高精度時刻同期

TD-LTE

UTC



#### 3.5GHz帯導入

# 3.5GHz帯TD-LTE導入に向けた 高精度時刻同期ネットワーク装置の開発

2014年12月に、「第4世代移動通信システムの導入のための特定基地局の開設計画の認定」が総務省より行われ、3.5GHz帯の周波数が新たに利用可能となった。ドコモはPREMIUM 4Gのさらなる進化として3.5GHz帯を用いたTD-LTEを導入し、キャリアアグリゲーションにより既存FDD帯と組み合わせた受信最大370Mbpsの通信サービスを2016年6月に開始した。本稿では、ドコモにおいて初めての導入となるTDD方式のサービスを実現するため、必須技術である高精度時刻同期ネットワークに関してその技術概要や特徴を解説する。

無線アクセス開発部 横手 慎一 西村 弦大

ドコモ・テクノロジ株式会社 大グ ソリューションサービス事業部

パ・パ・ロー tぎもと ひろとし **杉太 實利** 

## 1. まえがき

2014年12月、総務省より3.5GHz帯がドコモに割り当てられた。3.5GHz帯ではその使用要件においてTDD (Time Division Duplex)\*<sup>1</sup>方式が求められており、ドコモにおいても3.5GHz帯導入にあたりそのLTE版であるTD-LTE方式を採用した。

TD-LTE方式では、上りチャネルと下りチャネル周波数の分離が不要で、周波数帯を最大限使用できる反面、隣接する基地局から上りチャネルと下りチャネルの信号が同一時刻に送信されると電波干渉につながる

ため、自社の基地局だけではなく他の通信事業者の基地局との間でも非常に精度の高い時刻同期が必要となる。その精度はITU-T(International Telecommunication Union-Telecommunication Standardization sector)G.8271\*2で、協定世界時(UTC:Coordinated Universal Time)\*3と基地局装置の時刻誤差は $1.5\,\mu\,\mathrm{s}$ 以下に抑えるよう規定されている(図1).

基地局装置でGPSなどの電波を 直接受信し、UTCの時刻を生成して 使用することで高精度時刻同期を実 現することができるが、地下のよう にGPSなどの電波が届かない基地局 では、イーサネット伝送を活用した 時刻同期方式を採用することとなる.

しかし時刻同期で一般的に使用されるNTP (Network Time Protocol)\*4を, stratum-3\*5で適用してもUTCとの時刻誤差はミリ秒オーダとなり精度が低く, TD-LTE方式における時刻同期方式として使用できないことから, PTP (Precision Time Protocol)と呼ばれる高精度時刻同期プロトコルを使用して実現させる(表1). PTPではイーサネット伝送路を使用することで, 汎用性が高く,基本的に距離に依存せずに高精度で安定した時刻を基地局装置に配信す

©2016 NTT DOCOMO, INC. 本誌掲載記事の無断転載を禁じます.

† 現在,国際事業部

- \*1 TDD: 双方向の送受信方式の1つ. 上りリンクと下りリンクに同一の周波数帯を使用し、異なる時間を割り当てることにより双方向通信が可能.
- \*2 ITU-T G.8271: パケットネットワークにお ける時刻と位相同期を定義したITU-T勧告.
- \*3 協定世界時 (UTC):世界各地の標準時刻 の基準となる時刻.
- \*4 NTP: コンピュータ内部のシステムクロックをTCP/IPネットワークを通じて現在時刻に同期させるためのプロトコル.

ることが可能となる.

PTPのネットワークは、GMC (Grand Master Clock)\*<sup>6</sup>と BC (Boundary Clock)\*<sup>7</sup>という装置で構成されており、本稿ではそれらを用いたTD-LTE方式に適合する高精度時刻ネットワークについて解説する[1] [2].

## 2. 時刻同期方法

ITU-Tで標準化されているイーサ

ネット伝送路を活用した時刻同期方法には、①Full On Path Supportと②Assisted Partial Timing Supportの2種類がある(図2).

- ①Full On Path Supportは、GPS などから基地局装置までの経路 にあるすべての装置が、統計処理により時刻誤差を修正し再配信するBC機能をサポートし、PTPパケットを伝達するため、高精度の時刻配信を実現する.
- ②一方、Assisted Partial Timing Supportは、経路の中にBC機能非対応装置も含めた構成での時刻同期となる。既存のイーサネット網を使用可能であるものの、BC機能非対応装置の処理遅延などの影響を受けることから、構成によっては必ずしも安定した時刻同期精度を確保できるわけではない。基地局装置が直接GPSなどの電波を受信する

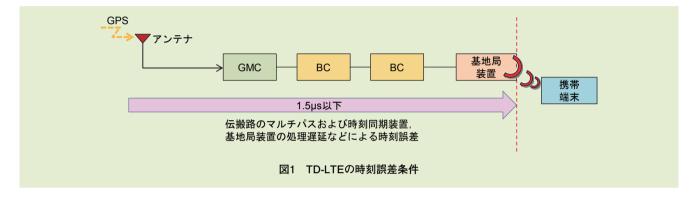
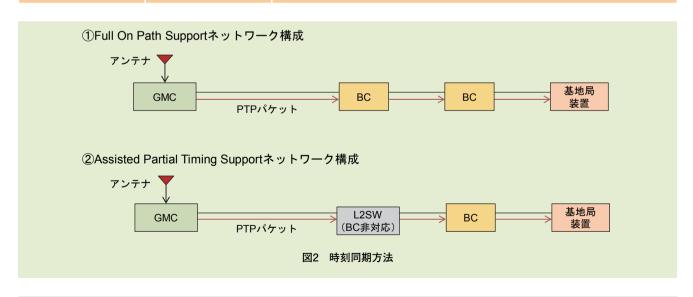


表1 時刻同期プロトコル

プロトコル	同期精度	同期方法
NTP	1ms程度	時刻の基準を保持するサーバに対する、クライアントからの要求により同期する.
PTP	1.5μs以下	Master, Slaveの役割を持つ装置間のメッセージの交換により同期する.



- \***5 stratum-3**: NTP階層構造においてUTCから, 3階層目の装置. stratum-3からクライアントに時刻配信されることが一般的である
- \*6 GMC: GPSなどの信号からUTC時刻情報 を取り出し、パケットとして下位装置に配
- 信する. PTP通信の頂点になる装置. \*7 BC:上位装置からの時刻を補正し下位装

置に再配信する装置.

構成の場合のバックアップとし ては使用可能と規定されている.

ドコモではTD-LTE方式をGPS などの電波を受信できない地下など にも展開することから、時刻同期方 法に、バックアップを前提として使用するAssisted Partial Timing Supportではなく、Full on Path Supportを採用した.

# 3. 高精度時刻同期のメカニズム

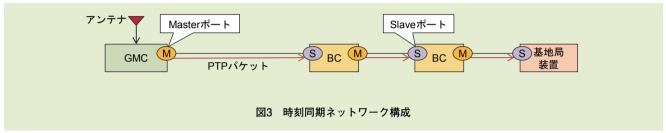
時刻同期ネットワークは図3に示すGMCを頂点とした構成となり、各区間の上位側装置の下位向けポートがMaster、対向側装置の上位向けポートがSlaveとなる。

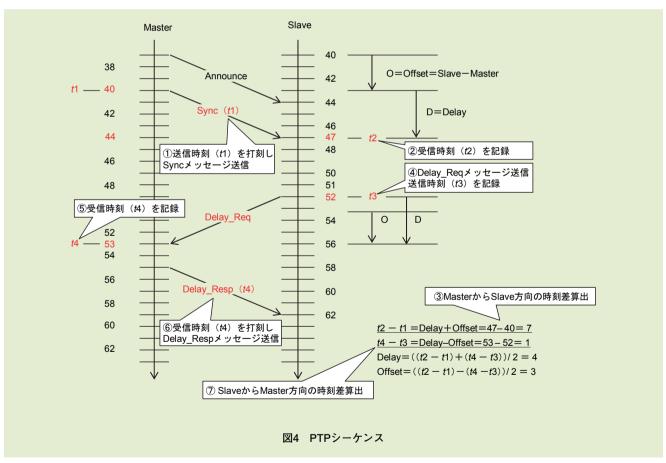
MasterとSlave間で次に挙げるPTP シーケンス (図4) によりメッセー ジ交換を行う. また,装置内部遅延 をキャンセルする動作を具備するこ とで,高精度な時刻同期を実現する.

#### 3.1 PTPメッセージタイプ

PTPメッセージは、Announceメッセージと、Eventメッセージに大別される.

(1)Announceメッセージ Masterから Slaveへ送信される





メッセージで、セッション\*<sup>8</sup>確立や 時刻同期精度情報の通知に使用する. (2)Eventメッセージ

- ・Syncメッセージ: Masterにおける送信時刻が記録され、Masterから Slaveへ送信されるメッセージである.
- ・Delay\_Reqメッセージ: Sync メッセージを受信したSlaveか ら、Masterへ返信されるメッ セージである.
- ・Delay\_Respメッセージ: Master におけるDelay\_Reqメッセージ の受信時刻が記録され, Master から Slaveへ送信されるメッセージである.

#### 3.2 PTPシーケンス

BCはMaster-Slave間の時刻差を 把握し、伝送路遅延および装置間の 時刻ずれ(オフセット)を算出する ことで、時刻補正を行う(図4).

- (1)MasterからSlave方向の時刻差計算
  - ①Masterは送信時刻(fl)を打刻 したSyncメッセージをSlaveへ 送信.
  - ②SlaveはSyncメッセージを受信 した時刻 (*t*2) を記録する.
  - ③Slaveは t2および t1により, MasterからSlave方向の時刻差 を把握する(t2-t1:図4中47 -40=7).
- (2)SlaveからMaster方向の時刻差計算
  - ④SlaveはMasterへDelay\_Reqメッセージを送信し、SlaveはDelay\_Reqメッセージの送信時刻(お)を記録する.
  - ⑤MasterはDelay\_Regメッセージ

を受信し,受信時刻(*t*4)を記録する.

- ⑥Masterは受信時刻(4)を打刻 したDelay\_Respメッセージを, Slaveへ送信する.
- ⑦Slaveは、Delay\_Respメッセージを受信し、44およびおにより
  SlaveからMaster方向の時刻差を把握する(4-お:図4中53-52=1).

#### (3)伝送路遅延とオフセットの計算

Master-Slave間の伝送路遅延時間が対称であるという前提条件に基づき、伝送路遅延とオフセットを計算する.

- · 伝送路遅延= {(*t*2-*t*1) + (*t*4-*t*3)}/2=(7+1)/2=4
- ・オフセット= $\{(t2-t1)-(t4-t3)\}/2=(7-1)/2=3$

MasterからSlaveまでとSlaveから Masterの伝送路距離に非対称性が ない場合,到達時間は同じとなる. よって,それらの合計を2等分した値を算出すると,それが伝送路遅延時間となる. またそれらの差分を2 等分した値が、オフセットとなる.

Slaveは算出した伝送路遅延とオフセットにより自装置内の時刻補正を常に行い、PTP装置(GMCおよびBC)の各セッション間で高精度時刻同期を実現する.

## 3.3 装置内部遅延キャンセル 装置内で発生する内部遅延補正に、 PTPパケットのコレクションフィー ルド\*9を使用している.

Masterが送信するEventメッセー

ジのコレクションフィールドに補正 値を付加することで、SlaveはMaster の内部遅延をキャンセルすることが できる(図5).

## 4. PTP装置の機能概要

## 4.1 PTP装置の機能ブロック

GMCは図6に示すように、GPS などの信号を受信し時刻情報を抽出するGPSレシーバモジュールと、その時刻情報を自装置のシステムクロックとして保持し、Sync-E\*10処理部も搭載したクロック供給部がある。またクロック供給部からのタイムスタンプをPTPパケットに埋め込み生成するPTP処理部や、1PPS(Pulse Per Second)\*11を送信するPPS処理部がある。

BCの機能ブロック図は、GMCと 異なりGPSレシーバモジュールが ない.

#### 4.2 Sync-Eとの併用

時刻同期は周波数同期\*12を前提とするが、イーサネットで動作するPTPでの周波数同期は各装置間で独立しており、ネットワーク全体では非同期である.一方Sync-Eは、物理レイヤで動作するため、通信量の増減に関係なく精度の高い周波数同期を行い、かつネットワーク全体で同期を可能にする.

そこでドコモは、PTPとSync-E 併用がTD-LTE方式で求められる高 精度時刻同期に有効と判断し、この 方式を採用した、これによりPTP とSync-Eを併用することで、時刻 同期ネットワークの全装置において、

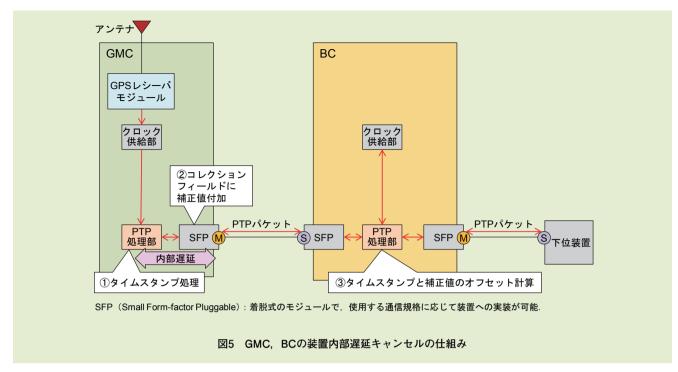
<sup>\*8</sup> セッション: データのやり取りを行うため の仮想的な通信路, またはそのやり取りそ のもの.

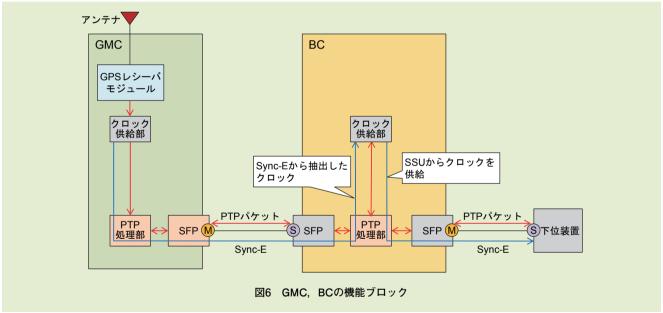
<sup>\*9</sup> コレクションフィールド:装置内遅延を伝達に使用するPTPパケットに含まれるフィールド.

<sup>\*10</sup> Sync-E:物理レイヤで周波数同期する方式、同期を行う伝送路のすべての装置が Sync-Eに対応していることが必要、

<sup>\*11 1</sup>PPS: 1秒間に1回送信されるパルス信号.

<sup>\*12</sup> 周波数同期:時刻を刻む速度が装置間で一 致している状態.





PTPパケットを処理するタイミングが一致するため、エンドーエンドでの時刻同期精度の向上につながる.

#### 4.3 BMCA

BC装置は、障害に対応するため、

BMCA (Best Master Clock Algorithm) と呼ばれる機能により、最大2つの上位PTP装置と冗長構成を組むことが可能である.

この機能は、MasterがAnnounce メッセージ内に自身の時刻情報の性 能値を記述し、定期的にSlaveへ通知することにより実現される。Slaveは、2つのMasterから時刻情報を受信することができ、それらの性能値でMasterを判断し、BMCを選択する。

受信した2つの時刻情報のどちらと 同期を行うかの判断は、BMCAシー ケンスによって行われる(図7).

なお、選出されたBMCと時刻同期を行うが、そのBMCとの通信が障害になった際には、もう一方のMasterと時刻同期を行う。

Masterから通知される時刻情報の性能値は次の6種類があり、数値が高い方のMasterを選出する.

#### ①Priority1

GMCの絶対的優先度を示す値である. IEEE1588-2008\*<sup>13</sup>では固定値が割り当てられ,変更はできない. BCにおいては,BMCのPriority1の値を下位装

置に継承する.

#### (2)Clock Class

Masterから配信される時刻と UTCとの同期状態を示す値は、 **表2**のとおりである. UTCと同 期が取れている場合, Clock Class "6"(以下, CC6)が配 信される.

#### 3 Clock Accuracy

時刻精度を示す値である. ドコモのPTP装置にて扱うClock Accuracyは, **表3**のとおりである.

④Offset Scald log Variance 時刻同期精度の安定性を示す 値は. 表4の通りである.

#### ⑤Priority2

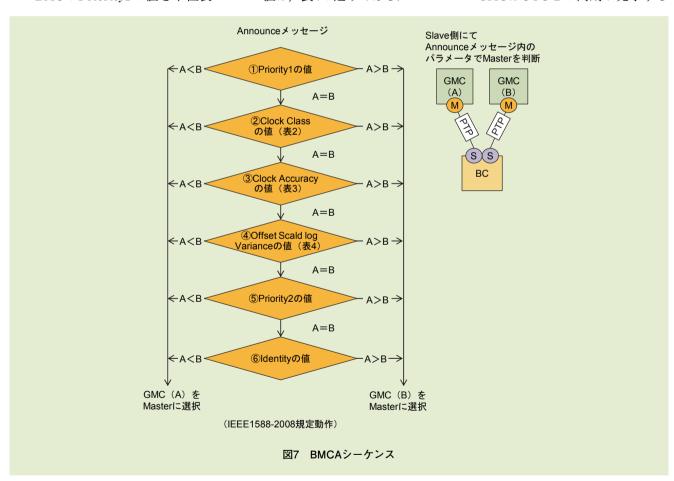
GMCの絶対的優先度を示す値である。ただし、Priority1と異なり変更可能な値であり、ユーザが設定変更する事で、同期すべきBMCを選択する事ができる。

#### **6** Identity

装置ごとに割り当てられるユニークな値で、装置MAC (Media Access Control) アドレス\*<sup>14</sup>より算出される.

## 5. 安定したサービス 提供に向けて

5.1 PTP装置の動作改善 GMCはUTCとの同期が完了する



\*13 IEEE1588-2008:金融や通信システムなど において使用する高精度時刻同期のプロト コルを定義したIEEE標準規格. \*14 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. と、配下にCC6とともに時刻配信を 開始する。

一方、BCは時刻同期ネットワークの一時的な障害により、システムクロックがUTCと時刻誤差がある状態でも、CC6を受け取ると配下装置に時刻を配信するため、一定時間

TD-LTE方式のサービスを停止させる必要があった。その対策として時刻誤差収束の動作を見直し、収束に要する時間を大幅に短縮することで、障害発生時のサービス影響時間の短縮につなげた(図8)。

#### 5.2 マルチパスの影響

GPSなどの電波は周辺環境により 直接波や反射波などがある(図9). 反射波はマルチパスと呼ばれ、高精 度時刻同期においては時刻誤差を増 加させることがある(図10および 図11).

表2 Clock Class

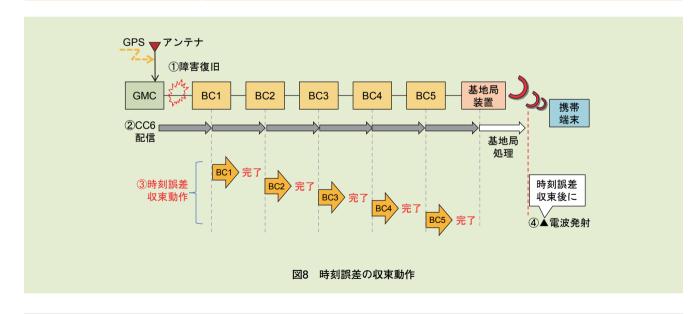
値(10進数表記)	状態の説明
6	UTCと同期
140, 150, 160	GMCがホールドオーバ
165	BCがMasterとの同期外れ
248	GMC:初期起動中もしくはホールドオーバ BC:初期起動中

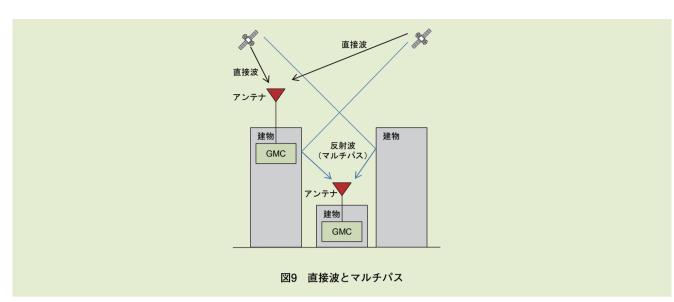
表3 Clock Accuracy

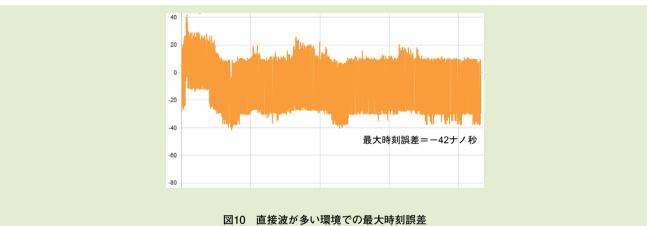
値(16進数表記)	状態の説明
21	100ns以内の時刻精度
FE	不明

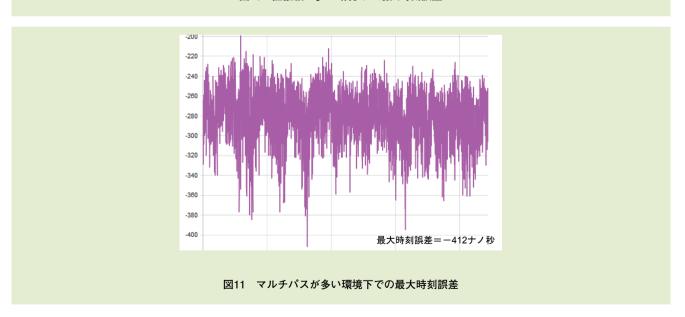
表4 Offset Scald log Variance

值(16進数表記)	状態の説明
4E5D	UTCと同期
FFFF	UTCと同期していない









現状このマルチパスを完全に排除することは不可能であるため、ドコモではマルチパスの影響による時刻誤差の増加を考慮したうえで、GMC配下に接続されるBCの段数を制限したネットワークを構築している.

## 6. あとがき

本稿では、3.5GHz帯TD-LTE導

入に向けた高精度時刻同期ネット ワーク装置に関する標準化仕様や動 作について、その概要を解説した.

現在も障害時の動作など標準化は 進められており、動向を把握しなが ら必要に応じて、ドコモのネット ワークへの標準化技術の適用など引 続き対応していく.

#### 文 献

- [1] 吉原、ほか: "高度化C-RANアーキテ クチャを実現する無線装置およびアン テナの開発、"本誌、Vol.23、No.2、 pp.19-24、Jul. 2015.
- [2] 藤井, ほか: "3.5GHz帯TD-LTE導入 に向けた基地局装置の開発," 本誌, Vol.24, No.2, pp.8-13, Jul. 2016.