

3GPP Release 16および17における 確定性通信の実現に向けた高度化技術

5GS (5G System) は、有界遅延、無衝突、高信頼性を担保し、確定性通信をサポートします。3GPP Release 16 (Rel-16) で規定された5GSは、IEEE 802.1Qブリッジネットワークと統合され、製造業および関連する産業用アプリケーション向けのイーサネットベースの確定性通信をサポートします。Rel-17で拡張された5GSは、IPベースの確定性通信もサポートします。本稿では、Rel-16およびRel-17で規定された5GSの確定性通信機能の概要について解説します。

Jari Mutikainen

Riccardo Guerzoni

みのくち あつし
巳之口 淳

NTTドコモ

確定性通信のユースケース

確定性通信とは、TSC (Time-Sensitive Communication)*¹のために、最大遅延、最大ジッタ*²、無衝突を保証するネットワーク機能のことです。確定性通信で想定されるユースケースは、製造業やリアルタイムのメディアアプリケーションです。

5GSとIEEE TSNの統合

Release 16 (Rel-16) では、5GS (5G System) をIEEE TSN (Time-Sensitive Networking) ネットワークと統合することができます。5GSは、3GPP (3rd Generation Partnership Project) で制定されたドキュメント、TS23.501⁽¹⁾で規定されているように、TSN機能の一部をサポートする仮想IEEE 802.1Qブリッジとしてモデル化されます。5GSブリッジのIEEE TSN機能は、完全中

央制御モデル^{(2),(3)}を使用して、外部のCNCによって管理されます。

■アーキテクチャ

5GS内の仮想IEEE 802.1Qブリッジの内部アーキテクチャを図1に示します。

CNC (Central Network Controller) はTSN AF (Application Function)*³を介して5GSと通信します。CNCとTSN AFの間のインタフェースは3GPPで規定されていますが、CNCとTSN AFは、例えば、IEEE 802.1QおよびSNMP (Simple Network Management Protocol)*⁴で規定されている管理対象オブジェクトを用いて通信できます。TSN AFは、管理対象ブリッジとして5GSをCNCに公開し、CNCと、5GSブリッジの一部であるDS-TT (Device-Side TSN Translator)*⁵とNW-TT (NetWork-side TSN Translator)*⁶との間で制御メッセージを配信する役割を担います。

DS-TTはUE (User Equipment)*⁷と結び付き、NW-TTは

UPF (User Plane Function)*⁸と結び付きます。この2つが、5GSのブリッジ機能のほとんどを実装します。1つの5GSは複数の仮想ブリッジを持つことができ、それぞれの仮想ブリッジは、TSN AF、UPF/NW-TT、複数のDS-TT/UEで構成さ

- *1 TSC：遅延やジッタの許容値を超えずに配送されることが要求されるデータストリームを扱うために3GPPで仕様化されている通信サービス。
- *2 ジッタ：信号などにおける、遅延時間の揺らぎ、時間軸方向のずれのこと。
- *3 TSN AF：5Gコアネットワークの一部であり、5GSとIEEE TSNネットワークの統合のために、制御プレーントランスレータ機能を提供。5GSとCNCが協働動作をすることを可能にします。
- *4 SNMP：IPネットワーク上のネットワーク機器を監視・制御するための情報の通信方法を定めるプロトコル。
- *5 DS-TT：デバイス側のTSNトランスレータ。UEの背後の相互接続デバイスに向けたTSNの入口ポートと出口ポートおよびPTPポートを提供。
- *6 NW-TT：ネットワーク側のTSNトランスレータ。データネットワーク (DN：Data Network) の相互接続デバイスに向けたTSNの入口ポートと出口ポートおよびPTPポートを提供。
- *7 UE：ユーザ端末。3GPP仕様向け無線インタフェースを介したネットワークサービスへのユーザアクセスが可能。
- *8 UPF：5Gコアネットワーク内のユーザデータの送受信処理機能。

* 本特集は「NTT DOCOMOテクニカル・ジャーナル」(Vol.30, No.3, 2022年10月)に掲載された内容を編集したものです。

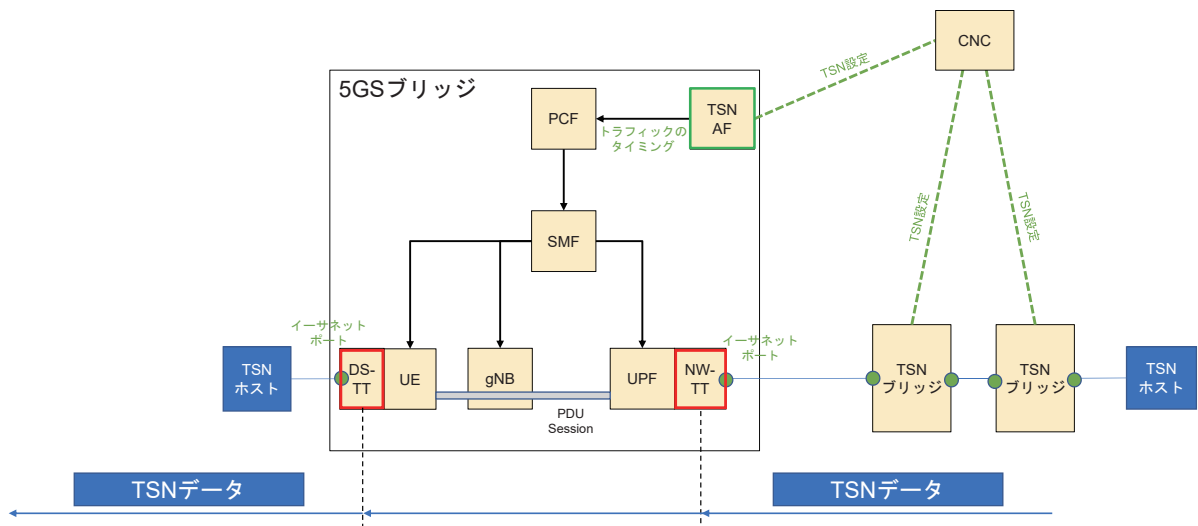


図1 5GSにおけるIEEE TSNのサポート

れます。DS-TTとNW-TTはイーサネットポートを外部のネットワークに公開します。DS-TT/UEは、イーサネットタイプのPDU (Protocol Data Unit) Session*⁹を介してUPFに接続されています。5GSブリッジ内のルーティングはイーサネットフレーム*¹⁰の宛先MACアドレスとVLAN IDに基づいて実行されます。

■ブリッジ遅延と伝搬遅延を読み取る機能

CNCの重要な機能の1つは、5GSブリッジからブリッジ遅延および伝搬遅延を読み取る機能です。ブリッジ遅延とは、データフレームがブリッジ内で入口ポートから出口ポートに通過する際に費やす内部滞留時間です。これは、ポートペアごと、サポートされるトラフィッククラスごとにCNCに示されます。伝搬遅延は、5GSブリッジの出口ポートから隣接するデバイスの入口ポートまでの遅延です。5GSブリッジ (DS-TTまたはNW-TT内)の出口ポートはgPTP (generic PTP)*¹¹を使用して伝搬遅延を測定します。TSN AFはこの測定値をCNCに報告します。

■ブリッジ設定の流れ

CNCは、ブリッジ遅延、伝搬遅延、そのほかのブリッジ情報 (例：リンク層トポロジ) を使用して、ネットワーク内での、TSNストリームに関するスケジューリングや明示的な経路を決定します。CNCは、ネットワークの各ブリッジからブリッジ情報を取得したところで、それらのブリッジを設定する準備が整うこととなります。TSN AFは、CNCから設定情報を受け取ると、対応するDS-TTおよびNW-TTにその情報を配信します。設定にTSNストリームのPSFP (Per-Stream Filtering and Policing) 情報が含まれている場合、TSN AFはその情報を使用して、要求5GS遅延、最大バーストサイズ、プライオリティなどのTSC QoS情報を決定します。またTSN AFはPSFP情報を使用して、TSCAC (TSC Assistance Container)*¹²を決定します。TSCACは、TSNストリームのトラフィックパターン、つまり、UL (Up Link) 方向およびDL (Down Link) 方向のBAT (Burst Arrival Time)、および周期性を定義します。最後に、TSN AFはTSC QoS情報とTSCAC

をPCF (Policy Control Function)*¹³に提供します。

SMF (Session Management Function)*¹⁴は、PCFが決定したQoS情報を用いて、QoSフロー*¹⁵を設定します。SMFは、PCFが転送するTSCACを使用してTSCAI (TSC Assistance Information)*¹⁶を導き出し、QoSフロー設定要求とともにgNB (gNodeB)*¹⁷に提供します。gNBは、TSCAIを参考に、UL方向の設定グラントやDL方向のセミアシステントスケジューリング*¹⁸など、

*⁹ PDU Session : UEとデータネットワーク間の論理接続。
 *¹⁰ イーサネットフレーム : イーサネットLANの通信を行う際に使用するデータのフォーマット。
 *¹¹ gPTP : IEEE 1588 (PTP) のプロトコルプロファイルの1つであり、IEEE 802.1ASで規格化されたもの。
 *¹² TSCAC : TSNストリームのUL方向およびDL方向のBAT、および、周期性を定義する情報。TSN AFあるいはTSCTSFからSMFに通知されます。
 *¹³ PCF : QoSやポリシーを決定しSMFに提供する5Gコアネットワーク内の機能。
 *¹⁴ SMF : PDU Sessionを管理し、QoSやポリシーの実施などのためにUPFを制御する5Gコアネットワーク内の機能。
 *¹⁵ QoSフロー : 5GSのQoS転送処理におけるもっとも細かい粒度。
 *¹⁶ TSCAI : QoSフローのUL方向およびDL方向のBAT、および周期性を定義する情報。SMFからgNBに通知されます。
 *¹⁷ gNB : 5Gの無線方式に対応した無線基地局。

無線リソースを割り当てます。

5GSにおける時刻同期のサポート

Rel-16は、外部IEEE TSNネットワークとの統合をサポートしており、時刻同期に関して、PTPのプロトコルプロファイルの1つであるgPTPをサポートしています。5GSを外部IEEE TSNネットワークと統合すると、5GSはPTPリレー^{(4)*19}として動作します。DS-TTとNW-TTはPTPリレーのPTPポートを実装し、イーサネットポートを外部IEEE TSNネットワークに公開します。この場合、イーサネットタイプのPDU SessionがDS-TT/UEとUPF/NW-TTの間で使用されます。

Rel-17ではIEEE TSNを統合しない網構成のサポートが追加されています。この場合、5GSは境界クロック^{(5)*20}か、透過クロック^{(5)*21}として動作し、PTPメッセージはIPタイプのPDU Sessionを使用して直接UDP/IP上で伝えることができます。

5GS内のgPTPあるいはPTPのメッセージは、NW-TTおよびDS-TTが同様に処理します。詳細を、図2を用いて解説します。なお、図中あるいは以下の解説で(g)PTPと示す場合、

gPTPあるいはPTPを指します。

(1) GMの位置とPTPポート状態
Rel-16では、5GSは、N6^{*22}インタフェースに接続する外部ネットワークにあるGM (Grand Master)、およびNW-TT内部のGMをサポートしています。ブリッジ外にPTPメッセージを送るPTPポートはマスタ状態、ブリッジ外からPTPメッセージを受けて処理するPTPポートはスレーブ状態であることから、つまり、NW-TTのPTPポートは、外部GMの場合はスレーブ状態、内部GMの場合はマスタ状態となり、DS-TTのPTPポートは常にマスタ状態です。Rel-17はDS-TTに接続する外部ネットワークにあるGMもサポートしており、したがってDS-TTのPTPポートもスレーブ状態となる場合があります。

Rel-16では、DS-TTやNW-TTのPTPポート状態は、5GSでローカルに事前設定する必要があります。Rel-17は、そういった事前設定に加えて、BMCA (Best Master Clock Algorithm)^{*23}もサポートしています。BMCAは、ネットワークの最適なGMを選択し、PTPポートの状態を適切な方法で自動的に構成する手順です。

(2) 内部滞留時間の測定

時間情報の誤差を引き起こす重要な原因の1つは、(g)PTP Syncメッセージ^{*24}を入口ポートから出口ポートに配信する際にブリッジ内で費やされる内部滞留時間であると考えられます。ここで、入口ポートおよび出口ポートは、DS-TTポートあるいはNW-TTポートです。内部滞留時間を考慮するために、入口ポートは、(g)PTP Syncメッセージを5GSユーザプレーンを介して出口ポートに送信する前に、メッセージに受信時刻のタイムスタンプを追加します。出口ポートでは、タイムスタンプを使用して内部滞留時間を計算し、それを(g)PTP Syncメッセージに追加したうえで、5GS外に送出します。

- *18 セミパーシステントスケジューリング：gNBが端末にあらかじめ周期的にDL無線リソースを割り当てておくこと。
- *19 PTPリレー：PTPプロファイルの1つであるgPTPを用いる場合の、高精度な時刻同期するための装置。
- *20 境界クロック：GMとなり他のクロックに時刻情報を提供する能力のあるクロック。
- *21 透過クロック：内部滞留時間を測定し、PTP関連メッセージに書き込んで転送することのできる装置。
- *22 N6：UPFとDNの間の参照点。
- *23 BMCA：ネットワーク内の最適なGMを選択し、各PTPポートの状態を自動的に構成する手順。
- *24 Syncメッセージ：PTPプロトコルで時刻同期を行うために交換されるメッセージ。

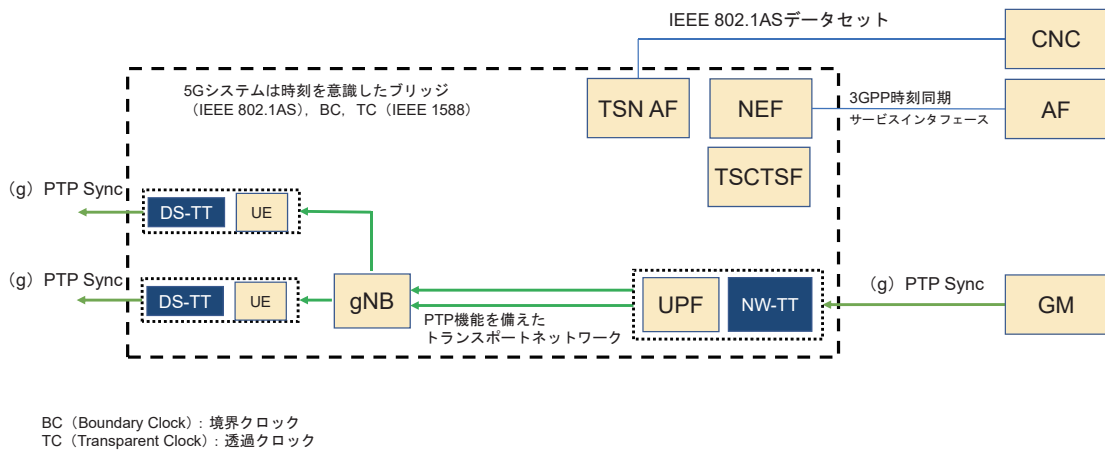


図2 5GSにおける時刻同期のサポート

内部滞留時間を正確に測定するには、DS-TT/UE、gNB、UPFの内部参照クロックが同期していることが必要です。これは、gNBとUPFの間に、PTPのテレコムプロファイル（ITU-T G.8265.1など）をサポートするトランスポートネットワークを配備、あるいは、ローカルGNSS（Global Navigation Satellite System）をgNBおよびUPFのタイムソースとして使用することで実現できます。gNBは、TS38.331⁽⁶⁾で定義されているRRC（Radio Resource Control）シグナリング^{*25}を介して、gNBの内部参照クロックをDS-TT/UEに配信します。ここで配信される時刻はgNBが送信した時刻を示すため、UEは、正しい時刻を得るために、gNBとUEの間の伝搬遅延を加える必要があります。Rel-16では、UEは、自身が測定するタイミングアドバンス^{*26}を流用し、gNBから受け取る5G参照時刻を修正します。

(3) 伝搬遅延を考慮した修正の正確さの向上

伝搬遅延を考慮した修正の正確さは、Rel-17で向上しています。Rel-17では、gNBは、自身で送受信時間差を計測してUEに提供し、UEは、自身で送受信時間差を計測します。その後、UEは、2つの送受信時間差を用いて、伝搬遅延を計算します。

(4) ブリッジ内外のクロックの進み方の違いを考慮した内部滞留時間の調整

GMが5GSの外部にある場合、5GSの内部クロックと外部のGMは同期されません。これはつまり、これら2つのクロックの間で時間の進み方に違いがある可能性があるため、測定された5GSブリッジの内部滞留時間は調整する必要があります。DS-TTとNW-TTのPTPポートが、自身が

依存する時計、すなわち5GSの内部クロックと外部のGMとの間の時間の進み方の比を測定し、5GSの内部クロックで測定された内部滞留時間をその比率により調整します。

(5) PTPインスタンスの遠隔設定

Rel-17は、DS-TTおよびNW-TTにおけるPTPインスタンス^{*27}の遠隔設定をサポートしています。

5GSを外部IEEE TSNネットワークと統合した場合、5GSのPTPインスタンスはTSN AFによって管理されます。TSN AFから外部コントローラに至る実際のインターフェースは3GPPで規定されていませんが、例えばIEEE 802.1ASおよびSNMPで規定されているデータモデルが使用可能です。

IEEE TSNを統合しない網構成では、TSCTS F（TSC Time Synchronization Function）^{*28}がTSN AFの役割を果たして、5GSのPTPインスタンスを管理します（図2）。

この網構成の場合、Rel-17では、TS 29.522⁽⁷⁾で規定されているように、外部AFが、NEF（Network Exposure Function）^{*29}およびTSCTS Fを介して5GSのPTPインスタンスを制御する、3GPP固有のサービスインターフェースも定義しています。このようにして、外部AFは、例えばPTPドメイン番号、PTPインスタンス種別（PTPリレー、境界クロック、透過クロック）、PTPプロファイル（SMPTEなど）、トランスポートプロトコル、GMが5GSに存在する場合の(g)PTP Syncメッセージ伝送間隔などを、NW-TTおよびDS-TTに設定することができます。また外部AFは、サービスインターフェースを使用してgNBを設定し、5G内部参照クロックを一群のUEに配信することもできます。この場合、5GSは(g)PTP

Syncメッセージを生成しません。代わりに、UEが、実装依存の手法で、自身を利用するアプリケーションに5GS参照時刻を配信します。

IEEE TSNによらない網構成における確定性通信のサポート

Rel-17では、IEEE TSNによらない網構成、つまり外部ネットワークにブリッジを制御するCNCがない場合でも、5GSで確定性通信をサポートできます。この場合、5GSは仮想IEEE 802.1Qブリッジとしてモデル化されず、IPタイプまたはイーサネットタイプの複数のPDU Sessionのセットとして動作します。そのような網構成で確定性通信をサポートする場合の5GSの内部アーキテクチャを図3に示します。

外部のAFは、TS29.522⁽⁷⁾で規定されているサービスインターフェースを介して、PDU SessionのQoS情報を5GSに提供できます。

イーサネットタイプのPDU Sessionの場合、UPFがUEからイーサネットフレームを受信すると、そのイーサネットフレームの送信元MACアドレスがPDU Sessionに関係付けられます。IPタイプの場合、PDU Sessionは、ネットワークがUEに割り当てたIPアドレスに関係付けられ

*25 RRCシグナリング：無線ネットワークにおける無線リソースを制御するレイヤ3プロトコル。

*26 タイミングアドバンス：ULフレームの端末からの送信タイミングをDLフレームの端末での受信タイミングと比較して早めるための値。

*27 PTPインスタンス：必要な設定がされた、PTPを処理する実体。

*28 TSCTS F：時刻に敏感な通信および時刻同期のためのネットワーク機能。5GSがIEEE TSNと統合されていない網構成において5GSの時刻同期および確定性通信サービスを管理。

*29 NEF：機能やイベントをサードパーティーのAFなどに向けて公開できるようにする機能。

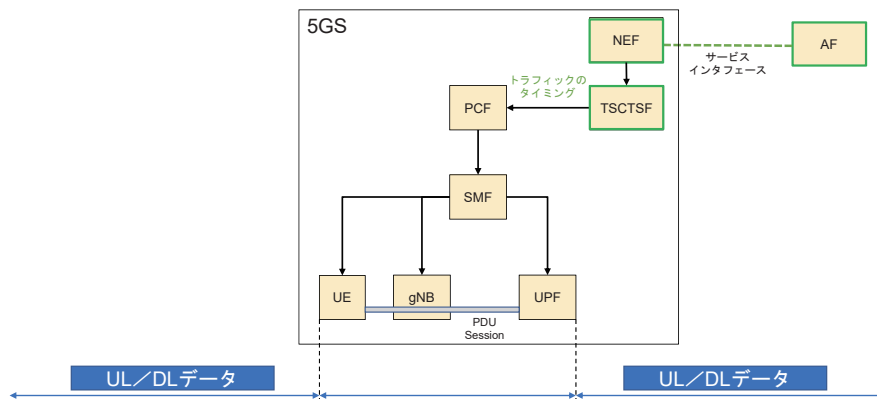


図3 IEEE TSNを統合しない確定性通信のサポート

ます。

AFは、イーサネットタイプのPDU Sessionに関連付けられているMACアドレスまたはIPタイプのPDU SessionのIPアドレスをNEFに示すことによって、要求メッセージを特定のPDU Session向けとすることができます。

AFから5GSへの要求メッセージは、要求するQoSパラメータ（要求5GS遅延、保証ビットレート、最大ビットレート、最大バーストサイズなど）、およびトラフィックとの照合に使用するトラフィックフィルタのフロー記述（IPタプル^{*30}またはイーサネットフレームのプライオリティの値など）を含みます。AFから5GSへの要求メッセージは、トラフィックパターン（UL方向およびDL方向のBAT、周期性）を説明する属性を含む場合もあります。QoS要求はNEFを介してTSCTSFに送信され、TSCTSFはPDU Sessionを管理しているPCFを呼び出します。PCFは、前述の説明と類

似の方法で、SMFに対してディレイクリティカルGBR (Guaranteed Bit Rate)^{*31}QoSフローを設定するよう指示します。AFによってトラフィックパターンが提供された場合は、SMFはTSCAIを決定してgNBに提供します。アプリケーショントラフィックフローが周期的で、アプリケーションが時刻同期を要求する場合は、AFは時刻同期サービスインタフェースを介してPDU Sessionに対して時刻同期を起動することもできます。

おわりに

本稿では、Rel-16およびRel-17で規定されている確定性通信および時刻同期をサポートする5GSの手順の概要について解説しました。Rel-16の規定により、5GSは産業用アプリケーション向けの主要なIEEE TSN機能をサポートすることができます。さらにRel-17では、5GSは、IEEE TSNを統合しない網構成におけるIPベースの確定性通信および時刻同期をサポートしています。

参考文献

- (1) 3GPP TS23.501 V17.5.0: "System architecture for the 5G System (5GS); Stage 2," June 2022.
- (2) IEEE Std 802.1Qcc-2018: "IEEE Standard for Local and metropolitan area networks - Bridges and Bridged Networks - Amendment: Stream Reservation Protocol

(SRP) Enhancements and Performance Improvements," Oct. 2018.

- (3) IEEE Std 802.1Q-2018: "IEEE Standard for Local and metropolitan area networks - Bridges and Bridged Networks," Sept. 2018.
- (4) IEEE Std 1588-2008: "IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems," July 2008.
- (5) IEEE Std 802.1AS-2020: "IEEE Standard for Local and metropolitan area networks - Timing and Synchronization for Time-Sensitive Applications," June 2020.
- (6) 3GPP TS 38.331 V17.1.0: "NR; Radio Resource Control (RRC); Protocol Specification," June 2022.
- (7) 3GPP TS 29.522 V17.6.0: "5G System; Network Exposure Function Northbound APIs; Stage 3," June 2022.



(左から) Jari Mutikainen/
Riccardo Guerzoni/
巳之口 淳

NTTドコモは、お客さまに新しい体験を提供するため、また、お客さまのビジネスのデジタル化対応をお支えするため、今後とも研究開発や標準化活動に取り組んでいきます。

◆問い合わせ先

NTTドコモ
R&D戦略部
E-mail dtj @nttdocomo.com

*30 IPタプル: 送信元IPアドレス, 送信元ポート番号, 宛先IPアドレス, 宛先ポート番号, プロトコル番号.

*31 ディレイクリティカルGBR: QoSフローのリソース種別の1つ. 遅延要求の厳しいQoSフローをサポートすることを目的に導入されました. GBRで指定する属性に加え, 最大データバースト量 (MDBV: Maximum Data Burst Volume) も指定.