

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

ドコモ欧州研究所 ネットワーク開発部 Jari Mutikainen 巴之口 淳
Riccardo Guerzoni みのくち あつし

5GSは、有界遅延、無衝突、高信頼性を担保する、確定性通信をサポートする。3GPP 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する。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する。

1. まえがき

3GPP (3rd Generation Partnership Project)^{*1}は、製造業および関連する産業用アプリケーションをサポートするため、5Gシステム (5GS: 5G System)^{*2}に対し、3GPP Release 16 (以下、Rel-16) で確定性通信の主要な要件を定めた。

今日の産業用アプリケーションは、通常、さまざまな種類の産業用イーサネットを使用する。このため、産業用イーサネットの仕様を統一する必要がある。

り、これらの検討が進められてきた。IEEE TSN (Institute of Electrical and Electronics Engineers Time-Sensitive Networking)^{*3}は、IEEE 802ネットワークで確定性通信を提供する一連の標準規格を指し、今後、産業用イーサネットに共通的に適用されることが期待されている。

Rel-16では、5GSが、TSN機能をもつ仮想的なIEEE 802.1Q^{*4}ブリッジ^{*5}となり、IEEE TSNネットワークとシームレスに統合できるよう、システムアーキテクチャと手順を規定した。また5GSブリッジ

©2022 NTT DOCOMO, INC.

本誌掲載記事の無断転載を禁じます。

本誌に掲載されている社名、製品およびソフトウェア、サービスなどの名称は、各社の商標または登録商標。

^{*1} 3GPP: 移動通信システムの規格策定を行う標準化団体。

^{*2} 5Gシステム (5GS): コアネットワーク、無線アクセスネットワーク、および通信端末で構成される5Gのネットワークシステム。

^{*3} IEEE TSN: 遅延やジッタ (^{*13}参照) 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、IEEEで規定された一連の規格、あるいは、それらを基に構築されるネットワーク。

^{*4} IEEE 802.1Q: Local and Metropolitan Area Networkにおけるブリッジ (^{*5}参照)、およびブリッジ構成によるネットワークに関する規格。

は、IEEE 802.1AS^{*6}が規定する時刻同期もサポートする。これは、IEEE TSNで時刻を意識したスケジューリングによってTSNストリーム^{*7}の有界遅延^{*8}を提供するために、必須となる構成要素である。

通信の有界遅延、無衝突、信頼性を提供するには、実際の通信を開始する前にトラフィック特性を把握し、ネットワークの準備を整えておく必要がある。

Rel-16では、中央制御装置、つまりIEEE 802.1Qcc [1] で定義されているCNC (Central Network Controller)^{*9}が5GSを制御する。CNCはIEEE 802.1Q管理オブジェクト^{*10}を使用してトラフィック特性を5GSに示し、5GSはそうしたトラフィックのために必要な無線通信とコアネットワークのリソースを準備する。

Rel-17では確定性通信が拡張され、リソースを予約する3GPP独自のサービスインタフェースが規定された。外部ネットワークは、このインタフェースを使用して、3GPP QoS (Quality of Service)^{*11}リソース予約手順の一部としてトラフィック特性を5GSに示すことができる。これはIEEE TSNを配備しないネットワーク、および、IPベースのようなIEEE TSNを配備できないネットワークに有用である。

イーサネットベースの時刻同期 [2] のサポートに加えて、Rel-17では、IEEE 1588仕様 [3] に基づくIPベースの時刻同期のサポートが追加された。イーサネットベースの時刻同期が製造分野で重要であると同時に、IPベースの時刻同期は、プロの音響映像制作業界などの、より多様なユースケースで必要とされる。またRel-17では、5GSがもつ時刻同期機能を外部ネットワークから制御するための、サービスインタフェースも規定した。

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する。

2. 確定性通信のユースケース

確定性通信とは、TSC (Time-Sensitive Communication)^{*12}のために、最大遅延、最大ジッタ^{*13}、無衝突を保証するネットワーク機能のことである。確定性通信で想定されるユースケースを以下に述べる。

2.1 製造業

確定性通信の主要な応用分野の1つは製造業である。製造業では、従来、時間制約の厳しい通信に、フィールドバス^{*14}を基にした産業用プロトコルを使用してきたが、その後、産業用イーサネット (例：PROFINET, EtherNet/IP, CC-Link IE) を使用するよう進展してきた。産業用イーサネットは、自動化および制御システムが必要とするリアルタイム通信のために低遅延や帯域を保証する、専用のイーサネットである。

IEEE仕様は、イーサネットでこのようなリアルタイム通信をサポートしなかったため、産業界の各フォーラムがこの課題に対して独自のソリューションを定義してきた。しかし、独自のソリューションをIEEEイーサネットネットワークに適用するには、IEEE標準準拠のイーサネットブリッジに対するハードウェアの変更が必要であった。

そこでIEEEでは、この不足分を埋めるためTSNを規格化し、IEEE標準準拠のイーサネットネットワークでリアルタイム通信をサポートできるようにした。IEEE TSNの主な利点は、汎用のイーサネットブリッジを使用して、時間制約の厳しい産業用のデータには確定性通信を提供し、そのほかのデータにはベストエフォートサービスを提供できることである。

PROFINETやCC-Link IEなどの一部の産業用

*5 ブリッジ：複数のポートをもちそれらの間でイーサネットフレームをリレーするネットワーク装置であり、IEEE 802.1Q規格に沿ったもの。

*6 IEEE 802.1AS：Local and Metropolitan Area Networkにおける時刻同期制御に関する規格。

*7 ストリーム：ネットワークに特定の同一の処理を要請するデータ列。

*8 有界遅延：最大遅延、および、最大遅延の変動が予測可能であること。

*9 CNC：TSNにおいてTSNブリッジのコントロールを行うコン

ポーネント。

*10 管理オブジェクト：ネットワークの特定の構成要素を表す一連の情報。

*11 QoS：サービスごとに設定されるネットワーク上の品質。使用帯域の制御により遅延量や廃棄率などの制御が行われる。

*12 TSC：遅延やジッタ (*13参照) 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。

*13 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。

イーサネットベースプロトコルは最近更新され、IEEE TSNのサポートをプロトコルに含めるようになってきている。Rel-16の5GSでのIEEE TSNのサポートは、そうした産業用プロトコルのサポートを目標としている。

一部の産業用プロトコルは、IEEE TSNが提供する確定的なリアルタイム通信機能を必要としないが、IEEE TSNの時刻同期機能 [3] を必要とする。例えば、EtherNet/IPのアプリケーションではタイムスタンプ*15が伝えられるため、送信側および受信側のアプリケーションの時刻が同期している必要がある。

2.2 リアルタイムのメディアアプリケーション

確定性通信の別のユースケースは、リアルタイムのオーディオ／ビデオ、クラウドゲームや、拡張現実 (AR: Augmented Reality)*16、複合現実 (MR: Mixed Reality)*17、仮想現実 (VR: Virtual Reality) など、リアルタイムのメディアアプリケーションである。こうしたアプリケーションにおけるトラフィックには、多くの場合周期性やバーストサイズ*18などにパターンがある。そうしたトラフィックを、遅延やジッタの許容値を超えずに、効率的に伝送し、結合したり再生したりすることが求められている。

産業用アプリケーションとは異なり、こうしたアプリケーションプロトコルは通常UDP (User Datagram Protocol)*19/IPで伝送される。これらのアプリケーションプロトコルは、タイムスタンプを伝えて、リスナーがデータフレームを同期できるようにする。例えば、音響映像制作では、マイクやカメラなど複数のソースからストリームを取得するオーディオ／ビデオミキサーがリスナーの一例である。各データソースは送信するストリームにタイムスタン

プを加える。リスナーは、受信する複数のストリームの同期をとることができなければならない。つまり、このユースケースでは、各データソースとリスナーで時刻が同期されていなければならない。

今日、時刻同期は、GNSS (Global Navigation Satellite System)*20受信機をデータソースやリスナーの近傍に配備することで提供される。GNSSはタイムソースとして使用され、GNSSの共通参照時刻が、GNSS受信機から通信に参加するアプリケーションに配信される。音響映像制作業界では通常、GNSS受信機とアプリケーションの間の時刻同期に、SMPTE (Society of Motion Picture and Television Engineers) プロファイル*21 [4] を用いたIEEE 1588 PTP (Precision Time Protocol)*22を使用する。

しかしこの手法では、データソースやリスナーが広範囲に点在する場合にGNSS受信機が多数必要となり、またそもそもGNSSの受信は屋内では問題がある。Rel-17では、こうした問題の解消を目指して、5GSがIEEE 1588 PTPをサポートすること、また、5GSをタイムソースとしてより柔軟に用いることができることを目標とした。

3. 5GSとIEEE TSNの統合

Rel-16では、5GSをIEEE TSNネットワークと統合することができる。5GSは、TS23.501 [5] 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る。特に5GSは、時刻を意識したスケジューリングとPSFP (Per-Stream Filtering and Policing)*23をサポートする。

5GSブリッジのIEEE TSN機能は、完全中央制御モデル [1] [6] を使用して、外部のCNCによって

*14 フィールドバス：リアルタイム制御に用いられる、独立して発展してきた複数の産業用ネットワーク技術の総称。

*15 タイムスタンプ：時刻を示す情報。

*16 拡張現実 (AR)：現実世界を写した映像に、電子的な情報を実際にそこにあるかのように重ねて、ユーザに提示する技術。

*17 複合現実 (MR)：現実世界を写した映像に、電子的な情報を重ねて、ユーザに提示する技術。ARと異なり、自由視点での表示など情報を実際にそこにあるかのように提示する。

*18 バーストサイズ：QoSフローごとに設定される、無線アクセスネットワーク内遅延許容値内で送られる最大データ量。

*19 UDP：トランスポート層のプロトコルの1つで、送達確認や輻射制御などを行わないため処理が軽く、途中でデータが抜け落ちても問題が少ない通信に用いられる。

*20 GNSS：地球航行法衛星システム。GPS、GLONASS、Galileoなどを指す。

*21 SMPTEプロファイル：IEEE 1588 (PTP (*22参照)) のプロトコルプロファイルの1つであり、SMPTEが仕様化したもの。

*22 PTP：ネットワークに接続された装置間で高精度な時刻同期をするためのプロトコル。

管理される。なお、5GSブリッジは、送信元MACアドレス*24およびVLAN ID (Virtual LAN ID)*25の学習やそれに基づく動的フィルタリング*26エントリの更新など、基本的なIEEE 802.1Qブリッジ機能もサポートしている。CNCは、5GSからブリッジ情報（例えば、LLDP (Link Layer Discovery Protocol)*27を介して発見されたポートの数やリンク層トポロジ*28の情報）を読み取り、5GSブリッジに静的フィルタリングエントリ*29を設定することができる。静的フィルタリングエントリは、5GSブリッジ内でのフレームの転送やフィルタリングの規則を規定する。

3.1 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に示す。

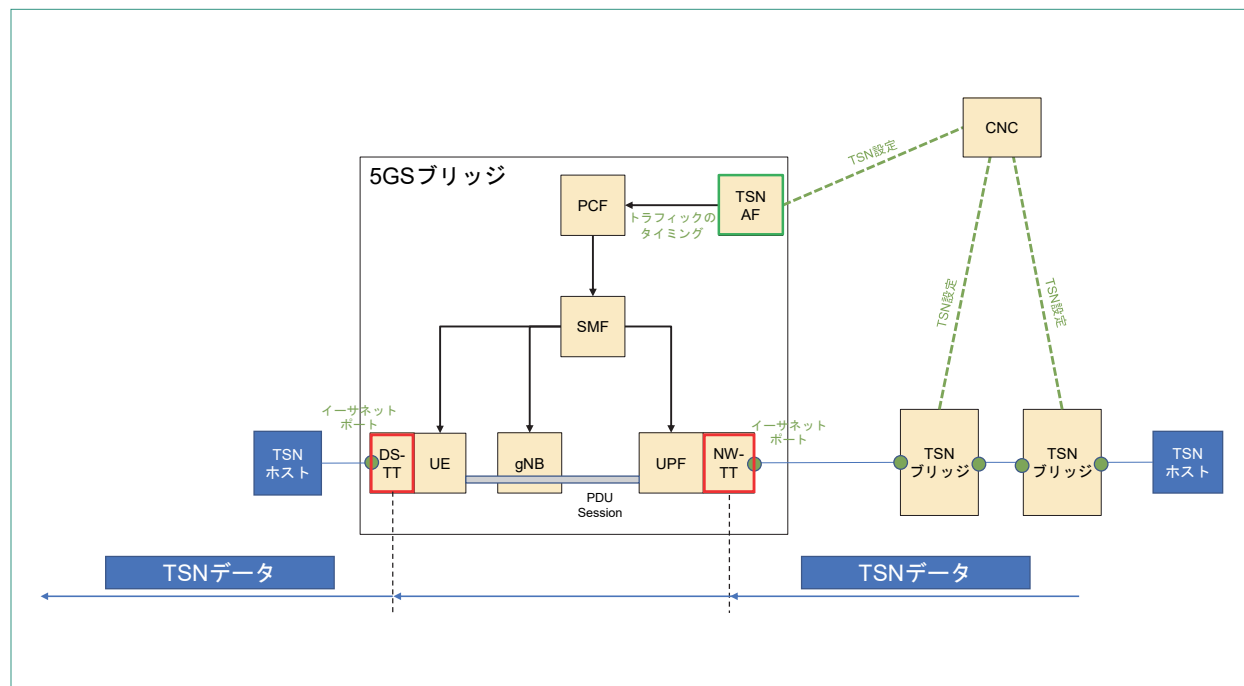


図1 5GSにおけるIEEE TSNのサポート

- *23 PSFP：受信したデータストリームごとに、フィルタリング、ポリシング、キューイングを行うためのブリッジの機能。
- *24 MACアドレス：各イーサネットボードに割り振られる、12桁の固有の物理アドレス。
- *25 VLAN ID：VLANは、物理的な接続構成に依存せず、論理的なネットワークを構築することを可能にするイーサネット技術。VLAN IDは、その論理的なネットワークの識別子。
- *26 フィルタリング：入力されたメッセージを、その後の処理の区別のために、フィルタと照合して、振り分けること。
- *27 LLDP：リンク層発見プロトコル。本プロトコルを用いるエー

ジェントは、隣接装置への接続情報や、隣接装置のポート情報などを取得する。

CNCはTSN AF (Application Function)*30を介して5GSと通信する。CNCとTSN AFの間のインタフェースは3GPPで規定されていないが、CNCとTSN AFは、例えば、IEEE 802.1QおよびSNMP (Simple Network Management Protocol)*31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る。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)*32とNW-TT (NetWork-side TSN Translator)*33との間で制御メッセージを配信する役割を担う。

DS-TTはUE (User Equipment)*34と結び付き、NW-TTはUPF (User Plane Function)*35と結び付き。この2つは、5GSのブリッジ機能のほとんど、例えば時刻を意識したスケジューリングやPSFPなどを実装する。1つの5GSは複数の仮想ブリッジを

- *28 トポロジ：機器の位置関係やネットワーク構成。
- *29 静的フィルタリングエントリ：1つあるいは一群のMACアドレスを宛先にもつ受信したイーサネットフレームをブリッジのどのポートに出すのかを決める情報のうち、静的であって管理側から設定できるもの。
- *30 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する。5GSとCNCが協調動作をすることを可能にする。

もつことができ、それぞれの仮想ブリッジは、TSN AF, UPF/NW-TT, 複数のDS-TT/UEで構成される。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する。DS-TT/UEは、イーサネットタイプのPDU (Protocol Data Unit) Session^{*36}を介してUPFに接続されている。5GSブリッジ内のトラフィックルーティングはイーサネットフレーム^{*37}の宛先MACアドレスとVLAN IDに基づいて実行される。

3.2 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ある。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ある。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に示される。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ある。5GSブリッジ (DS-TTまたはNW-TT内) の出口ポートはgPTP (generic PTP)^{*38}を使用して伝搬遅延を測定する。TSN AFはこの測定値をCNCに報告する。

3.3 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する。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る。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にその情報を配信する。設定にTSNストリームの

PSFP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情報を決定する。またTSN AFはPSFP情報を使用して、TSCAC (TSC Assistance Container)^{*39}を決定する。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)^{*40}、および、周期性を定義する。最後に、TSN AFはTSC QoS情報とTSCACをPCF (Policy Control Function)^{*41}に提供する。

SMF (Session Management Function)^{*42}は、PCFが決定したQoS情報を用いて、QoSフロー^{*43}を設定する。SMFは、PCFが転送するTSCACを使用してTSCAI (TSC Assistance Information)^{*44}を導き出し、QoSフロー設定要求とともにgNB (gNodeB)^{*45}に提供する。gNBは、TSCAIを参考に、UL方向の設定グラントやDL方向のセミパーシステントスケジューリング^{*46}など、無線リソース^{*47}を割り当てる。

4. 5GSにおける時刻同期のサポート

4.1 概要

前述したように、通信の確定性を実現するメカニズムの1つは、ネットワークでの時刻を意識したスケジューリングの適用である。このスケジューリングでは、ネットワーク上に複数あるブリッジがそれぞれにもつ時計が、互いに時刻同期していることが必要である。アプリケーショントラフィック内のタイムスタンプも、それらの時計に時刻同期していることが必要である。

時刻同期は通常、PTPを使用してネットワーク内でグランドマスタ (GM: Grand Master)^{*48}から他のクロックにタイムスタンプを配信することで行

*31 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。

*32 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ポートを提供する。

*33 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ポートを提供する。

*34 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を可能にする。

*35 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。

*36 PDU Session: UEとデータネットワークの間の論理接続。

*37 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。

*38 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。

*39 TSCAC: TSNストリームのUL方向およびDL方向のBAT (*40参照)、および、周期性を定義する情報。TSN AFあるいはTSCTSF (*63参照) からSMF (*42参照) に通知される。

われる。PTPを用いるにあたり、IEEE 1588では、イーサネットやUDP/IPv4 (IP version 4)^{*49}またはUDP/IPv6^{*50}を含む複数のトランスポートプロトコルが使えるとしている。IEEE TSN仕様の時刻同期は、IEEE 802.1ASで規定されているgPTPによって提供される。gPTPは、PTPのプロトコルプロファイルの1つであって、IEEE 802.1Qブリッジで実装できるイーサネットをトランスポートに使用する。

4.2 Rel-16/17における (g) PTPメッセージの処理

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gPTPをサポートしている。5GSを外部IEEE TSNネットワークと統合すると、5GSはPTPリレー [3]^{*51}として動作する。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する。この場合、イーサネットタイプのPDU SessionがDS-TT/UEとUPF/NW-TTの間で使用される。

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る。この場合、5GSは境界クロック^{*52} [2] か、エンドツーエンドまたはピアツーピアの透過クロック^{*53} [2] 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る。

PTPのプロトコルプロファイルとして、イーサネット上で動作するgPTPを用いる場合でも、UDP/IP上で動作する他のプロトコルプロファイル (e.g. SMPTEプロファイル) を用いる場合でも、5GS内のgPTPあるいはPTPのメッセージは、NW-TTおよびDS-TTと同様に処理する。詳細を、図2を用い

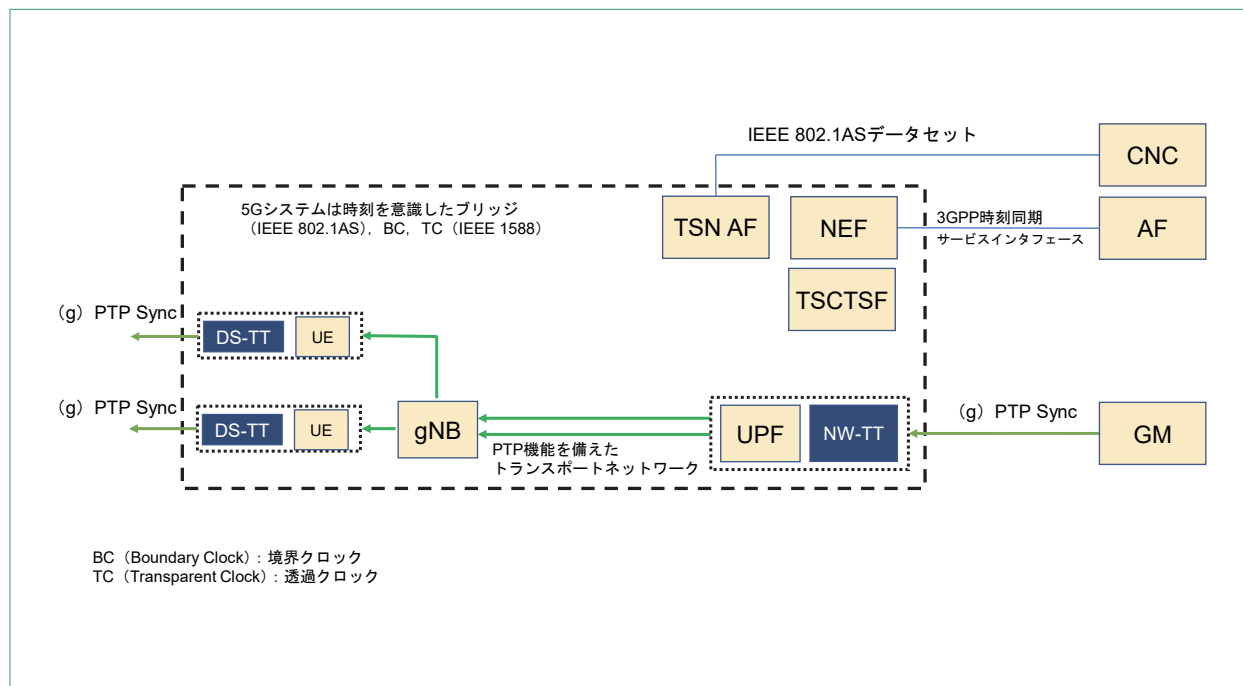


図2 5GSにおける時刻同期のサポート

*40 BAT : データパストが到着する時刻。TSCACで用いられる場合は、UL方向ではDS-TT、DL方向ではNW-TTへの到着時刻であり、TSCAI (*44参照) で用いられる場合は、UL方向ではUE、DL方向ではgNBへの到着時刻である。

*41 PCF : QoSやポリシーを決定しSMF (*42参照) に提供する5Gコアネットワーク内の機能。

*42 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。

*43 QoSフロー : 5GSのQoS転送処理における最も細かい粒度。

*44 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に通知される。

*45 gNB : 5Gの無線方式に対応した無線基地局。

*46 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。

*47 無線リソース : 無線チャネル (周波数) 割当てに必要となるリソースの総称。ここでは、ユーザごとに通信のため割り当てられる時間および周波数。

*48 グランドマスタ (GM) : ほかの時計が同期を取る対象となる時刻情報を提供する時計。

て解説する。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を指すとする。

(1)GMの位置とPTPポート状態

Rel-16では、5GSは、N6*⁵⁴インタフェースに接続する外部ネットワークにあるGM、および、NW-TT内部のGMをサポートしている。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ある。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、従ってDS-TTのPTPポートもスレーブ状態となる場合がある。

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る。Rel-17は、そういった事前設定に加えて、BMCA (Best Master Clock Algorithm)*⁵⁵もサポートしている。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ある。

(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*⁵⁶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る。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ポートである。内部滞留時間の考慮は、(g) PTP SyncメッセージがgNBとUEの間の無線インタフェースを越える必要があり、そのためメッセージが比較的大きく遅延する5GSでは特に重要である。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*⁵⁷

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する。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上で、5GS外に送出する。

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ある。これは、gNBとUPFの間に、PTPのテレコムプロファイル*⁵⁸ (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*⁵⁹を配備する、あるいは、ローカルGNSS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る。gNBは、TS38.331 [7] で定義されているブロードキャストまたはユニキャストRRC (Radio Resource Control) シグナリング*⁶⁰を介して、gNBの内部参照クロックをDS-TT/UEに配信する。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る。Rel-16では、UEは、自身が測定するタイミングアドバンス*⁶¹を流用し、gNBから受け取る5G参照時刻をローカルに修正する。

(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で向上している。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する。その後、UEは、2つの送受信時間差を用いて、伝搬遅延を計算する。

(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は同期されない。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

*49 IPv4：現状のインターネットで利用されているインターネットプロトコル。アドレス資源を32bitで管理している。

*50 IPv6：インターネットで使われる通信規約の1つ。現在広く使われているIPv4よりも、はるかに多くのIPアドレス (固有番号) を使用可能である。

*51 PTPリレー：PTPでプロファイルの1つであるgPTPを用いる場合の、高精度な時刻同期をするための装置。

*52 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。

*53 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。

*54 N6：UPFとDNの間の参照点。

*55 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。

*56 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。

*57 ユーザプレーン：通信で送受信される信号のうち、ユーザが送受信するデータの部分。

*58 テレコムプロファイル：PTPのプロファイルの1つ。主に公衆網のトランスポートネットワークで用いられる。

部滞留時間は調整する必要がある。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する。

(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^{*62}の遠隔設定をサポートしている。

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によって管理される。TSN AFから外部コントローラに至る実際のインタフェースは3GPPで規定されていないが、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ある。

IEEE TSNを統合しない網構成では、TSCTSF (TSC Time Synchronization Function)^{*63}がTSN AFの役割を果たして、5GSのPTPインスタンスを管理する(図2)。この網構成の場合、Rel-17では、TS 29.522 [8]で規定されているように、外部AFが、NEF (Network Exposure Function)^{*64}およびTSCTSF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フェースも定義している。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^{*65}、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る。また外部AFは、サービスインタ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る。この場合、5GSは (g) PTP Syncメッセージを生成しない。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

時刻を配信する。

5. 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る。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する。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に示す。

外部のAFは、TS29.522 [8]で規定されているサービスインタフェースを介して、PDU SessionのQoS情報を5GSに提供できる。

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に関係付けられる。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る。

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る。

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^{*66}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)を含む。AFから5GSへの要求メッセージは、トラ

^{*59} トランスポートネットワーク：無線アクセスネットワークとコアネットワークを接続するネットワーク。かつ、それぞれのネットワーク内の装置間を接続するネットワーク。

^{*60} 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。

^{*61} 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。

^{*62} PTPインスタンス：必要な設定がされた、PTPを処理する実体。

^{*63} TSCTSF：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する。

^{*64} 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。

^{*65} トランスポートプロトコル：トランスポート層で用いるプロトコル。インターネットにおける主なトランスポートプロトコルとしては、コネクション型のTCP (Transmission Control Protocol) と、コネクション・レス型のUDPがある。

^{*66} 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。

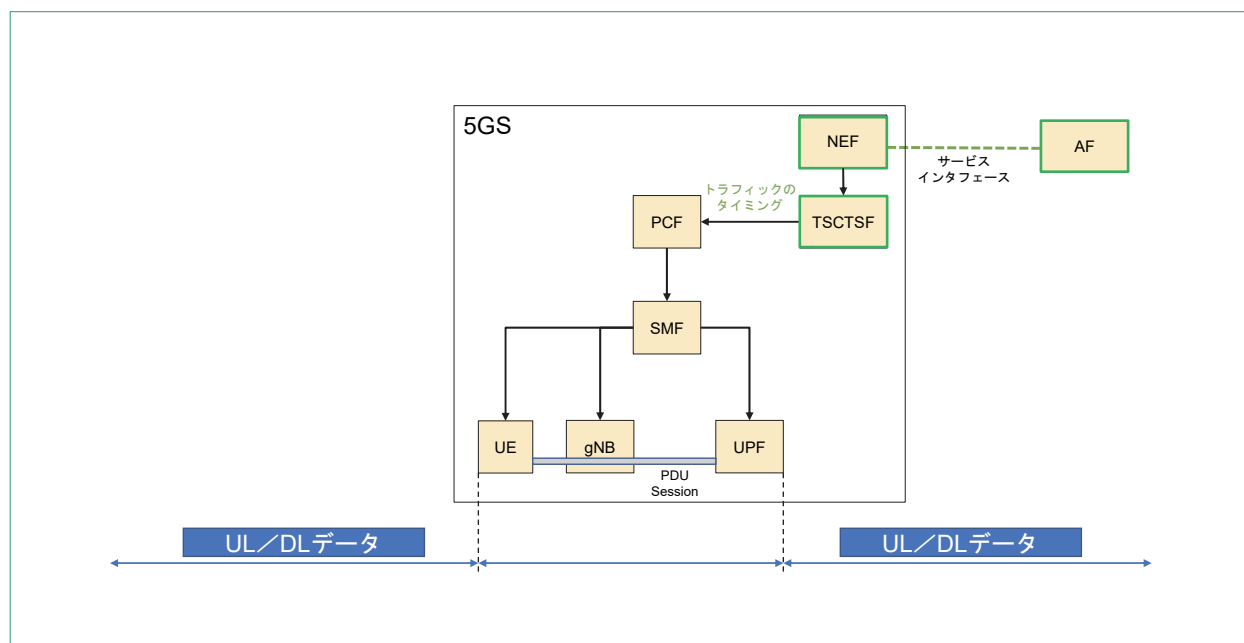


図3 IEEE TSNを統合しない確定性通信のサポート

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る。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）^{*67} QoSフローを設定するよう指示する。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に提供する。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る。

6. あとがき

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る。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る。今後は、IETF（Internet Engineering Task Force）DetNet^{*68}もサポートし、加えて、低遅延性向上を目途として、5GSとトランスポートネットワークとの連携強化およびRANとAFの間のスケジューリング連携に取り組む予定である。

文献

- [1] 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.

*67 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）も指定する。

*68 IETF DetNet：IETFで検討されている確定性通信の仕様。

- [2] IEEE Std 802.1AS-2020 : "IEEE Standard for Local and metropolitan area networks-Timing and Synchronization for Time-Sensitive Applications," Jun. 2020.
- [3] IEEE Std 1588-2008 : "IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems," Jul. 2008.
- [4] SMPTE ST 2059-2 : 2015 : "SMPTE Standard - SMPTE Profile for Use of IEEE-1588 Precision Time Protocol in Professional Broadcast Applications," Apr. 2015.
- [5] 3GPP TS23.501 V17.5.0 : "System architecture for the 5G System (5GS) ; Stage 2," Jun. 2022.
- [6] IEEE Std 802.1Q-2018 : "IEEE Standard for Local and metropolitan area networks-Bridges and Bridged Networks," Sep. 2018.
- [7] 3GPP TS 38.331 V17.1.0 : "NR : Radio Resource Control (RRC) ; Protocol Specification," Jun. 2022.
- [8] 3GPP TS 29.522 V17.6.0 : "5G System ; Network Exposure Function Northbound APIs ; Stage 3," Jun. 2022.