわたって測定したところ 8.1 ps (rms) であった (Fig. 9)。ここで、オシロスコープとして 2.5 GHz 帯域の Keysight 社製 DSOS254A を、入力 RF 信号の発生器として Rohde & Schwarz 社の SMB100B を、周波数標準器として Stanford Research Systems 社の FS725 を使用した。測定はエアコンで 25°C に設定された部屋の中で行なわれた。この結果から、高周波加速器機器のトリガー信号の伝送系として十分な性能を有していると言える。

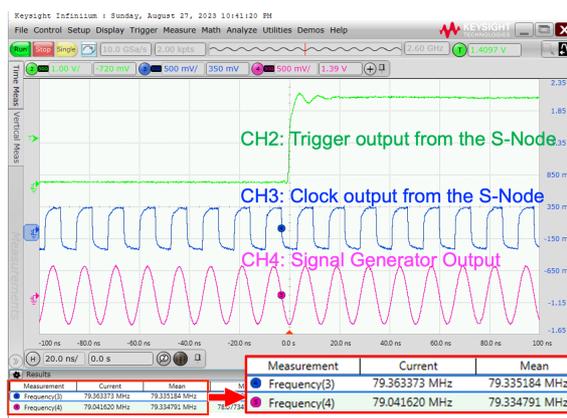


Figure 8: Outputs of a 100 Hz trigger signal with a $5 \mu\text{s}$ width from the S-Node (yellow-green line) and a 79.3 MHz clock signal from the S-Node (blue line) and an input of the 79.3 MHz clock signal from a signal generator (pink line). These signals are synchronized.



Figure 9: Time jitter measurement for 43-hour of a trigger output from the S-Node against a 79.3 MHz clock from a signal generator. The result of a jitter measurement was 8.1 ps (rms).

3.5 トリガー信号伝送系およびディレイ機能の評価

Figure 6 に示されたシステムを実現するために、gateway と firmware の改修を行なった。具体的には以下に示す機能を加えた。

- RF クロックを 10 秒以上にわたりカウントする機能
 - 全てのノードの RF カウンタをプログラムからの指示と PPS 信号によって一括リセットする機能
 - トリガー信号入力時の RF カウント値 ($=T_{\text{trig-in}}$) を取得し、ネットワーク遅延を考慮した遅延時間 ($=T_{\text{link-delay}}: \text{RF カウント値ベース}$) と共に WR ネットワーク経由でブロードキャストする機能
 - ブロードキャスト送信された $T_{\text{trig-in}} + T_{\text{link-delay}}$ にノード毎個別に設定された遅延時間 ($=T_{\text{local-delay}}: \text{RF カウント値ベース}$) を加えたカウント値と、ノードの RF カウント値とが一致した際にトリガー出力を行ない、パルス幅に相当する時間 ($=T_{\text{width}}: \text{RF カウント値ベース}$) が経過した際にトリガー出力を停止する機能
- 改修した gateway / firmware を各ノードにインストール

し、付与した機能が期待通りに動作しているか確認した。Figure 10 は、ファンクションジェネレータ (FG) からの 100 Hz パルス信号 (Fig. 10 橙色) をトリガー入力として M-Node に入力し、遅延時間として $T_{\text{link-delay}}: 80,000$ カウント、M-Node の $T_{\text{local-delay}}: 20,000$ カウント、S-Node 1 の $T_{\text{local-delay}}: 40,000$ カウント、S-Node 2 の $T_{\text{local-delay}}: 80,000$ カウント (1 カウント ≈ 12.6 ns) を指定した時の M-Node からのトリガー出力 (Fig. 10 黄緑色) と 2 台のスレーブからのトリガー出力 (Fig. 10 青色と桃色) の様子を示したものである。各ノードからのトリガー信号が FG のパルス信号に同期して 100 Hz で出力している様子が分かる。また実際に指定した通りの遅延時間 (M-Node: 100,000 カウント = 1.260 ms, S-Node 1: 120,000 カウント = 1.513 ms, S-Node 2: 160,000 カウント = 2.017 ms) となっていることが確認できた。同様に出力パルス幅についても指定値通り (M-Node: 400 カウント = 5.04 μ s, S-Node 1: 200 カウント = 2.52 μ s, S-Node 2: 800 カウント = 10.08 μ s) となっていることも確認できた。

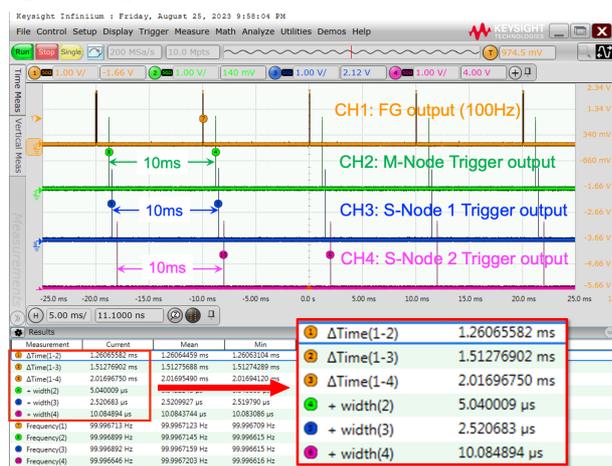


Figure 10: Confirmation of gateway and firmware implementation for the trigger distribution and trigger delay functions. A 100 Hz trigger pulse from an FG is fed into the M-Node. Each node outputs a synchronous 100 Hz pulse output with each specific delay time and pulse width.

本節および前節で述べてきた通り、RFoWR を用いて、加速器機器のトリガー伝送系およびトリガーディレイとして必要な機能と性能を実現できていることがわかる。12.6 ns より細かい遅延時間の設定が必要であれば、デジタルディレイや DDS 出力の位相で調整が可能である。

ただし、FMC DDS による実装ではトリガー出力のチャンネル数が 1 と少ないことがネックになる。より多くのトリガー出力が可能な DDS ボードを新規に開発することは本プロジェクトの予算上の制約で難しいため、FMC DDS の後段に多チャンネル遅延パルスジェネレータを導入し、79.3 MHz クロックとトリガー出力を入力する予定である。

4. まとめ

我々は、加速高周波機器やビームモニター機器の起動タイミングと繰り返し周期を決めるトリガーシステムの開発を進めている。このうち MTU については、79.3 MHz クロックに対して 20.3 ps(p-p) / 3.0 ps(rms) のジッター性能を

実現する独立したユニットとして製作を完了した。温度特性に敏感な部分には 10 mK の温度制御が可能なペルチェ装置を用いることで、8 時間にわたる時間ジッターの安定度 0.1 ps (rms) を実現した。そして我々は、トリガー伝送系とトリガーディレイの実装に RFoWR を適用した。79.3 MHz クロックのカウント機能や PPS 信号によるカウンタの同時リセット機能、WR ネットワーク経由で RF カウンタ値をブロードキャストする機能などを gateway / firmware に実装することで必要な機能を実現できることを確認した。また伝送先でのトリガー出力の 43 時間のジッターが 8.1 ps (rms) であり、我々の加速器機器のトリガー伝送およびトリガーディレイに求められる性能を実現できることを示した。

今後はトリガー出力を安定させるための gateway / firmware の改修を継続し、十分なジッター性能を有する多チャンネル遅延パルスジェネレータの選定を進める。

謝辞

本研究は、JST、未来社会創造事業、JPMJMI17A1 に支援を受けたものである。

参考文献

- [1] 小方厚 他, “レーザーとプラズマと粒子ビーム”, 大阪大学出版会, 2012.
- [2] E. Esarey *et al.*, “Physics of laser-driven plasma-based electron accelerators”, *Rev. Mod. Phys.* **81**, 2009, pp. 1229-1285.
- [3] JST-Mirai Program website, <https://www.jst.go.jp/mirai/jp/>
- [4] Y. Otake *et al.*, “Basic Design of a Linac to Inject Ultra-short Pulse Electron Beams into Laser Plasma Wake Fields”, *Proc.PASJ2019*, Kyoto, Japan, Jul.-Aug. 2019, pp. 1176-1180.
- [5] Y. Koshiba *et al.*, “レーザー加速の特性理解に向けた C-band Linac のシミュレーション”, 2019 年度ビーム物理研究会, Osaka, Japan, Nov. 2019.
- [6] S. Masuda *et al.*, “Development of Low Jitter Synchronization between an Ultrashort Electron Bunch Linac and a Laser Plasma Electron Accelerator”, *Proc. PASJ2020*, Online, Sep. 2020, pp. 188-192.
- [7] <http://www.cellsystem.co.jp>
- [8] <https://www.renesas.com/jp/ja/products/interface/industrial-ethernet/multiprotocol-communication/r-in32m3-module-certified-multiprotocol-industrial-ethernet-solution-r-in32m3>
- [9] <https://ohwr.org/project/wr-d3s/wikis/home>
- [10] T. Wlostowski *et al.*, “Trigger and RF Distribution Using White Rabbit”, *Proc. ICALEPCS2015*, Melbourne, Australia, Oct. 2015, pp.619-623.
- [11] <https://ohwr.org/project/white-rabbit/wikis/home>
- [12] T. Masuda, “Timing Signal Distribution for Synchrotron Radiation Experiments Using RF over White Rabbit”, *Proc. ICALEPCS2019*, New York, NY, USA, Oct. 2019, pp.1316-1320.
- [13] G. Goujon *et al.*, “Refurbishment of the ESRF Accelerator Synchronization System Using White Rabbit”, *Proc. ICALEPCS2017*, Barcelona, Spain, Oct. 2017, pp. 224-228.
- [14] <https://ohwr.org/project/white-rabbit/wikis/Switch>
- [15] <https://safran-navigation-timing.com/product/white-rabbit-switch-low-jitter/>
- [16] <https://ohwr.org/project/spec/wikis/home>
- [17] <https://ohwr.org/project/fmc-dac-600m-12b-1-channels/wikis/home>