



研究技術ノート

White Rabbit を用いた核融合実験向けサブナノ秒精度 タイミング配信の検討

Study of White Rabbit-Based Sub-Nanosecond Precision Timing Distribution for Fusion Experiments

中西 秀哉^{1,2)}, 伊藤 康彦¹⁾, 前野 博也¹⁾, 大砂 真樹¹⁾

NAKANISHI Hideya^{1,2)}, ITO Yasuhiko¹⁾, MAENO Hiroya¹⁾ and OHSUNA Masaki¹⁾

¹⁾自然科学研究機構 核融合科学研究所, ²⁾総合研究大学院大学

(原稿受付: 2021年 5 月31日 / 原稿受理: 2021年 8 月10日)

核融合プラズマ実験においても急速に普及した毎秒ギガサンプル超の高速サンプリング計測では、トリガーやクロックなどタイミング信号到達の位相遅延が相対的に大きくなり、時間同期のための遅延補償機構が必要になる。大型加速器分野で開発された高精度ネットワーク時刻同期技術 White Rabbit は、Ethernet 接続された各ノードをサブナノ秒精度で標準時刻に同期可能で、他の高精度時刻同期手法と比べて実験プラントへの適用性にも優れる。従来の核融合実験向けタイミング配信技術を刷新するべく機能検証を行った結果、分周クロック出力や複数ノードのグループ化取り扱い等を機能追加することで、核融合分野における関連装置実験の計測制御系にも適用可能であることが確認された。

Keywords:

Timing distribution, LHD, Synchronous Ethernet (SyncE), IEEE1588, PTPv2, GPS/GNSS, White Rabbit, WRTD

1. はじめに

核融合実験における高温プラズマ等の物理計測では、毎秒1ギガサンプル (1 GS/s) を超える高速サンプリングADCが急速に普及してきている。こうしたギガサンプル/秒を超える高速サンプリングでは、計測対象を複数の計測器で同時計測する場合、トリガー配線等の違いにより生じるタイミングのずれが1クロック (= 1 サンプル時間) を超えて大きくなり、同時性を損なってしまう。

これまで核融合実験では、高温プラズマが持つ電磁流体力学的な固有振動に合わせた kHz~MHz の計測が主流で、各信号の伝送線路長の違いによって生じるサンプリング時刻のずれもサンプリング周期より十分短く、ほぼ無視して扱うことができた。計測器を同期させるデジタル式タイミング配信についても、同程度のマイクロ秒~サブマイクロ秒の時間分解能をもったものが多かった[1]。

これに対して、ギガサンプル級の計測器、例えば1 GS/sにおいては、トリガー伝達ケーブル長がわずか3m 違うだけの隣の計測器でも10サンプル以上の時間的ずれが生じる。従来から大小の高温プラズマ実験で計測器等の動作同期用にしばしば使用されてきたトリガーパルス等とは異なる、新たな高精度同期のしくみを考える必要がある。

ここで、核融合実験で使われる計測・制御用のタイミング配信には、以下の機能が必要と考えられる。

1. 機器動作の同期用トリガー配信
2. フィードバック制御等のイベント配信

3. 計測サンプリングの同期クロック配信

上記の1. 2. については、必ずしも区別が明確でないケースもあるが、核融合実験では従来から、あらかじめ決められた (プリプログラムされた) タイミングによって機器動作を順次進行するシーケンス制御がしばしば使われるため、シーケンス制御で用いる1. と、任意時刻にタイミングが発生する2. を分けて考えることも多い。

上記3機能を高精度同期の観点から見比べると、予期できない2. の信号配信に伴う伝送遅延は、因果律的にも補償することが不可能で、少なくとも光信号の伝播時間だけ遅延が生じる。これに対して1. は、JST や UTC など標準時を基準に、予めトリガー出力時刻を高精度に定めておくことで、離れた場所でも位相を揃えた同時トリガー出力が可能となる。

昨今ほとんどの機器はデジタル化、インテリジェント化されており、各々機器がクロックを内蔵、それに基づく動作を行っている。そのため、3. のサンプリング・クロックに関する精度上の問題として、各々内蔵クロックの周波数同一性が悪いと、同じ周波数で動作するはずの機器間で大きくクロック数、サンプル数が違ってしまうことがある。よく知られているとおり、この問題は単一の同期クロックを全装置に配信・共有することで基本的に回避可能だが、気象観測など広域に分散した系では信号線や光ファイバー等による配信が難しく、これもGPSなどを用いて標準時に同期させるのが一般的となっている。

昨今、インターネットではNTP (Network Time Protocol) による時刻同期が一般に利用されており、ミリ秒レベルで標準時への同期が提供されている。この同期精度を μ 秒レベルまで改善する Precision Time Protocol (PTP) も IEEE1588 規格として規定されており、既に Linux や Windows など汎用 OS から利用可能である。

ギガサンプル級の高速計測が求めるナノ秒レベル時刻同期についても、ここ10年、欧州原子核研究機構 CERN 等において精力的に研究開発が進められており、その成果である White Rabbit 仕様は、2020年6月、IEEE1588-2019 に正式採録された[2]。今後、産業等を含め多方面への応用が期待されている。

そこで本研究では、次世代の核融合実験に向けて、タイミング配信に求められる要件を改めて整理、吟味して、その具体的実装について検討する。

2. LHD 計測タイミングシステム

本節では、これまで核融合実験で用いられてきたデジタルタイミングシステムの代表例として、LHD実験向けに開発された同期式デジタル計測タイミングシステム (DTS) の概要を述べる[1]。DTSは1998年のLHD実験開始以来、現在まで継続して運用されているタイミング配信システムで、LAN等でよく用いられる GI-MMF 仕様の光ファイバー1芯に、同期用の10 MHzクロック信号を流し、その上に主トリガー情報として32ビット長 $\times$ 3連送のデジタルメッセージを重畳、NRZ (NRZ-L) コード変調して送っている。トリガーメッセージおよび同期クロックは、主変調器によって生成され、復調器と呼ばれる末端のタイミング出力装置すべてに同時配信される。図1にDTS変調器～復調器の接続の概略を示す。

分散配置された複数の復調器は、一台の主変調器から光 Fan-out モジュールを用いて樹状接続されており、途中に中継変調器を入れることで、下流に接続された復調器群をグループ化運用することも可能となっている。変調器、復調器ともに、開発当初は VME モジュールとして実装され、同じく VME バス規格の CPU モジュールとその上で動作するリアルタイム OS から制御、運用されていた。その後、保守、増設等にかかるコスト削減のため、FPGA ベースのワ

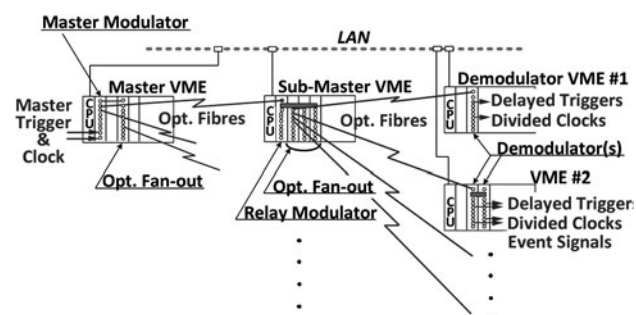


図1 LHD計測タイミングシステムDTSの樹状接続形態。主変調器～復調器間に中継変調器をつなぐことで、復調器のグループ化にも対応している。光ファイバー1芯1波長を用いた一方（変調器→復調器）のデジタル信号伝送となっている[1]。

ンチップ組込み Linux システムに移植され、利用増に対応している[3]。

各々の復調器は、主トリガーから予め設定された時間 (μ 秒単位) だけカウントダウン後に出力される遅延トリガー出力と、同じく10 MHz同期クロックからプリプログラムされた分周率によって生成される分周クロック出力を、各々6～8チャンネル有しており、大型実験における計測器の複数同時運転にも対応可能である。

特徴的な機能として、ON/OFF周期および繰り返し回数を指定できる複数トリガー (バーストリガー) 出力と、同じく周期・繰り返し回数でON/OFFできる分周クロック (ゲート付クロック) 出力を持ち、計測器など受動装置のみならずアクチュエーター等能動機器に求められる制御パルス出力にも柔軟に対応できる仕様となっている (図2を参照)。ただし、上記のカウンター動作中に同じ主トリガーが来た場合は無視されてしまう動作上の制約がある。

もう一つの重要な特徴が、変調器・復調器ともTCP/IPネットワークに完全対応しており、設定・操作等すべての機能がLAN経由で呼び出し可能になっている点である。

ONC RPC プロトコルを用いて、変調器・復調器のサーバ側諸機能を Windows 上で動作するクライアント GUI プログラムから呼ぶことで、マルチユーザ環境でも柔軟なタイミング設定及び出力が行えるため、計測器ごとに配備された復調器が単独で較正実験用にタイミング出力運転が行えるなど、極めて柔軟な運用が実現されている。

主トリガーと同期クロックを配信する主変調器から全ての復調器まで伝送される同期信号は、経由する光ファイバー長に応じて到着に遅延が生じる。この遅延を補正するしくみとして、各々復調器は、ファイバー経路ごとに予め測定された遅延時間を遅延時間レジスター (5 ns 刻みで最大385 ns まで) に保持、各トリガー出力タイミングのカウント時に相殺する機能を有する。

しかし、デジタイザに代表される半導体素子の処理性能向上、データ伝送路の高速化などによって、近年、 ~ 10 GHz といった高速サンプリング計測が普及した結果、10 MHzの同期クロック共有と各ノード固定の遅延時間補償のみでは、高速サンプリングに必要な高時間分解能

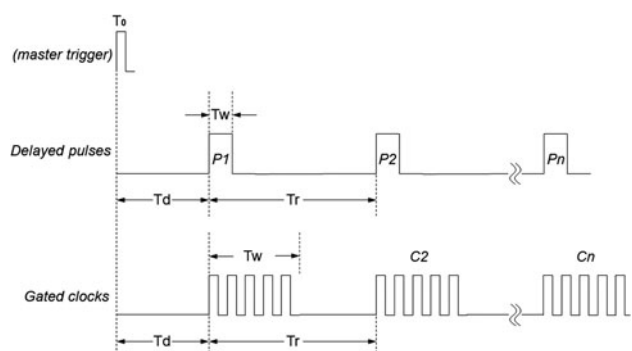


図2 DTSにおける繰り返し周期・回数が指定可能なバーストリガー出力および同じく周期・繰り返し回数で出力をオン・オフできるゲート付クロックの概要。後者のクロックは出力パルス周波数を指定して、出力デューティ比が50%固定であるのに対して、前者は出力パルスのデューティ比 T_w/T_r が可変となる。

を提供できなくなっており、技術更新が望まれている。

3. タイミング情報配信の基本要件と技術

複数の制御機器・計測器間で共有されるタイミングには、

- ① 同時刻性・位相同期性
- ② 同一周波数（周期）性
- ③ 高周波数安定性

の3性能、およびネットワーク利用の機能が求められる。

Ethernet に代表される標準規格のネットワーク伝送方式を同期タイミング情報の配信に用いると、送受信部品や中継分配装置に汎用製品が利用できて、多数ノードに大規模配信する場合に有利である。独自仕様で実装する場合と比べ、標準規格に準拠する煩雑さは増えるものの、流通量の多い汎用部品・機器は代替品が多く入手性も高いなど、標準化による利点は多く、中長期的な保守性も勘案すると十分メリットがあるといえる。

冒頭でも述べたとおり、高精度なタイミング配信には、信号伝送に伴って生じる遅延時間の精緻な計測と補償が不可欠で、途中に入る中継装置を含め、分散配備された全てのタイミング送受信装置間で、遅延情報を双方向に授受するネットワーク通信機能が必須である。前節で解説したLHD用DTSは、メッセージ送信が一方のみで、ノード毎の遅延計測および補償が動的に可能となっていないため、高精度化が難しい。

3.1 基準クロック発生器

インテリジェントなデジタル機器は、動作クロックが必要なため、クロック生成用の局部発振器を内蔵している。周波数を大きく連続的に変化させる必要がある等のケースを除き、計測・制御機器では安定性に優れた水晶発振器（Crystal Oscillator, XO）を用いることが一般的である。水晶発振器は、以下の4つの種別に大きく分かれており、各々安定度は表1に示すとおりである[4, 5]。

- i. Simple Packaged Crystal Oscillator (SPXO)
- ii. Voltage Controlled Crystal Oscillator (VCXO)
- iii. Temperature Compensated Crystal Oscillator (TCXO)
- iv. Oven Controlled Crystal Oscillator (OCXO)

上記の安定化機構を複数組み合わせたTCVCXO, OVCXO等も製品として存在している。

水晶発振器より高い 10^{-11} 台以上の安定度が求められる場合には、ルビジウム（ ^{87}Rb ）発振器などの原子時計が使用される。ルビジウム発振器は、基板上に搭載可能なモジュール製品も存在しており、しばしば商用でも利用されるが、価格は数10万円と、水晶発振器に比べるとかなり高額である。これに対して、セシウム（ ^{133}Cs ）原子時計は、長

期安定度が $10^{-14} \sim 10^{-15}$ に達し、国際標準として周波数基準にも使用されるが、装置価格も数100万円以上と極めて高価である。

高い安定度を維持しつつ、基準となる発振器とは異なる周波数を得たい場合、あるいは周波数を広範囲に変化させたい場合には、位相同期回路（PLL）が一般的に用いられる。元々は周波数の同調など周波数フィードバック制御のためのアナログ回路技術であったが、プログラマブル分周器を用いて部分的にデジタル化されたPLLが、周波数シンセサイザー等の名称で広く使われるようになってきている。更にTDC（Time-to-Digital Converter）等を用いてPLL回路を完全デジタル化するADPLLも実用化に向けた研究が進んでいる[6]。

単体で動作する市販の基準周波数発生装置としては、原子時計など高安定な基準発振器を内蔵し、PLL回路によりロックされたOCXO等から1 Hz（1 PPS）、10 MHz等の基準周期用クロック信号を出力する製品が一般的である。

3.2 GPS/GNSS

Global Positioning System（GPS）は、広く一般に普及してよく知られた技術となっているが、本来、米国によって開発・運用されている全地球測位システムを指す。米国GPSのほか、日本の準天頂衛星システム「みちびき」、欧州Galileo等も合わせて、全地球航法衛星システム（Global Navigation Satellite System, GNSS）と総称される。

GPS衛星には周波数安定度が $10^{-12} \sim 10^{-13}$ の高精度なセシウム原子時計あるいはルビジウム原子時計が搭載されており、測位信号が送信されたGPS時刻と、GPS受信機が複数GPS衛星から信号を測定して得た伝播遅延時間から、受信地点の座標と標準時刻を高精度に補正して得ることができる。このためGPS受信機は、高価なセシウム原子時計の代わりに、NTP時刻サーバの基準時計、あるいは他のルビジウム原子時計など高精度高安定な基準周波数発生器の常時較正源としてしばしば使われ、その出力は、次節で述べる同期イーサネットおよびPTPにおける一次基準クロック（Primary Reference Clock, PRC）および一次基準時計（Primary Reference Time Clock, PRTC）でも利用される。詳細は後節で改めて述べる。

ここで留意すべきは、GPS時刻は原子時計により算定される国際原子時（International Atomic Time, TAI）を基準にしており、運用開始1980年1月6日当時のTAIとUTCとのずれ19秒を反映して $\text{TAI} - \text{GPS} = +19$ 秒で固定されている点である。これに対し、うるう秒を適宜挿入して地球の自転による影響を調整する協定世界時（Coordinated Universal Time, UTC）や日本標準時JST等は、その後に挿入されたうるう秒の積算秒数（2020年までに18秒）だけ更にずれて $\text{GPS} - \text{UTC} = +18$ 秒となっている[7]。このGPS-UTC秒数は、GPS信号内で時刻オフセット値としてアナウンスされており、GPS受信機はそれを用いて補正を行うことでUTC時刻を得ることができる。

すでに夥しい数のコンピュータやネットワークシステムが時刻同期サービスに依存している昨今、うるう秒の挿入による時刻処理の混乱は深刻な社会問題となっている。う

表1 水晶発振器の主な分類と用途[4, 5]。

種別	周波数安定度 (s^{-1})	特徴・主な用途
SPXO	$\pm 50 \sim 100 \times 10^{-6}$	民生デジタル／通信機器
VCXO	(同上程度)	周波数可変・RF受信機など
TCXO	$\pm 0.5 \sim 2.5 \times 10^{-6}$	温度補償回路付・無線機
OCXO	$\pm 1 \times 10^{-7} \sim 5 \times 10^{-10}$	恒温槽入・携帯電話基地局

るう秒の存続／廃止については、2000年ごろから議論が行われており、2012年の国際電気通信連合（ITU）総会で一旦廃止が提案されたものの、2015年の関連会議でも異議が解消されず、2023年まで継続検討が決まっている[8]。

GPS/GNSS 時計の利点は、このように原子時計を用いて高精度に同期された標準時情報を常時受信、利用できる点で、電波時計が使用する長波帯の 40 kHz, 60 kHz 標準電波（日本では JJY と呼ばれる）に比べて、大気層を通過する距離が短く、受ける擾乱が少ないという長所がある。

4. 同期イーサネット（SyncE）

同期イーサネット（Synchronous Ethernet, SyncE）は、2008年に ITU-T G.8261/2/4 勧告で規定されたネットワーク周波数同期方式で、一部の論理的なメッセージ交換を除き、Ethernet 物理層（Layer-1）を使った周波数クロック信号の伝播を行う。SyncE ではクロックの位相や時刻情報までは同期できない。また、接続される全ノードの Ethernet カードが SyncE に対応している必要がある。

元来、Ethernet は 10BASE-T などと表記されるとおり、ベースバンド伝送方式を採用している。これは、ラジオやテレビ放送などの無線通信でよく使われる搬送波変調方式とは異なり、1010…ビット列をそのまま信号波形として物理層に流す方式で、変調・復調回路が不要なため送受信回路を小さくできる長所がある。反面、送受間に流れる搬送波がなく、送受がそれぞれ独立したクロックで動作するため、送られるパケットごとに先頭 64 ビット長の 1010…プリアンプルをつけて同期をとっている。最初の 10 Mbps Ethernet 規格では、各々パケット間にフレーム間ギャップ（IFG）と呼ばれる 96 ビット時間以上の無信号区間が規定されていたが、100 Mbps 以上の Ethernet では IFG にもアイドルと呼ばれる特殊なビットパターンを送出し続けることで高速化を図っており、無信号区間は消滅している。同期イーサネットは、そのため基本的にベースバンド伝送方式をとる 100 Mbps 以上の Ethernet インターフェース（100/1000/10G/100G BASE-X 等々）でのみ利用可能となっている[9]。

SyncE は、一次基準クロック PRC をマスター／スレーブ方式で配信するため、全ノードの精度安定度が PRC に依存する。そのため PRC を、GNSS や原子時計等の高精度基準時計で位相ロックすることで、精度安定度を高めることが多い[10]。

5. Precision Time Protocol（PTP）

Ethernet 物理層を用いて単一の周波数クロック信号をネットワーク内に配信する SyncE には、時刻情報を同期するしくみがなく、ネットワーク時刻同期プロトコルと組み合わせる必要がある。ネットワーク時刻同期プロトコルでは、IP パケットを用いる NTP（Network Time Protocol）が広く普及しているが、計算機のシステム時刻

をソフトウェア処理でパケット・タイムスタンプに打刻して同期するため、時間精度はシステムクロックと同じ～1 ms 程度となる。

NTP より高精度な時刻同期を実現する規格が精密時間プロトコル PTP（Precision Time Protocol）で、version 1 が IEEE 1588-2002 として規定された。NTP と同様、UDP/IP パケットを授受してネットワーク装置間の伝送遅延を計測・補償するしくみだが、NTP とは異なり、専用のハードウェア・クロックを用いて時刻同期と伝送遅延を計測・補償する機能を有し、1 μ s 以下の高精度化も可能になっている。

複数ネットワークを中継する PTP 対応スイッチでは、時刻同期動作として Boundary Clock（BC）と Transparent Clock（TC）の 2 方式がある。BC はクロック再配信をマスター／スレーブ方式で多段的に階層転送できることから大規模ネットワークに適用可能だが、遅延誤差が蓄積する欠点がある。これに対して、PTP version 2（IEEE1588-2008）で新たに規定された TC は、パケットが中継スイッチを通過するのに要した時間を計測して、それを Follow-up message の補正項に書き込むことで、スレーブがパケット遅延計算時にそれを繰り込んで、遅延誤差の累積を防ぐことができる[11]。

TC 動作には End-to-End（E2E）と Peer-to-Peer（P2P）モードがあり混在はできない。P2P では隣接ノード間で Delay Request および Delay Reap の情報交換を行うが、E2E の場合はグランドマスタークロック GMC とスレーブクロックが中間ノードを超えて直接メッセージのやりとりを行う。

GMC が参照する標準時刻ソースは、一般的に GNSS が想定されている。そのため、NTP や計算機システムクロックが協定世界時 UTC を用いるのに対して、PTP は GNSS と同じ国際原子時 TAI に基づいており、うるう秒の取り扱いがない。計算機のシステム時刻を同期するため、PTP GMC は GNSS 同様、UTC との差（秒数）情報を通知しており、受信した PTP 情報から UTC が算定可能となっている[12]。

PTP では、障害発生等に対応できるよう、ネットワーク内に最大 2 つの（上位）マスタークロックを持つことができ、その中から Best Master Clock Algorithm（BMCA）によって GMC を自動的に選出、切り替えることができる。

5.1 Time-Sensitive Networking（TSN）

産業用ネットワークは、元来、分野毎に異なる規格が林立しており、例えば自動車の車載ネットワークでは CAN や DeviceNet, FA 分野で普及している PROFIBUS やプロセス制御 PLC 間を接続する CC-Link, Ethernet から派生した PROFINET, EtherNet/IP, EtherCAT など多数存在する。これら産業用ネットワークを、LAN, WAN での実質的標準として進化の著しい Ethernet（IEEE 802.3）規格を拡張し、集約・統合化を図ろうとする取り組みが、Time-Sensitive Networking（TSN）である。現在、IEEE 802.1 TSN として規格化作業が進んでいる¹。

1 データセンター用途で使われる LAN/Ethernet, SAN/FibreChannel, HPC/InfiniBand を Ethernet に統合する Converged Enhanced Ethernet（CEE）の動きも 10 Gbps Ethernet 以降、本格化している。IEEE 規格化作業グループでは、Data Center Bridging（DCB）とも呼ばれる。

TSN は IEEE 802.3/802.1 系の12の規格から構成され、産業用プロセス制御に不可欠な決定論的な時間制約と通信保証を実現する。

TSN によって、時刻同期性のあるトラフィックが、従来のベストエフォート方式による標準イーサネット通信と共にネットワーク上に混在できる。標準的なイーサネット通信は、送信バッファにキューイングされたパケットを、リンク帯域幅全部を使って配信する。これに対して TSN では、1 台のネットワーク構成コントローラから配信されたスケジュールに則り、予め規定された帯域幅を用いて周期間隔で時刻同期した通信を行う [13]。

TSN 利用のため選別された PTP 規定が、generalized PTP (gPTP) と呼ばれる IEEE 802.1AS (802.1AS-2011) および現在策定中の 802.1AS-Rev である。

通常の PTPv2 仕様では、障害発生時のタイムアウト検出を含め、BMCA (Best Master Clock Algorithm) によって GMC が (再) 選定される。他方、リアルタイムな機器制御要件が厳しい産業用イーサネット TSN の場合、GMC は決定論的に固定され、障害発生時も予め準備された待機系あるいは冗長系に速やかに代替される必要がある。

5.2 ITER Time Communication Network (TCN)

ITER の実験プラントで利用されるネットワークは、以下に示すとおり、通称 CODAC Networks と呼ばれるプラント運転に關与する 5 種類の目的別ネットワークと、機器インターロック、安全防護の各ネットワークに分類、実装されている [14]。

1. Plant Operation Network (PON)
EPICS 用のプラントシステム制御ネットワーク
2. Synchronous Databus Network (SDN)
プラズマ制御用 UDP マルチキャストネットワーク
3. Time Communication Network (TCN)
IEEE1588-2008 による同期信号用ネットワーク
4. Audio/Video Network (AVN)
物理計測目的のロスレスな音声／画像伝送用
5. Data Archiving Network (DAN)
TCP/IP による大容量データ伝送ネットワーク
- ◇ Central Interlock Network (CIN)
プラント機器の保護インターロック用ネットワーク
- ◇ Central Safety Networks (CSN)
放射線環境を含む安全防護システム用ネットワーク

このうち Time Communication Network (TCN) が、プラント・サブシステム群の時刻同期を司るネットワークで、IEEE1588-2008 PTPv2 に準拠したサーバおよびクライアントノードと、PTPv2 対応 Gigabit Ethernet (GbE) スイッチにより構成される。GPS/GNSS 時刻同期された GMC として振る舞う PTPv2 時刻サーバと、スレーブクロックである TCN クライアント群との間で時刻同期通信が行われる。設計仕様として 50 ns 以下の精度で同期可能としている。

高速応答が必要なプラント・サブシステム用制御ノード、通称、Fast Controller に標準採用された TCN モジュール

ルを用いることで、高精度タイムスタンプを伴った信号モニタリングや、予約された時刻に信号等出力を行う実装が、各々サブシステム装置側で可能となっている [15]。

6. White Rabbit

White Rabbit (WR) は、LAN 用に広く普及した Ethernet 技術をベースに、PTP より更に高精度なサブナノ秒レベルの時刻同期を実現する技術で、欧州原子核研究機構 CERN を中心に研究開発が進められてきた。2020 年 6 月に公開された IEEE1588-2019 においては、同規格の高精度仕様として WR が正式に標準化されている [2]。

WR の主な基本機能は、以下の 3 点に集約される。

1. PTP v2 に基づく全ネットワークノード、中継装置の時刻同期および伝送遅延補正
2. 同期イーサネット (SyncE) を介した単一周波数 (クロック) の共有による周波数同期
3. Digital Dual Mixer Time Difference (DDMTD) 法によるクロック位相差検出によるサブナノ秒級の高精度遅延補正

上記の 3 機能はすべて Ethernet および IP ネットワーク標準の上位互換となっており、WR に準拠しない通常のネットワーク装置や一般的な IP 通信とも混在利用可能である。NTP や PTP は送信／受信で遅延時間が異なる通信路の非対称性を補償するしくみがないのに対し、WR では DDMTD によって温度変化の影響や送受の位相遅延差も補償することで、高時間精度を実現している (図 3)。

WR の伝送媒体としては、Gigabit Ethernet (GbE) 対応の単芯シングルモード光ファイバー中に送受 2 波長を双方向伝送する 1000BASE-BX10 が標準指定されている。GbE 用 SFP モジュール仕様であれば、direct-attach cable (DAC) と別称されるパッシブ SFP ケーブルや 1000BASE-T も利用可能だが、TP ケーブルを用いる 1000BASE-T は、単純に 1.25 Gbps 信号を変換する光リンクとは物理層が異なるため、時間精度が劣化することが判っている。なお、10 Gbps (SFP+) 対応については、目下、開発検証が進められている

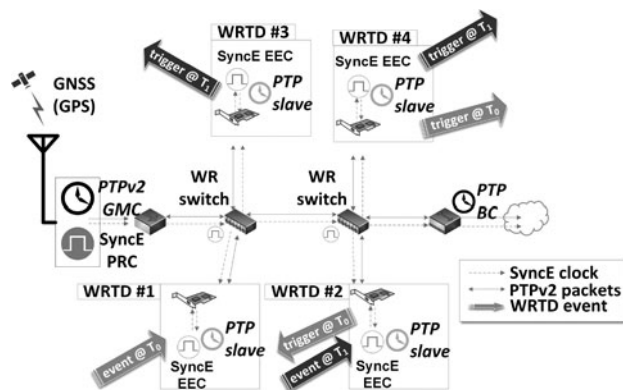


図3 White Rabbit (WR) のネットワーク構成。SyncE および PTPv2 のほか DDMTD 対応のため WR 専用スイッチが必要となる。最上位で WRTD が動作し、ネットワーク伝送の双方向性を生かした対称性の高いイベント配信による高時間精度トリガー出力を実現する。

る[16].

WR 規格はすべて Open Hardware Repository (OHR) で公開されており、同スイッチの開発実装に必要なコード類を含め、各種情報が OHR から入手可能になっている[17]。既に数社から販売されているが、この公開仕様によって、利用者が論理回路ベースで WR 対応スイッチを改造することが可能で、各分野・装置向けに自由にカスタマイズできるようになっている。日本国内の大型放射光施設 SPring-8 においても、加速器制御用に WR の実証評価と導入試験が進められている[18]。

6.1 トリガー配信

2 節で述べたとおり、核融合実験では計測・制御用にプリプログラムされた遅延トリガー出力と、同じくプリセットされた分周クロック信号がしばしば用いられる。極めて持続時間が短い単発イベントの発生を捉える素粒子観測等と比べ、磁場閉じ込めプラズマの持続時間は一般的に長い。特に後者は、複数計測器のデータ・サンプリングを同期するための必須条件となっており、核融合プラズマ計測を特徴づける機器要件の一つでもある。

素粒子実験のための加速器運転同期用に開発された WR も、出力時刻を指定して単一トリガー出力（「イベント」と呼ばれる）を行う White Rabbit Trigger Distribution (WRTD) 拡張機能が用意されている[19]。WR ネットワークでつながった各 WRTD ノードは、いずれもトリガーイベントの送受信が可能であり、従来の遅延パルサーや LHD-DTS 等で送受が機能的に分離していたのと異なり、運用の自由度が大きい特徴がある。反面、トリガーイベント誤送信防止のため、アプリケーション実装もしくは運用による送信機能の未使用・無効化など対応が必要となる（図 3）。

また、標準時刻と同期クロックをネットワーク内に供給する GMC が、トリガー情報を配信する WRTD と分離、独立して動作する点も、従来の同期タイミング配信と異なるもう一つの特徴といえる。

WRTD で利用するタイムスタンプは、32+16 ビット長エポック秒カウンター、32 ビット長ナノ秒カウンター、および 16 ビット長 2 進小数ナノ秒（ 2^{-16} ナノ秒単位）で構成される。

WRTD ノード内で、同一の機能が複数並んで存在する場合、それらを Repeated Capability と呼ばれるしくみで取り扱うことができる。典型例としては 1 台のノードが複数チャンネルの入力あるいは出力ポートを持つケース等である。各 WRTD ノードには、各々独立して動作する、①ルール、②アラーム、③アプリケーションの 3 種類の Repeated Capability が標準定義されている。トリガー入出力の各種関係を記述するルールと、予約時刻で発動するアラームとは、設定情報として動的に追加・削除・変更が可能である。これに対し、アプリケーションは予め実装時に埋め込まれている必要があり、当然ながら動作時の追加・変更等は行えない。

6.2 プログラマブル分周／逓倍クロック出力

WR はネットワークを用いた高精度な時刻同期のしくみであり、また WRTD もノード間トリガーイベント配信の

しくみであるため、分周クロック出力の概念がない。計測毎にサンプリング同期用クロックを得るには、GMC (PRC) から標準時に位相同期して Ethernet 伝送されてくる 125 MHz 基準クロックを、各ノードで分周もしくは逓倍して各々で必要な周波数を生成する必要がある。

RF 加速器の制御では、しばしば系内に単一 RF 周波数を配信して分散ノード間で同期制御を行うことがある。これには、WR 各ノードに Direct Digital Synthesizer (DDS) 回路を具備し、位相のそろった単一周波数を共有する手法が採られている[20]。しかし、核融合実験では一般に多種類の計測器が利用され、必要なサンプリング周波数も計測器毎に異なる場合が多い。また、実験条件に応じて各々が周波数を変更することもあり、RF 加速器制御の場合とは要件的に異なっている。

WRTD においても、出力ルールを記述する等によってバースト（連続）トリガー信号を生成してサンプリングに用いることが可能である。しかし、イベントや時刻タイマーで起動されるトリガー出力は、機能的に分周クロック出力を完全に代替することはできないため、LHD-DTS においても、トリガーと分周クロック出力は分けて論理実装している。

WR/ WRTD の核融合実験向けカスタマイズには、同じ理由で、論理回路に分周／逓倍クロック出力機能を追加実装する必要がある。LHD-DTS 同様、FPGA 内にプリセット分周カウンター回路をチャンネル数だけ論理合成して、高精度同期されたマスタークロックから分周／逓倍することで、実装は容易である。

6.3 実装に関する検討事項

・1 GHz を超えるクロック・パルス出力の同期性

1 GHz デジタル信号の 1 クロック = 1 ナノ秒は 20 cm 程度の信号線路長に相当し、同一プリント基板上の回路配線でも位相同期に細心の注意を必要とする。WR が提供するサブナノ秒同期精度を有効活用するには、WR ノードとデータ集録回路を同一筐体内の同一基板上もしくは同じ論理 IC チップ内に組み込んで実装するのが望ましい。現在の FPGA チップは十分な論理回路規模を有し CPU コアを内蔵するものも多いため、WR/ WRTD ノードとユーザ・アプリケーションの両方を 1 チップシステム (SoC) 上で実装することも可能である。

GHz 超の高周波クロック配線を延伸すると位相のずれが大きくなるため、GHz 超クロックを生成する同期逓倍回路は、できるだけデジタイザ等のクロック利用部に近づけるのが望ましい。GHz 超の逓倍／分周、出力駆動回路等を FPGA チップ内で構成するのは現在も容易ではないため、PLL 同期回路を含め高周波部品を用いた外付け周辺回路を設けるのが一般的である。核融合実験のみならず一般用途でも、GHz レベルの高速信号入出力を必要としない計測制御サブシステムは多いため、標準仕様の拡張モジュールとして設計し、実装オプションとして対応することが望ましい。

・複数ノードのグループ化

WR や WRTD には、複数のノードをグループに分けて取

り扱うしくみがない。特に WRTD では、イベント送受信に上流下流といった階層構造を持たないため、LHD 計測タイミングシステムが実現していたノードの階層化（グループ運用）は困難である。

しかし、WRTD で伝送されるイベントは、すべてユニークなイベント ID が付与され、それに基づき処理されるため、これを利用して、複数 ID をグループ化して取り扱うしくみを同組込アプリケーション内に追加することで、この機能上の問題は解決できると考えられる。この場合、若干の通信プロトコル拡張が必要になるとともに、ソフトウェア処理に依存するため、トリガーの予約出力には対応可能であっても、高速フィードバック回路などのリアルタイム用途に適用できる高速応答が可能かどうか、実装ベースで性能評価を繰り返す必要があると思われる。

なお、実装・評価により期待された性能等が得られない場合は、DTS 改良版のトリガー配信機能を WRTD 非互換の WR オプションとして開発する選択肢も残されている。

7. まとめ

Ethernet を介してサブナノ秒精度の時間同期を可能にする White Rabbit 技術を、核融合実験向け同期タイミングシステムに導入、機能を改善する検討を行った。結論として、ゲート付き分周クロック出力など、機能追加のカスタマイズが若干必要であるものの、基本的に WR および WRTD を用いて、核融合実験向け高精度同期タイミングシステムが構築可能であることが確認された。今後、実装設計からプロトタイプ開発、実証試験へと進めていきたい。

元来 WR は、高エネルギー加速器の計測制御用に欧州中心に開発された経緯があり、QST 六ヶ所研で運転が始まっている IFMIF プロトタイプ線形加速器 LIPAc の欧州側納品機器の一部に WR が導入されている。今後、核融合分野で計画されている IFMIF や A-FNS など材料照射施設のビーム加速器においても、重要な制御機能の一翼を担うと思われる。近い将来、プラズマ実験装置にも応用されることが予想される。

ITER に向けた計測制御システム関連の大規模な研究開発・技術整備は、核融合分野内に大きな流れを形成しており、そこで編成されたシステム技術が実質的標準となっており、今後の国際的なシステム共通化を主導すると考えられる。標準的な位置づけを獲得するためには、すでに大学共同利用機関の高エネルギー加速器研究機構（KEK）が行っているように、こうした回路製作も、分野内の大学・研究機関が共同 R&D プロジェクトとしてオープンに進めることを検討すべきと思われる。

謝 辞

この場をお借りして、長期滞在を温かく受け入れて下さった量研機構（QST）六ヶ所研の BA 計画調整グループ

ならびに関係者の皆様、一年間の時間を与えて下さった核融合科学研究所（NIFS）高温プラズマ物理研究系、情報通信システム部の各位に、改めて厚く御礼を申し上げます。本研究は、NIFS 研究課題（NIFS19ULHH006）、総合研究大学院大学共通専門教育プログラム（NIFS16KKGH027）及び量子科学技術研究開発機構 BA／原型炉研究開発共同研究（2012－2021）の支援により実施されています。

参考文献

- [1] H. Nakanishi *et al.*, Fusion Eng. Des. **66-68**, 827 (2003).
- [2] White Rabbit, <https://ohwr.org/project/white-rabbit> (2020).
- [3] H. Nakanishi *et al.*, 12th Int. Conf. on Accelerator and Large Physics Control Systems (ICALEPCS2009), 12-16 Oct. 2009, Kobe, Japan, TUP057 (2009).
- [4] 岡 学：水晶発振器の選び方・使い方, Design Wave Magazine **111**, (2007年2月号) 128 (2007).
- [5] 河合 一, EDN Japan 編集部：水晶発振器—活用の手引き, EDN 電子ブックレット (2020年7月) 11 (2020).
- [6] 小林春夫 他：完全デジタル PLL 回路「ADPLL」を学ぶ, 日経エレクトロニクス2009年6月1日号 100 (2009).
- [7] 岩間 司：ICT 社会を支える時刻同期技術, 情報処理 **57**, 52 (2016).
- [8] Wikipedia, 閏秒, <https://ja.wikipedia.org/wiki/閏秒> (2021).
- [9] ITU-T Recommendation G.8262/Y.1362, Timing characteristics of synchronous Ethernet equipment slave clock, p.24 (01/2015).
- [10] Wikipedia, Synchronous Ethernet, https://en.wikipedia.org/wiki/Synchronous_Ethernet (2020).
- [11] 時刻同期の NTP と PTP の違い (PPS), 現場に必要なネットワーク技術入門, <https://network.oreda.net/knowledge/clock> (2021).
- [12] Wikipedia, Precision Time Protocol, https://en.wikipedia.org/wiki/Precision_Time_Protocol (2021).
- [13] M. Zapke, A. Taylor：IT と OT ネットワークを融合する「TSN」の概要と実装, EDN Japan, 2018年3月27日 (2018).
- [14] 細川哲成 他：ITER のデータ解析インフラストラクチャ IMAS, プラズマ・核融合学会誌 **95**, 229 (2019).
- [15] ITER Technical Report, Plant Control Design Handbook, ITR-20-009 (2020).
- [16] White Rabbit Wiki, <https://ohwr.org/project/white-rabbit/wikis/> (2021).
- [17] Open Hardware Repository, <https://ohwr.org/> (2020).
- [18] T. Masuda, 17th Int. Conf. on Accelerator and Large Physics Control Systems (ICALEPCS2019), 7-11 Oct. 2019, New York, USA, WEPHA096 (2019).
- [19] White Rabbit Trigger Distribution, <https://ohwr.org/project/wrtd/wikis/> (2021).
- [20] T. Wlostowski *et al.*, 15th Int. Conf. on Accelerator and Large Physics Control Systems (ICALEPCS2015), 17-23 Oct. 2015, Melbourne, Australia, WEC3001 (2015).