

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

増田剛正、益田伸一、熊谷教孝、大竹雄次
高輝度光科学研究センター（JASRI）

発表内容

■はじめに

■マスタートリガーユニット (MTU) について

- 要求
- 実装
- 性能

■トリガー信号伝送系とトリガーディレイについて

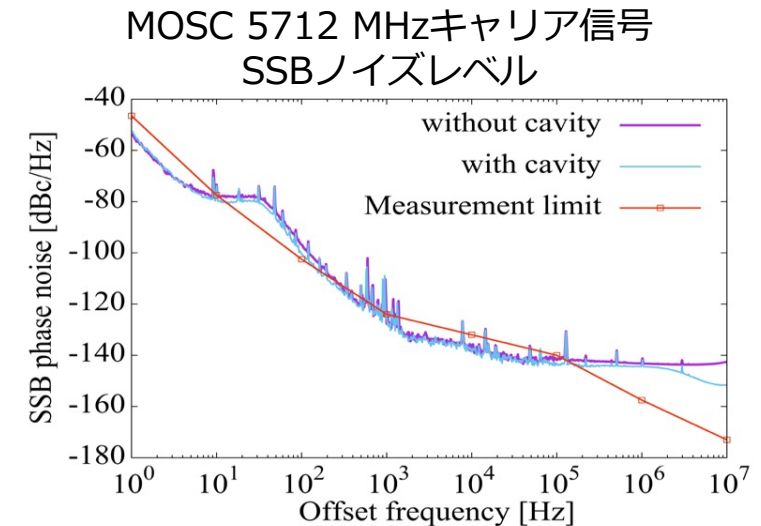
- 要求
- RF over White Rabbitについて
- システム構成
- ジッター性能の評価
- トリガー信号伝送系およびディレイ機能の評価

■まとめ

はじめに

■本線型加速器開発の目的：レーザー航跡場の加速特性の詳細な解明

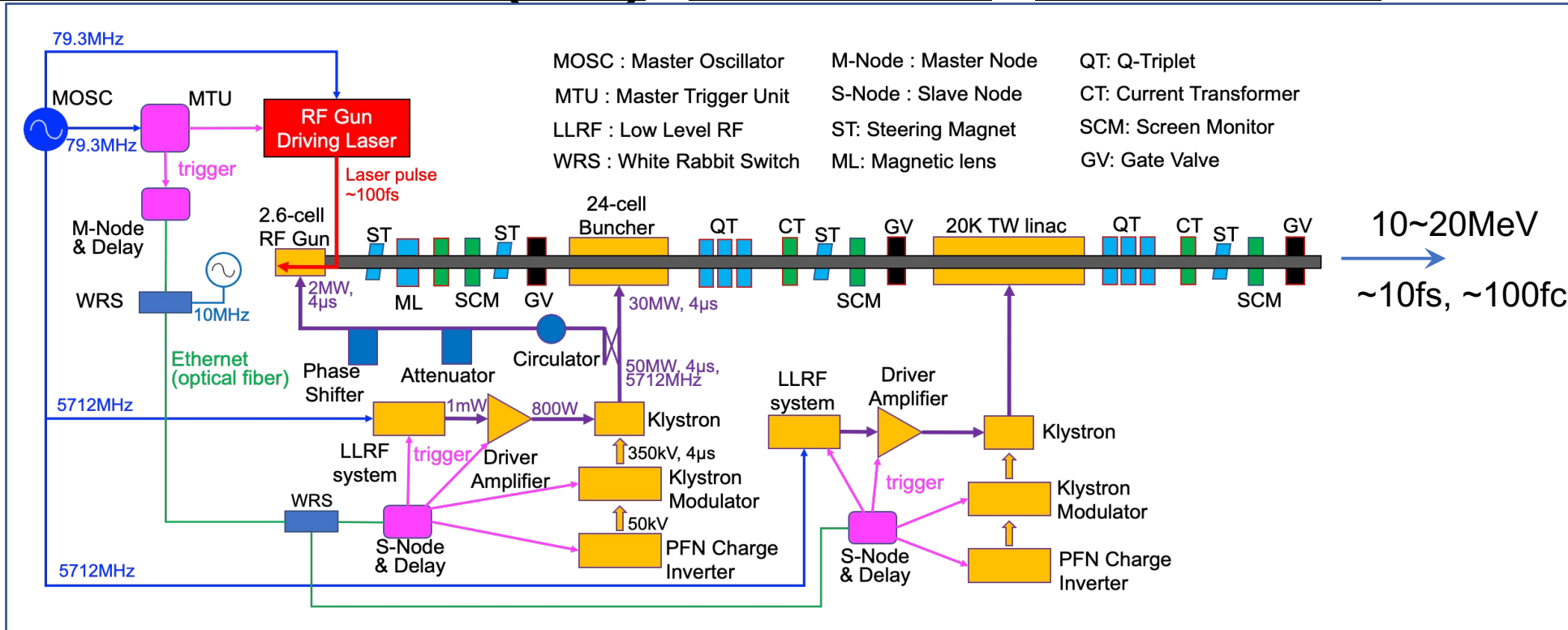
- 確立された高周波加速技術を用いて、安定で再現性の高い極短バンチ電子ビームを生成
- 後段のレーザー航跡場の時間空間位相をスキャンしつつ生成した電子ビームを入射し、マッピングを取ることで、レーザー航跡場の詳細を明らかにする
- 生成する電子ビーム：レーザー航跡場の**横方向サイズ**～ **100 μm** よりも小さく、**縦方向サイズ**～**10-100 fs**よりも短いことが必要
 - シミュレーションにより、電子ビームの横方向サイズ<数10 μm に収束し、縦方向サイズ<10 fsに圧縮されることを確認した
- 航跡場を生成する極短パルスレーザーと**10 fs以下の精度で同期**して入射することが必要
 - 加速器高周波機器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



はじめに

■トリガーシステム

- 加速高周波機器やレーザー機器、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
 - 起動タイミングに求められる安定度：数十ps (rms)程度（一部ビームモニター機器を除く）
 - 繰り返し周期：0.1 ~ 30 Hz
- マスタートリガーユニット(MTU)、トリガー伝送系、トリガーディレイから構成

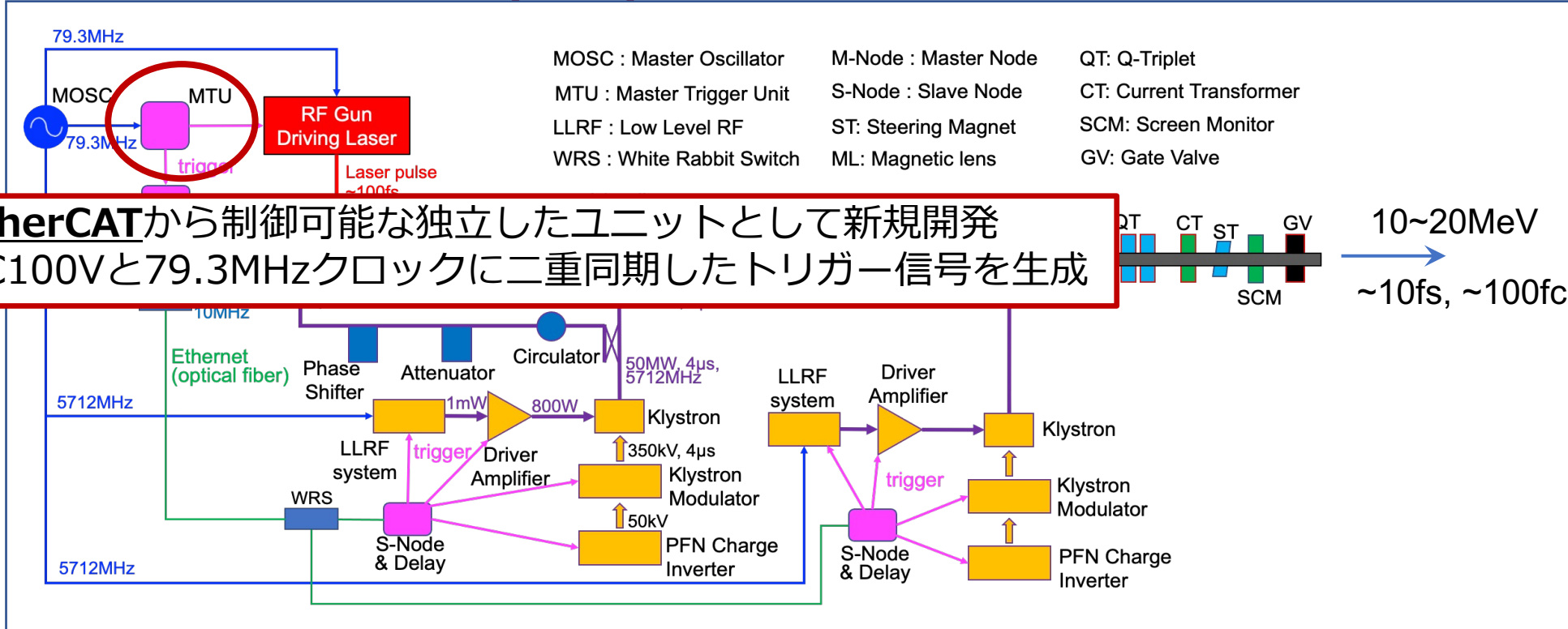


はじめに

■ トリガーシステム

- 加速高周波機器やレーザー機器、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
 - 起動タイミングに求められる安定度：数十ps (rms)程度（一部ビームモニター機器を除く）
 - 繰り返し周期：0.1 ~ 30 Hz
- マスタートリガーユニット(MTU)、トリガー伝送系、トリガーディレイから構成

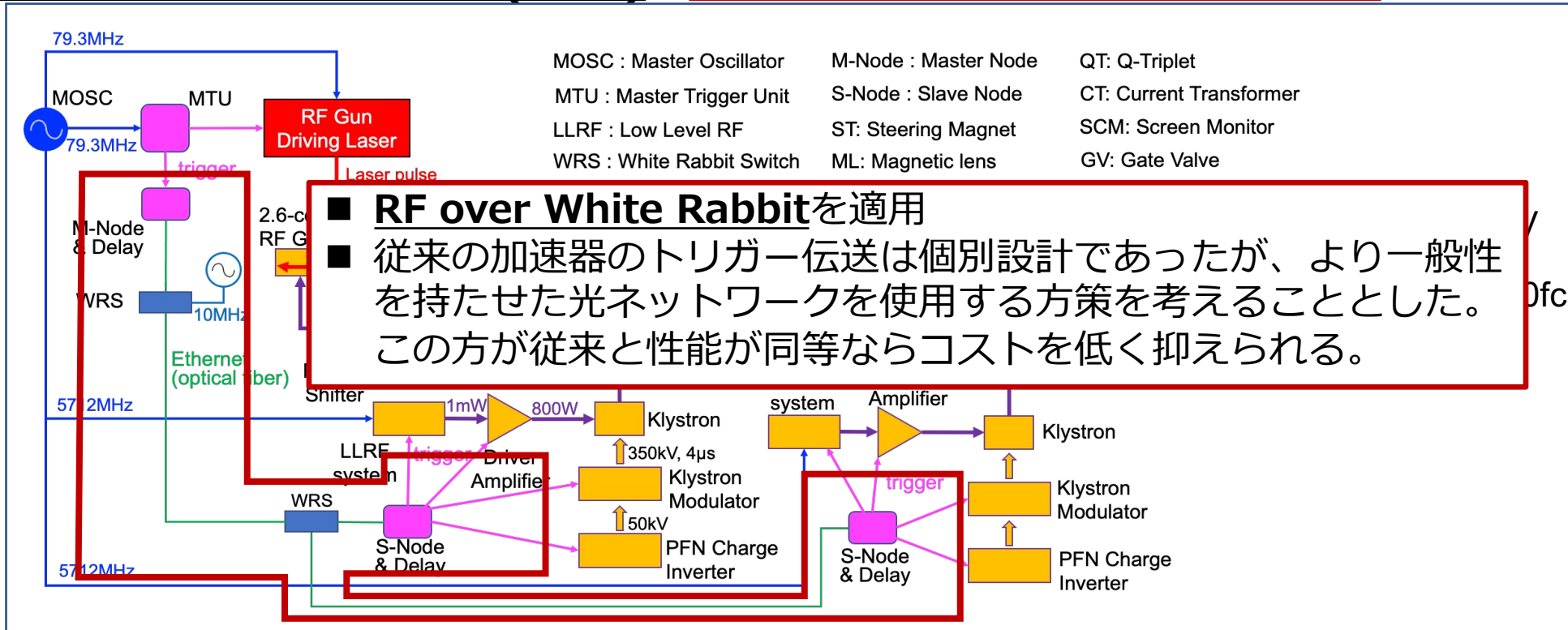
- EtherCATから制御可能な独立したユニットとして新規開発
- AC100Vと79.3MHzクロックに二重同期したトリガー信号を生成



はじめに

■トリガーシステム

- 加速高周波機器やレーザー機器、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
 - 起動タイミングに求められる安定度：**数十ps (rms)程度**（一部ビームモニター機器を除く）
 - 繰り返し周期：**0.1 ~ 30 Hz**
- **マスタートリガーユニット(MTU)**、**トリガー伝送系**、**トリガーディレイ**から構成



マスタートリガーユニット (MTU)

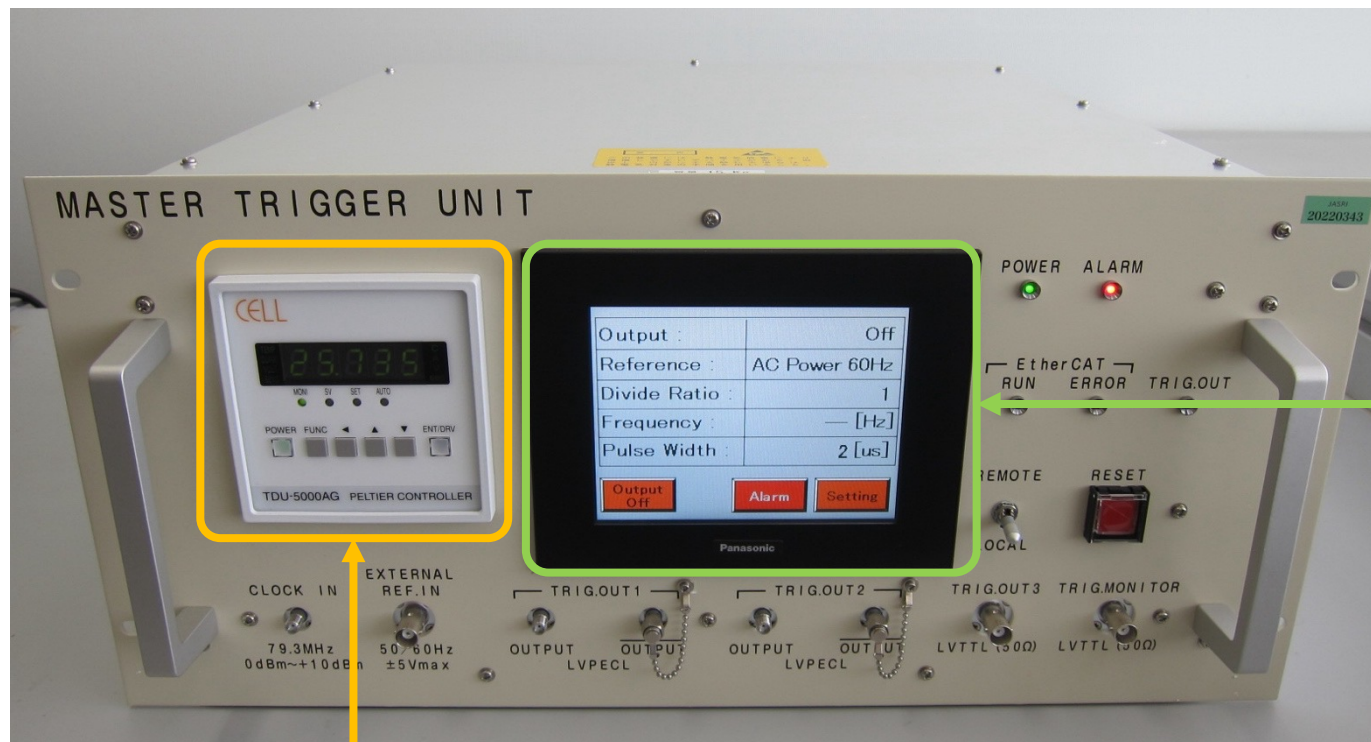
■要求

- 商用電源(AC100V)を基準信号(50 Hz/60 Hz)とし、MOSCからの79.3 MHzクロックと二重同期したトリガー信号を出力
 - 商用電源の周波数変動による電子ビームへの影響を抑えるため
- 79.3MHzクロックに対するトリガー信号の時間ジッター : 30 ps(p-p)以内
 - 高い安定度が求められるビームモニター機器を視野に入れると、Cバンド加速高周波5,712MHzで最終同期を掛ける可能性があり、5,712MHzの1/4波長以内に十分収まる必要がある。
- 周囲温度の変化によるトリガー出力信号のドリフト : 10 ps/K以下 (目標 : 4 ps/K以下)
- 基準信号をプログラマブルに分周可能 (分周比 : 1 ~ 600)
- EtherCAT経由で遠隔から制御可能、19インチラックにマウント可能な独立したユニット

マスタートリガーユニット (MTU)

■実装

高さ：5U程度



タッチパネル
■ 現場での操作用

ペルチェコントローラ (セルシステム社 : TDU-5000AG)

■ 10mK以下の精度で制御が可能

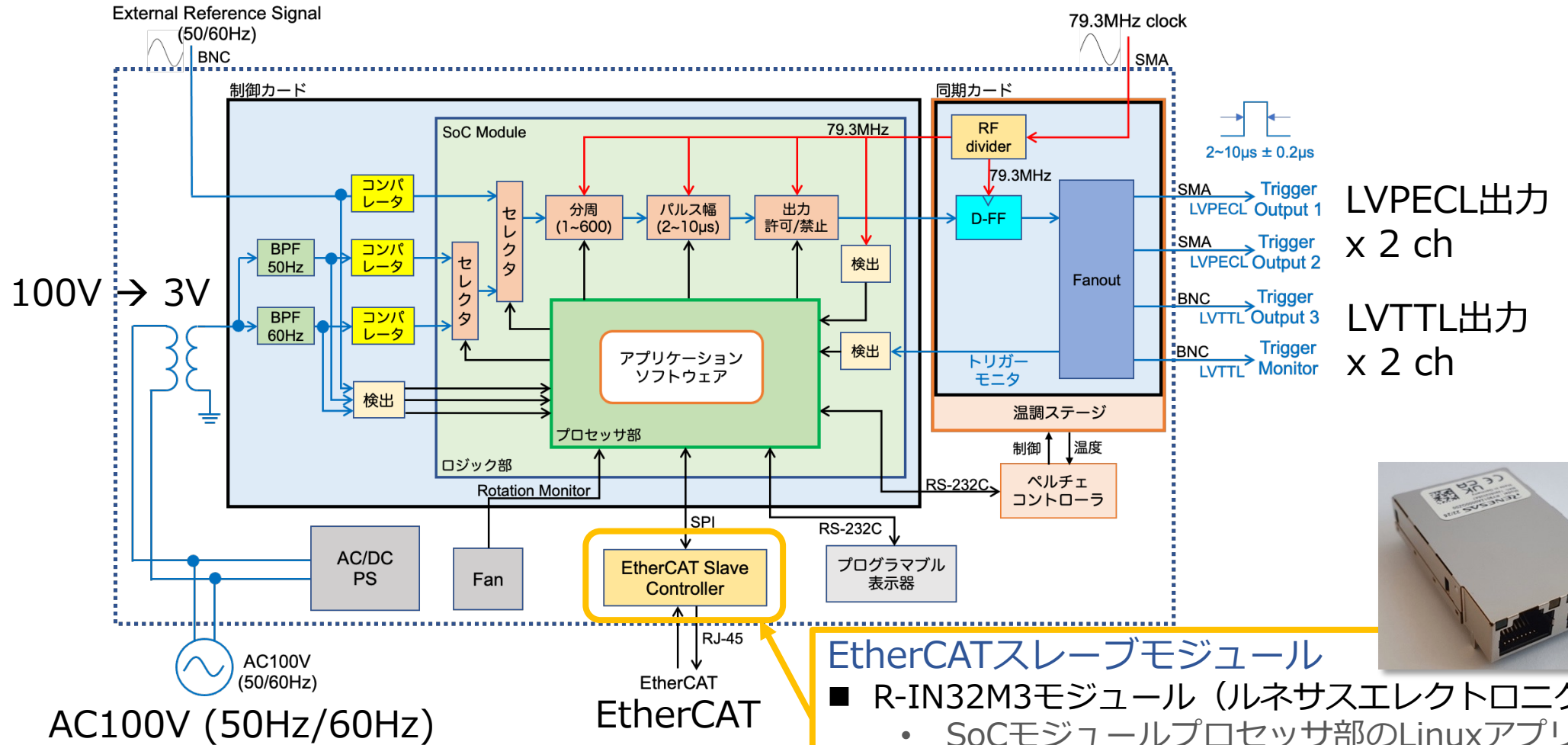
- ・ トリガー出力のドリフトを抑えるため、温度変化が出カタイミングの変動に敏感な部分を温調ステージ上に載せて、温度制御を施した

マスタートリガーユニット (MTU)

■実装

外部基準信号 (50Hz/60Hz)

79.3 MHzクロック (MOSCから)



EtherCATスレーブモジュール

- R-IN32M3モジュール (ルネサスエレクトロニクス社)
 - ・ SoCモジュールプロセッサ部のLinuxアプリケーションから制御

マスタートリガーユニット (MTU)

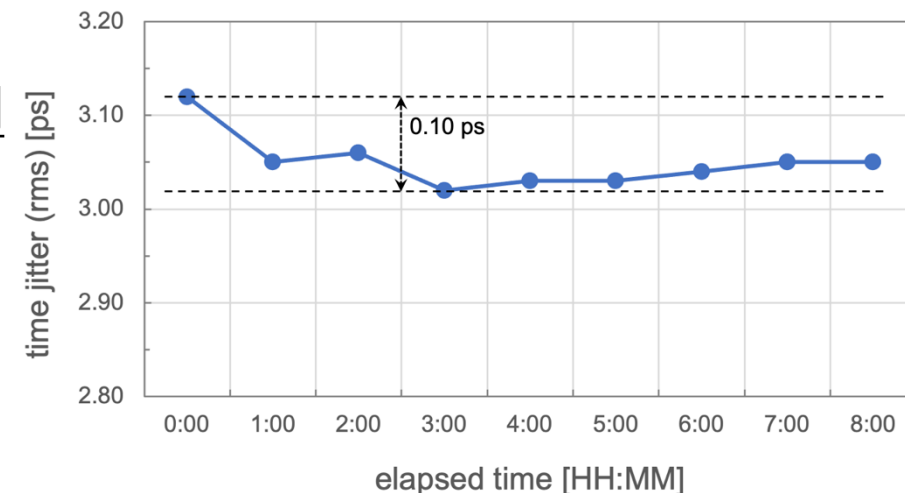
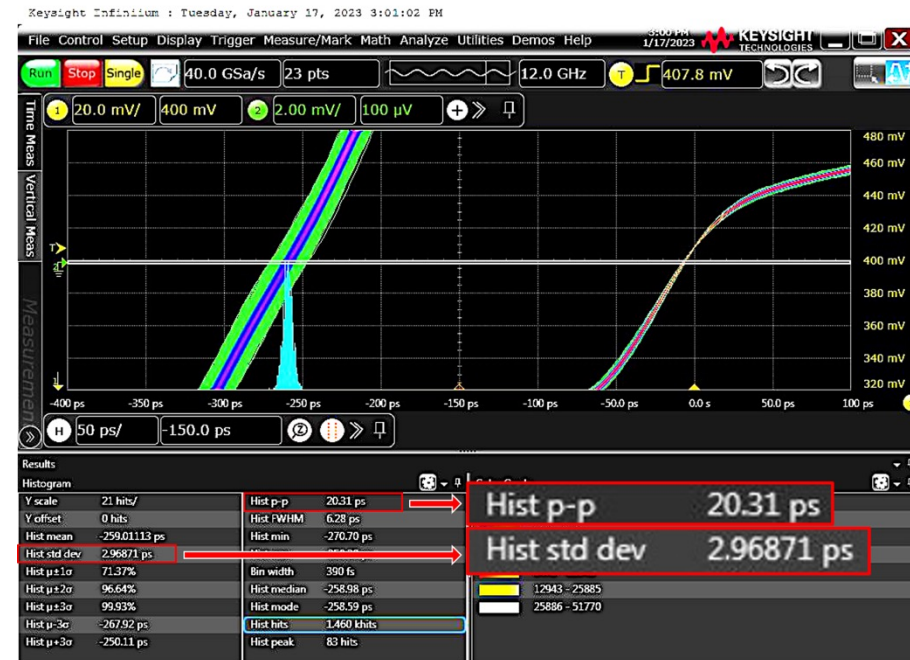
■性能

- MOSCからの79.3MHzクロックに対する時間ジッター：**20.3 ps(p-p) / 3.0 ps(rms)**
 - 測定条件
 - 基準信号：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°C、ペルチェ設定温度：33°C
 - オシロスコープ：DSA9130A(Keysight社製)、帯域幅13 GHz

- 時間ジッターの長時間安定度試験：**0.1 ps (rms) / 8時間**

- 測定条件

- 1時間おきに上記時間ジッター計測を行い (10分間程度)、8時間まで繰り返し行なった。
- それ以外は上記と同じ



マスタートリガーユニット (MTU)

■性能

- 出力信号のドリフト : **0.7 ps/K**

- 測定条件

- 基準信号 : 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 μs
- 恒温槽温度を20°C→25°C→30°Cと変更。変更後は1時間にわたってエージングした後に測定。
- ペルチェ設定温度 : 33°C
- オシロスコープ : DSA9130A(Keysight社製)、帯域幅13 GHz
- Histogramの平均値のドリフトを測定

恒温槽設定温度 (°C)	周囲温度 (°C)	Histogram平均値 (ps)
+20	19.513	-246.661
+25	24.602	-243.533
+30	29.582	-239.548

10°Cの変化に対して
~7 psのドリフト

- 以上の結果から、**マスタートリガーとして要求された性能を満たしている。**

トリガー信号伝送系とトリガーディレイ

■トリガー伝送系への要求

- 必要とされる安定度：環境温度の変化に対するドリフトを含めて数十ps (rms)
- 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。

■トリガーディレイへの要求

- 必要とされる安定度：トリガー伝送系と同様
- 遅延時間の設定範囲：0 ~ 10秒以上が必要
 - 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
- 遅延時間の設定分解能：レーザーパルスの79.3 MHzを同定できる12.6 ns以下

→ トリガー信号伝送系とトリガーディレイの実装に**RF over White Rabbit (RFoWR)** を適用

- **Direct Digital Synthesis (DDS)**によるRF信号の生成を**White Rabbit (WR) ネットワーク**の同期クロックを用いて行なうことで、**外部入力のRF信号を伝送（再生成）する技術**
 - WR：サブナノ秒オーダーの正確度とピコ秒オーダーの同期精度を提供する拡張Ethernet

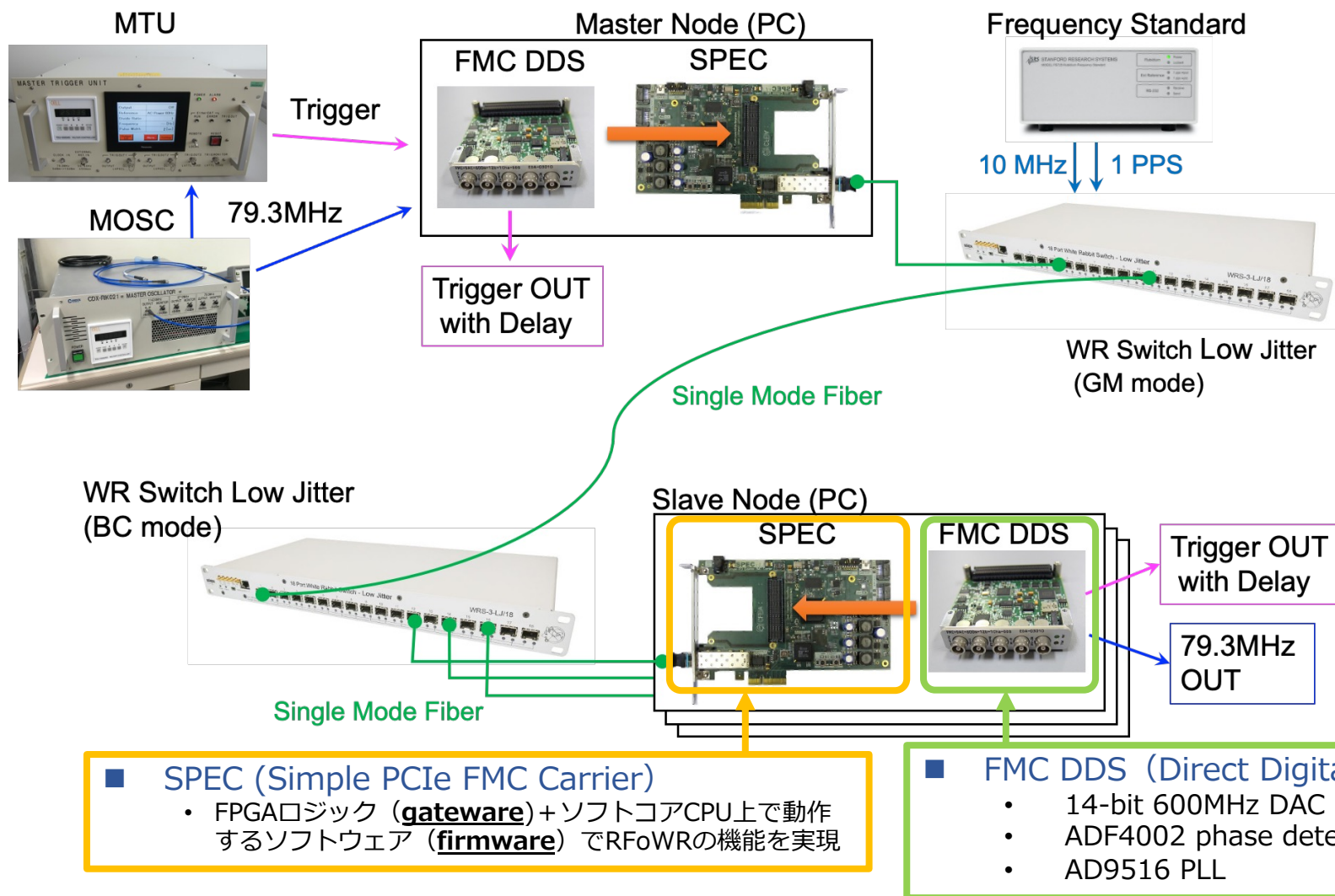
トリガー信号伝送系とトリガーディレイ

■WRおよびRFoWRを採用した理由

- 過去の研究から、6~7 ps (rms)のジッターでの79.3 MHzクロックの伝送が期待できた
- 拡張や増設が容易である
- 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
- 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することが期待できる
- 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
- オープン・ソース・ハードウェアとして国際協力のもとで開発や応用が進められているため、情報収集が容易で、ベンダーロックインの心配がない
- ...

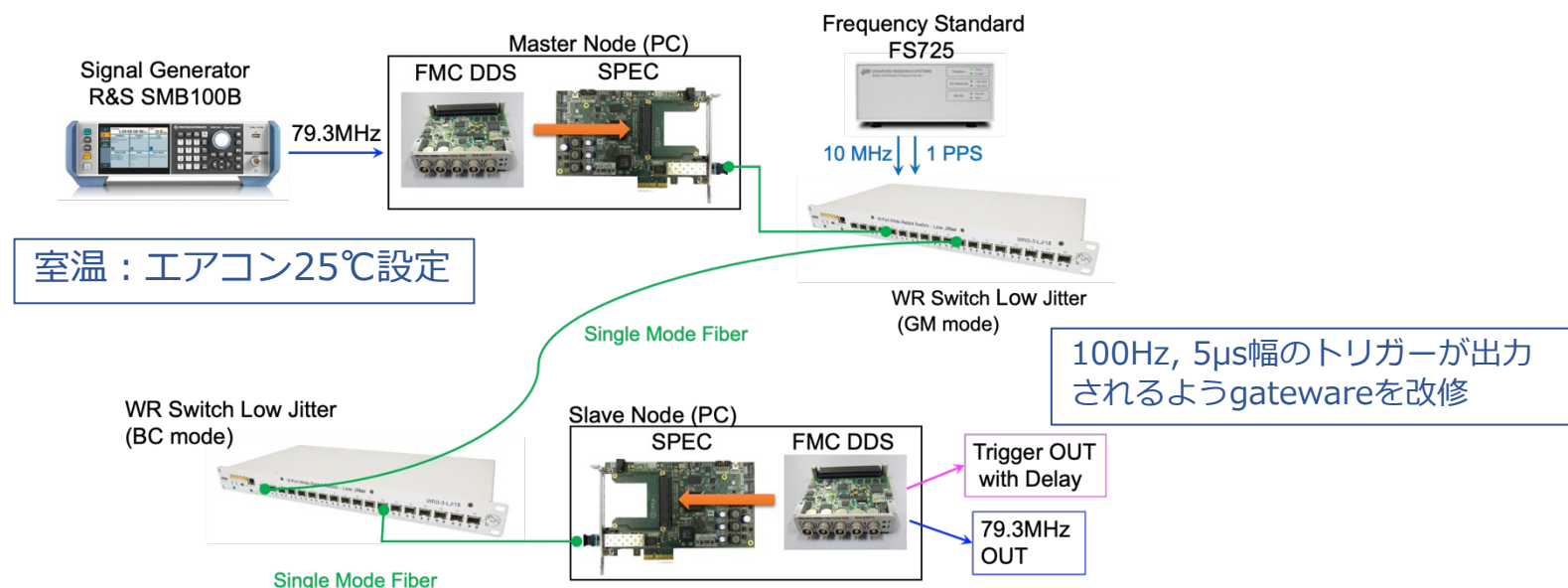
トリガー信号伝送系とトリガーディレイ

■システム構成



トリガー信号伝送系とトリガーディレイ

■ジッター性能の評価

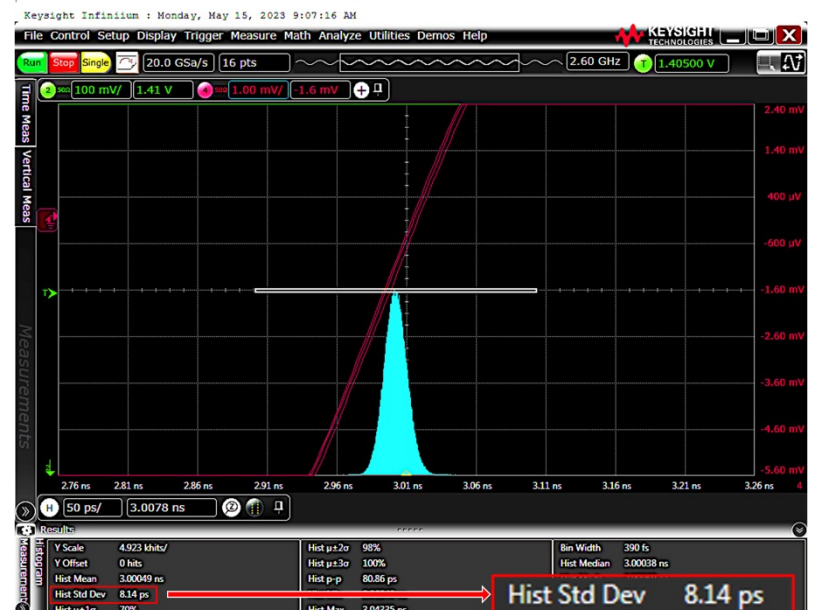
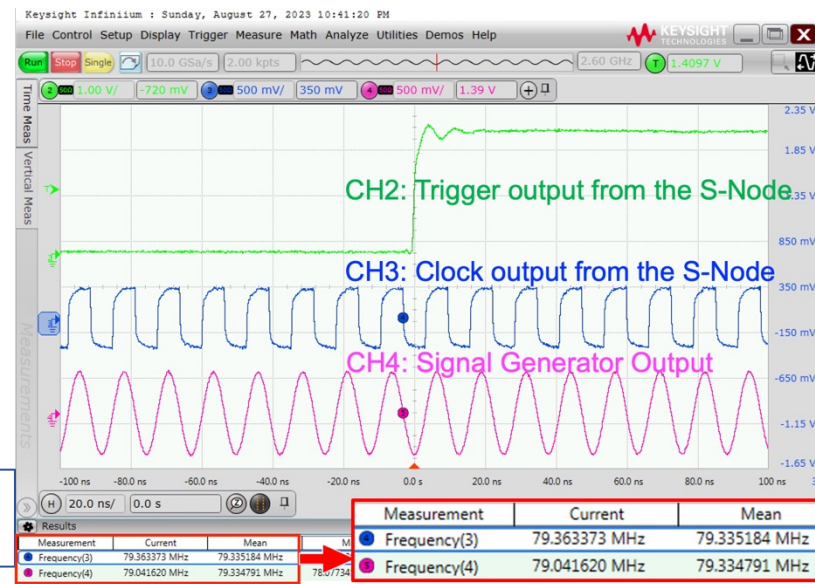


- SGの79.3MHzクロックに対するSlave Nodeからのトリガー出力のジッター：**8.1 ps (rms)**

- 測定条件

- オシロスコープ：DSOS254A (Keysight社製)、帯域幅2.5 GHz
- 上記構成で43時間にわたり計測

→ **トリガー伝送系およびトリガーディレイとして要求されるジッター性能を満足している。**



トリガー信号伝送系とトリガーディレイ

■RFoWRのgatewayとfirmwareを改修し、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**

- カウンタは32ビットで実装（10秒以上の遅延を実現するため）

- 全ノードの **RFカウンタを同時に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_{trig-in})を取得し、ネットワーク遅延を考慮した遅延時間(=T_{link-delay})と共にWRネットワーク経路でブロードキャストする機能**

- **トリガー出力のON/OFF制御機能**

- ノードのRFカウント値 = $T_{\text{trig-in}} + T_{\text{link-delay}} + T_{\text{local-delay}}$ → トリガー出力をON

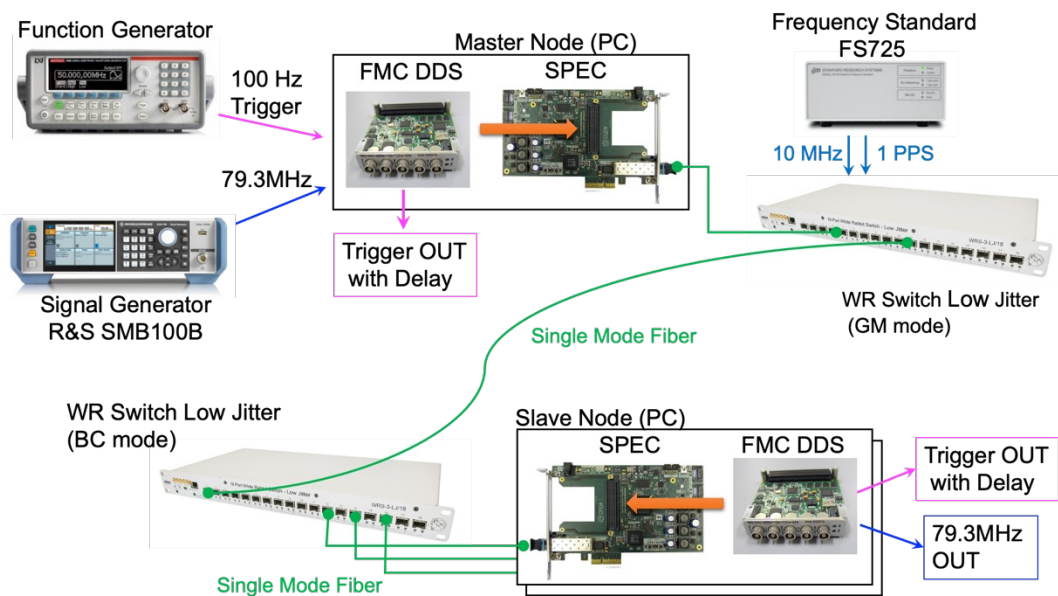
- ノードのRFカウント値 = $T_{\text{trig-in}} + T_{\text{link-delay}} + T_{\text{local-delay}} + T_{\text{width}}$ → トリガー出力をOFF

● $T_{\text{local-delay}}$: ノード毎個別に設定される遅延時間

● T_{width} : ノード毎個別に設定されるパルス幅に相当する時間

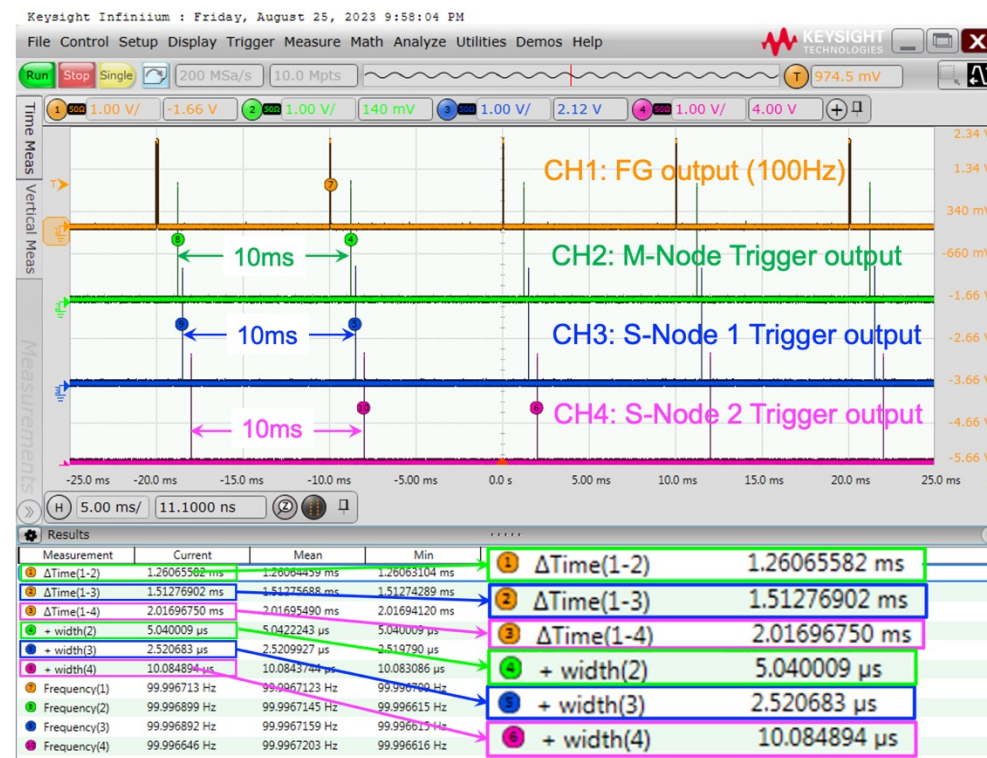
トリガー信号伝送系とトリガーディレイ

■ トリガー信号伝送系およびディレイ機能の評価



遅延時間パラメータの設定 (1カウント=12.6ns)

	Master Node	Slave Node 1	Slave Node 2
$T_{\text{link-delay}}$		80,000 カウント	
$T_{\text{local-delay}}$	20,000 カウント	40,000 カウント	80,000 カウント
$T_{\text{link-delay}} + T_{\text{local-delay}}$	100,000 カウント = 1.260 ms	120,000 カウント = 1.513 ms	160,000 カウント = 2.017 ms
T_{width}	400 カウント = 5.04 μs	200 カウント = 2.52 μs	800 カウント = 10.08 μs



- 各ノードからのトリガー出力がFGからの100Hzに同期した100Hzとなっている
- 設定された遅延時間パラメータの通りの遅延時間とパルス幅が観測されている

→ 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は実装できている

トリガー信号伝送系とトリガーディレイ

■課題

- トリガー出力が安定しない（時々タイミングのジャンプが起こる）
 - 改修したgateway/firmwareに問題がありそう
- FMC DDSによる実装：トリガー出力のチャンネル数が1チャンネルのみ
 - 本プロジェクトの予算上、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困難
 - 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、FMC DDSからの79.3MHzクロックとトリガー出力を入力する予定。

まとめ

- 加速高周波機器やビームモニター機器の正確な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。
- MTUについては、EtherCATから制御可能な独立したユニットとして新規に開発を行なった。
 - 時間ジッター：**20.3 ps(p-p) / 3.0 ps(rms) を実現**（要求値（30 ps(p-p)））
 - 温度ドリフト特性：ペルチェ装置による10mKの温度制御により、**0.7 ps(rms) /K を実現**（目標値（4 ps (rms)/K））
- 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。
 - 伝送先でのトリガー出力の時間ジッター：**8.1 ps (rms) を実現**（要求値（数十ps(rms)））
 - gateway/firmwareを改修することで、トリガーディレイとして必要な機能を実現できた
- 今後
 - トリガー出力を安定させるためのgateway/firmwareの改修
 - 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

謝辞

- マスタートリガーユニットの開発では、三菱電機ディフェンス&スペーステクノロジー株式会社の皆様にご尽力戴きました。ここに感謝の意を表します。
- 本研究は、JST、未来社会創造事業、JPMJMI17A1に支援を受けたものです。

ご清聴、ありがとうございました。