

# パケットネットワークにおけるタイミングと同期

Reza Vaez-Ghaemi, Ph.D.

## 要旨

ブロードバンドサービスがますます普及することにより、よりビット単価の低いトランスポートネットワークが求められています。イーサネットは費用効果の高いトランスポートテクノロジーの技術ベースラインになっています。イーサネット(LAN)をワイドエリアネットワーク(WAN)においてキャリアグレードのテクノロジーにするために、通信事業者やベンダーはWANのタイミングと同期の要件を満たす必要があります。そのために必要な技術をはじめとする主要ないくつかの技術を導入してきています。

本稿では、タイミングと同期に焦点を当てながら、時分割多重(TDM)サービスのワイドエリアトランスポートの要件について解説します。台頭するそうした主要技術の2つの例として本稿で取り上げているのは、同期イーサネット(SyncE)とプレジジョンタイムプロトコル(PTP)です。

## はじめに

ブロードバンドサービスに対する需要は増加する一方であり、電気通信分野でのユーザー当たりの平均収益(ARPU)の増加に大きく貢献しています。最もインパクトの大きいサービスには、ブロードキャストTV、ビデオオンデマンド(VoD)、モバイルインターネットがあります。収益につなげるためには、これらのサービスは従来方式より、大幅にビット単価の低いトランスポートテクノロジーが必要となります。

イーサネットは費用効果の高いトランスポートネットワークの技術ベースラインになっていますが、元々ローカルエリアアプリケーション用に設計された技術であるため、包括的なワイドエリアアプリケーション用のいくつかの主要属性が不足しています。例えば、高周波スペクトラムを効率的に使用し、セルサイト間のハンドオーバー動作を可能にするには、携帯基地局の側で周波数の同期と周波数の安定が必要になります。

同期光ネットワーク/同期デジタル階層(SONET/SDH)や準同期デジタル階層(PDH)といったTDMネットワークは、タイミング基準を物理層でネイティブに伝送できるテクノロジーに基づいています。この機能は、図1に示すように、TDMタイミング情報をパケットネットワーク経由で顧客企業やセルサイトに伝送する必要があったために生まれたものです。相互運用機能(IWF)は、イングレス/イグレスサイトでTDMサービスをパケットにまたパケットからTDMサービスに変換します。IWFには、TDMサービス要件によって異なるアプローチがあります。

## TDMサービスの要件

TDMサービスはトランスポートネットワークに対してさまざまな条件を課し、そのうち幾つかは汎用でTDMばかりでなく非TDMサービスにも該当します。例えば、TDMサービスは運用、管理、および保守機能(OAM)、性能の監視、および問題を素早く検出して排除するための適切なメカニズムを必要とします。これらの汎用要件に加えて、TDMサービスは各TDMサービス間で大きく異なる可能性のある多数のタイミングと同期機能を必要とします。

周波数同期とは異なるノードで同じ周波数を提供することを意味し、これはパケットネットワーク経由で提供されるTDMサービスのタイミングリカバリに使用されます(回線エミュレーションサービス(CES)クロックリカバリともいう)。これら要件は、各サービス規格に規定されている通り、長期的な確度と位相ノイズ(ジッター/ワンダー)に関する要件に分類できます。例えば、グローバル移動体通信システム(GSM)/ユニバーサル移動体通信システム(UMTS)(ベーストランシーバステーション、BTS/NodeB)の無線エンドノードはその基準周波数をネットワークから取得します。干渉とローミングの問題を回避するために、50~250ppb(parts per billion)の周波数安定が必要です。

位相同期とは、基準タイミング信号の立ち上がりエッジが発生すると同じタイミングで複数のノードが基準タイミング信号にアクセスできるネットワークの状態を意味します。時刻同期とは、通信ネットワークのリアルタイムクロックに絶対基準時刻を配信することです。関係するノードはすべて絶対時刻情報にアクセスでき、共通のタイムスケールを共有します。時刻同期の配信は、位相同期を実現する1つの方法です。例えば、時分割二重(TDD)、UMTSベースのセルサイトは2.5μs以下のセル間タイミング確度を必要とします。ブリッジされたローカルエリアネットワーク(LAN)上でオーディオとビデオアプリケーションを伝送するには、準マイクロ秒単位での時刻同期が必要となります。

## パケットネットワーク上のTDMサービスの トランスポートのメカニズム

CESはサービスのトランスポート(エミュレーション)に使用される一般的な用語であり、TDMや非同期トランスファーモード(ATM)、マルチプロトコラレベルスイッチング(MPLS)などのサービスをエミュレートできます。本稿では、TDMサービス用のCES(回線エミュレーションサービス)の使用に注目します。図1に示すように、パケットネットワーク上のTDMサービスのトランスポートには幾つかのメカニズムがあります。イングレスでは、IWFはTDMペイロードをパケットに変換し、メトロイーサネットネットワーク(MEN)を経由した後のイグレスではTDMにマッピングし直されます。どのようなメカニズムを選択すべきかは、土台となるネットワークおよびサービス要件の特性によって異なります。以下に、ごく一般的なCESメカニズムについて解説します。

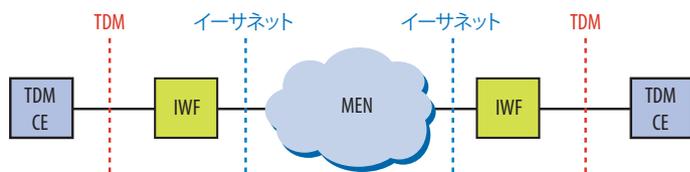


図1. パケットネットワーク上のTDMサービストランスポート

## PWE3 (IETF RFC 3985)

PWE3(Pseudowire emulation edge-to-edge)は、IPまたはMPLSを使用してパケット交換ネットワーク(PSN)上を伝送されるフレームリレー、ATM、イーサネット、TDM、SONET/SDHなどのサービスのエミュレーションについて説明しています。疑似ワイヤ(PW)用のアーキテクチャフレームワークを提示し、用語を定義して、各種プロトコル要素とその機能を規定しています。PWE3はPSN上での通信サービス(TT1リソースラインやフレームリレーなど)の必須属性をエミュレートするメカニズムです。

## SATOP (IETF RFC 4553)

SATOP文書は、PSN上でTDMビットストリーム(T1、E1、T3、E3)をPWとしてカプセル化する方法について説明しています。構造にとらわれないトランスポート、すなわち、それらの信号に加えられる可能性があるいかなる構造(特に標準的なTDMフレーミング(G.704)によって課せられる構造)も完全に無視するプロトコルのみを扱っています。このエミュレーションは、RFC 4197においては非構造TDM回線のエミュレーションと呼ばれ、プロバイダのエッジノード(PEノード)がTDMデータを解釈したり、TDMシグナリングに関与する必要のない用途に適しています。

## CESoPSN (IETF RFC 5086)

CESoPSN文書は、PSN上で構造化された(NxDS0)TDM信号をPWとしてカプセル化する方法について説明しています。この点では、構造にとらわれないTDMビットストリームのエミュレーションに関する類似の取り組みを補完するものです[RFC4553]。NxDS0回線のエミュレーションはPSNの帯域幅の節約を可能にし、DS0レベルのグルーミングおよび分配クロスコネクタアプリケーションに対応しています。また、PSNにおけるパケット損失の影響に対するCEデバイスの復元力を高めます。

## TDM over MPLS: ITU Y.1413

国際電気通信連合(International Telecommunications Union:ITU)の勧告Y.1413は、TDMとMPLS間のネットワーク相互運用に必要とされる機能に焦点を当て、具体的にはユーザープレーンでの相互運用メカニズムとトランスポート手順について規定しています。特に、TDM-MPLSネットワーク相互運用のため要件や相互運用シナリオ、カプセル化形式、構文を列挙しています。TDM接続が本質的にポイントツーポイント接続であることを前提にすると、この相互運用は2つのIWF間の1つの接続の定義です。この勧告は、T3とE3までのTDMレート扱っているだけです。

## タイミングと同期に関するアプローチ

パケットネットワーク上でのタイミングと周波数同期の伝送は、幾つかの技術を使い幾つかの方法で実現できます。理想的には、すべてのエンドノードの同期をとるには、いくつかの場所にある一次基準クロック (PRC) にアクセスできることです。大規模ネットワークでは、PRCへのアクセスでいくつかのノードをアクセスする方法が用意されていることがあります。しかしながら、他の多くのノードはRPCノードにアクセスできるノードから基準を取得する必要があり、そうしたノードは帯域内または帯域外リンク経由で基準クロックからタイミング情報を受信できます。

帯域内モードでは、ペイロードデータを使用してタイミング情報を伝送します。最も正確で信頼性の高いアプリケーションの場合は、トラフィックオーバーヘッドを増加させる、専用タイミングパケットを使用する帯域外モードを検討します。帯域外モードの例には、ネットワークタイムプロトコル (NTP) や PTP、以下でさらに説明する同期イーサネットなどがあります。

NTPは現在も使用されている最も古いイーサネットプロトコルの一つで、「標準」版とNTPの簡略版であるSNTP (simple network time protocol) の2つのレベルがあります。NTPの最新版であるバージョン4 (NTPv4) は通常、公開インターネット上で従来のソフトウェア割り込みベースのソリューションを使用することで10~20ms内の時間精度を維持することができ、理想的な状態と最新世代のタイミングソリューション下ではLANでマイクロ秒またはそれ以上の精度を実現できます。NTPは、LANおよびWAN上での十分な性能を発揮し、比較の実装に費用がかからず、ほとんどハードウェアを必要としないため、最も一般的で、おそらく最も人気のある同期ソリューションです。NTPはLAN上で1~2ms、WAN上で1~20msの精度を提供できますが、スイッチとルーターを使用しており、多くのNTPクライアントが非リアルタイムオペレーティングシステムで運用されているという事実から、ネットワーク全体でのパフォーマンスを保証するには足りません。

## パケットベースの同期方法

パケットベースの方法では、図2に示すように受信機器へのGPS (汎地球測位システム) など正確な基準にアクセスできるマスター (サーバー) により生成されたタイムスタンプを持つパケットを使ってタイミングを配信します。

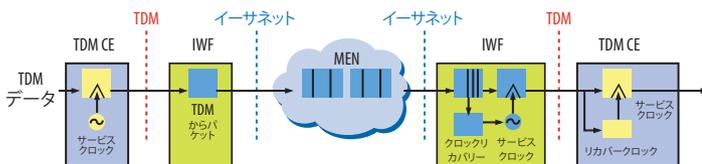


図2. パケットネットワーク上でのタイミング配信のためのネットワーク参照モデル

現在定義されている主要パケットプロトコルはNTPとPTPです。

## アダプティブ・クロック・リカバリ(ACR)と差分クロック・リカバリ(DCR)

アダプティブ・クロック・リカバリでは、ペイロードデータを使って同期日付を伝送します。自己アダプティブ・クロック・リカバリは、非同期パケットストリームから同期クロックを取り出すメカニズムです。マスタークロックとスレーブクロックの間に2つのIWFが置かれています。TDMストリームはIWFによりカプセル化されてパケットになり、PSNネットワークからもう一方の側のIWFに転送されます。パケットはまず、キュー (以下「ジッターバッファ」) に保持され、その後カプセル化が解除されてTDMストリームに戻されます。リカバリしたクロックがマスタークロックに一致することが鍵であり、そうでない場合は、ジッターバッファの深さを変える必要があります。ACRの利点は、機能がイーサネットネットワークの両端で実行され、既に配備されているスイッチやルーターに関して特別な要件がないことです。ACRの短所は、トラフィックが混雑している中に周波数の確度が低下することがあることです。

一部のPWEサービスは、外部基準クロックを利用できない場合に周波数をリカバリする手段としてACRを利用しています。ACRは、周波数同期を回復し配信するメカニズムとして主としてパケット到着レートとジッターバッファのデータレベルの、2つの要素を使用します。しかしながら、ACRは主としてネットワークの過度な使用による性能の低下という大きな制約があり、さらには、ITU規格のG.823/G.824 (平均タイムインターバルエラー (MTIE) および時間のずれ (TDEV) マスク) に基づく位相や時間のキャリア要件も満たさないことがあります。ACRはまた、適切な位相合わせや時刻情報も提供しません。さらに、ACRコーディングはベンダー独自のもので、ポイントツーポイント専用、相互運用性がなく、タイミングループになることがあります。

アダプティブ・クロック・リカバリモードでは、基準クロックはサーバー側でのみ利用できます。サービスクロックは、受信したパケットをフィルタすることによってクライアント側で取得します。差分クロック・リカバリモードでは、基準クロックはクライアントとサーバーの両方で利用できます。これを達成する方法の1つに、高価なGPS Stratum 1クロックを両方の側に置く方法がありますが、このアプローチは費用効果が悪い上に、リモートサイトのGPSアンテナは落雷や破壊行為の対象となることがあるまったく望ましくもありません。

## IEEE 1588/プレジジョンタイミングプロトコル(PTP)

もう一つの費用効果の良い方法は、Stratum 1 PTPグランドマスタークロックをサーバー側で使用し、タイミング情報をクライアント側のそれぞれ分離されたPTPスレーブクロックに知らせて、設置されている機器に従来のTDM T1タイミングを出力する方法です。この方法は、大掛かりなアップグレードを必要とせず、全ての周波数、時間、および位相をカバーします。

IEEE 1588規格としてよく知られているPTPは、元々が重要な工業自動化のための精密なタイミングを提供すること意図したものです。新しいバージョン2 (IEEE-1588v2) により、PTPはイーサネットNTPのレイテンシーとジッターの問題を克服し、ナノ秒単位の比類のない精度を提供しています。ネットワーク遅延とレイテンシーは、スレーブとマスターが短いメッセージを送信し合い、遅延とレイテンシーの不正確さを測定しキャンセルアウトする手法を使って、マスターとスレーブクロック(クライアント)間の往復遅延を測定することで大きく低減できます。以前は、IPパックホールを使用する際、3Gおよび新しい4Gサービスに必要な大きさの桁数を得るために高価なGPSベースのクロックが各セルサイトに必要でした。今では、モバイルスイッチングセンター(MSC)に中央グランドマスタークロックを置き、低コストのPTPスレーブクロックをセルサイトに置くことで、通信事業者の設備投資と運用費用の両方を大幅に削減できます。

正確なネットワークタイミングのためには、タイミング情報の転送時に2つの障害に対処する必要があります。オシレーターのドリフトとレイテンシーです。高品質なオシレーターとGPSなど正確なソースを使用してタイミングを得ることで、オシレーターのドリフトを軽減できます。タイミング情報転送時のレイテンシーの解決は、ソフトウェア/オペレーティングシステムコンポーネントがスイッチ、ハブ、相互運用ケーブルに関連するネットワークレイテンシーに加わることでさらに困難です。PTPは、マスターとクライアントノード間でタイムスタンプを交換し合うことでソフトウェア/オペレーティングシステムコンポーネントへの対処に役立ちます。

タイムスタンプ装置(TSU)をメディアアクセスコントロール(MAC)と物理イーサネット(PHY層)の間に置いて、発信および着信トラフィックを監視し、1588パケットを1つ検出した時点でタイムスタンプを発行します(図3)。マスタークロックは、ローカルクロックに基づいて定期的に同期メッセージをネットワーク上のスレーブクロックに送出します。TSUは同期メッセージが送出された正確な時刻をマークし、その正確な時刻情報を含むフォローアップメッセージをただちにスレーブクロックに送出します。スレーブクロックは同期メッセージの受信時刻をタイムスタンプし、その受信時刻をフォローアップメッセージで受け取った発信時刻と比較することでオペレーティングシステム内のレイテンシー時間を算出し、その値によってクロックを調整します。

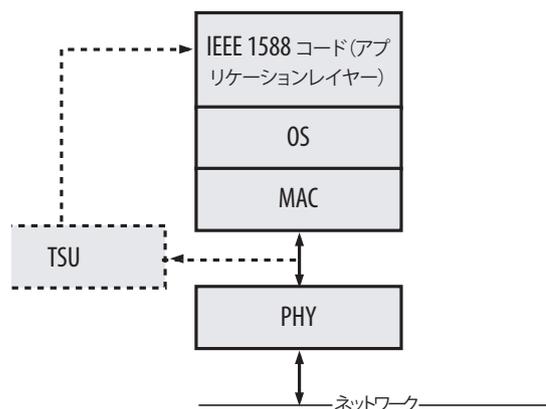


図3. PTP/1588ノードのTSU

## 同期イーサネット

同期イーサネットは、イーサネットの物理層で周波数を転送するメカニズムを提供します(ネットワーククロックなどの外部ソースまで後で辿ることが可能)。イーサネットリンクはそのようなものとして利用でき、同期ネットワークの一部とみなされます。同期イーサネットはイーサネットネットワークの一般アーキテクチャ内に収まる必要があります。タイミングを転送する機能を利用するには、同期イーサネットも同期ネットワークの一般アーキテクチャ内に収まる必要がということです。

ITU-T勧告8010は、図4に示すようにイーサネットをETHとETYの2つの層からなるネットワークとして解説しています。簡単に言うと、ETY層はIEEE 802.3に定義されている物理層を意味し、ETH層は純粋なパケット層を表しています。ETH層上のイーサネットMACフレームはETY層のクライアントとして伝送されます。IEEE規格で定義されている各種の protocols および機能はレイヤネットワーク内の特定の機能にマッピングされています。オープンシステムの相互(OSI)用語では、ETYはレイヤ1であり、ETHはレイヤ2です。

IEEE 802.3イーサネット(ネイティブ)の100ppm制限と異なり同期イーサネットには、4.6ppmというオフセット範囲制限があります。同期イーサネットインターフェイスは同期と非同期のどちらのモードでも動作できます。

非同期モードでは、同期イーサネットはIEEE 802.3と同等であり、従来型イーサネットインターフェイスと相互運用できます。受信機はリカバリしたクロックを送信機/システムクロックにパススルーしません。送信機はイーサネット機器のクロックに同期することができますが、受信側のノードには不明として現れます。

同期動作モードでは、送信機は4.6ppmにロックされ、受信機はそれをリカバリし、システム/送信機クロックに渡します。このモードでは、インターフェイスはネイティブのイーサネットインターフェイスからは機能しません。

同期イーサネットは各種ノード間の通信を可能にするために、ノードがその同期ステータスをダウンストリームノードに配信できるようにするSONET/SDH同期ステータスメッセージ(SSM)バイトと同様なイーサネット同期ステータスメッセージ(ESMC、G.8264)チャンネルを提供します。ダウンストリームのノードはこの情報を使用してさまざまある基準から選択するか、または万が一、両方の基準クロックが故障した場合には、自身の内部クロックに切り替えます。

SONET/SDH同期ネットワークには大規模な設置ベースがあり、同期イーサネット機器はG.8261とG.8262に従ってこのネットワークと連携する必要があります。

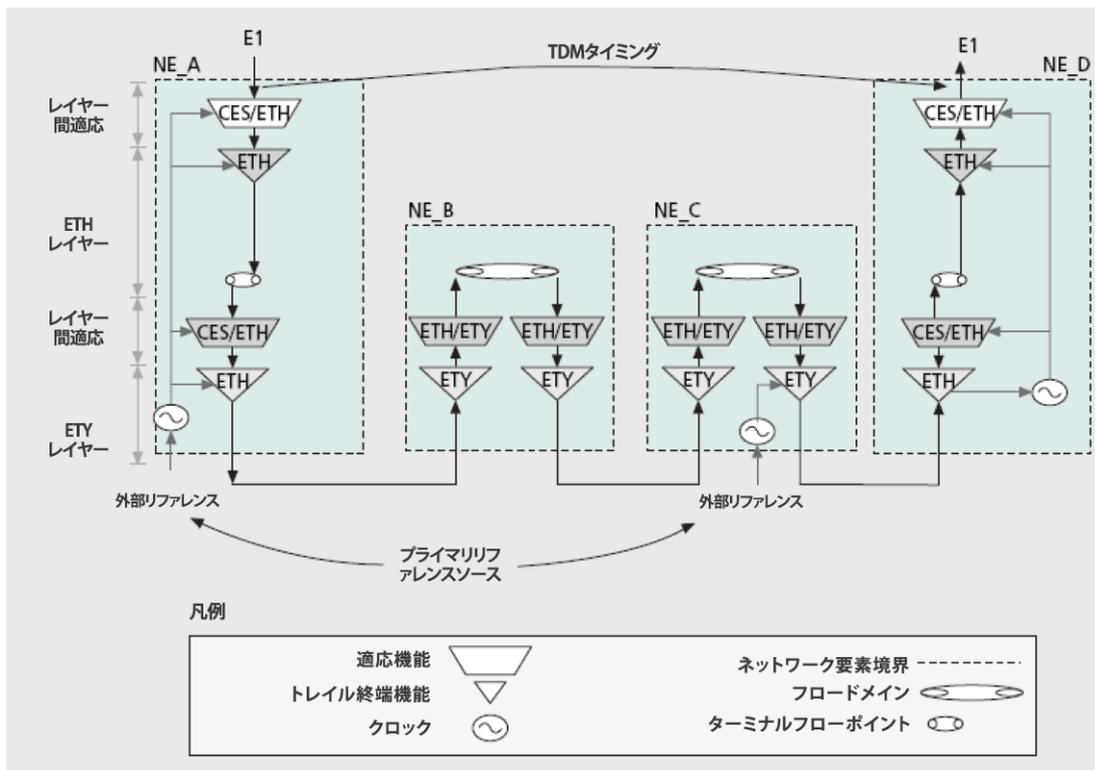


図4. 同期イーサネットネットワークの基準クロック

## テストアプリケーション

パケットタイミングの性能は幾つかの現象の影響を受けることがあり、例えば、パケットネットワーク上のネットワーク輻輳や故障、ルーティング変更などは、パケット損失やパケット遅延、パケットジッター（パケット遅延変動）につながる障害の原因になることがあります。Viavi ネットワークテスター MTS シリーズ(8000E/6000Av2/5800、SmartClass™イーサネット、およびONT-600シリーズは、メトロ、更にはフィールドや実験室でのアクセスアプリケーション用のイーサネットおよびTDMテスト機能を提供します。

パケットタイミングを検証するための主要な要素：

- TDMとパケットインターフェイスでの接続
- TDMのジッター/ワンダー
- 同期イーサネットのジッター/ワンダー

### 基本的なTDMおよびパケットテスト

TDMサービスを検証する第一のステップは、図5に示すようにエンド（TDM）ノード間のビットエラーレートテスト（BERT）を実施することです。ビットエラーがある場合は、閉じられたパケットネットワーク内で、基本的なpingテストなどのさまざまなテストを実施することで、イーサネット（OAM/ループバック）とIP（ICMP ping）レベルでの接続を検証できます。パケットネットワークの特性をさらに評価するには、パケットネットワーク全体のスループットや遅延、遅延変動（ジッター）のテストが必要になります。

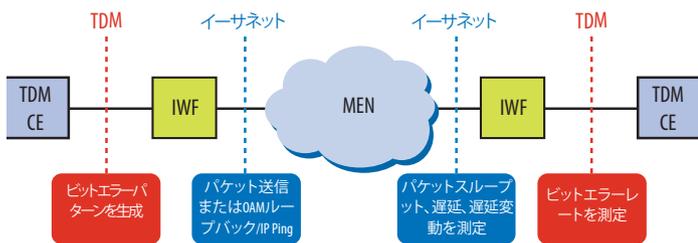


図5. 基本的なTDM/パケットテストの構成

### TDMのジッター/ワンダー測定

ITU G.823/824をはじめとする一連の規格には、TDMネットワークおよび同期ノードの性能が規定されており、図6に示すように、テスト構成やテストパターン、測定パラメータ、さらには、トラフィックおよび同期インターフェイスにおけるネットワーク要素に対する制限事項が定義されています。

MTIEとTDEVは図7に示す同期機能を検証するための主要パラメータです。

MTIEは一定期間のタイミング信号の最大位相変動を表しており、タイミング信号の位相遷移の捕捉に役立ちます。ただしMTIEは、位相遷移に対するその感度のため、タイミング信号のノイズの検証には不適格であることが判明しています。TDEVは二乗平均平方根（RMS）のピークエスティメータではなくパワーエスティメータであるため、ランダムノイズの特性評価に優れています。TDEVはタイミング信号内の一過性成分を排除するため、内在するノイズプロセスのエスティメータになります。

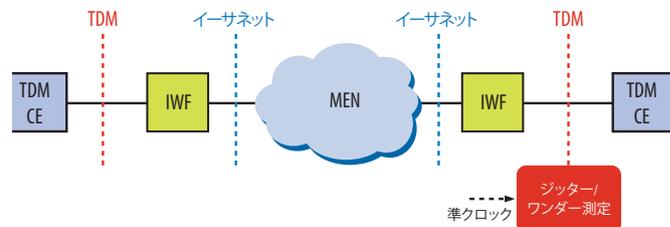


図6. TDMジッター/ワンダーテスト測定の構成

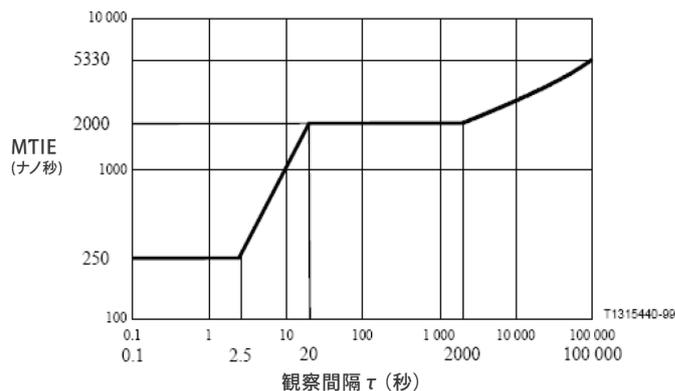


図7. TDMワンダーに対するネットワーク制限

ITUは、その規格G.810-813とG.823でTDMネットワークのタイミングと同期制限要件を規定しています。ITU T勧告G.8261には、パケットネットワークの同期面を定義し、ジッターとワンダーのネットワーク上限を規定しています。G.8261はまた、TDMインターフェイス上のこれらのパケットネットワークの境界で機器に要求されるジッターとワンダーの最小許容範囲も規定しています。ネットワーク要素に対する同期機能の最小要件の概略も解説しています。

## 同期イーサネットインターフェイスでのジッター/ワンダーの測定

ITUで定義された同期イーサネットのジッター/ワンダーの測定は、SONET/SDH測定に相当し、非同期イーサネットインターフェイスのジッター要件の方はIEEE 802.3に規定されています。ただし、非同期イーサネットインターフェイスにはワンダー要件はありません。

ITU G.8262勧告には、同期イーサネットを使用するネットワーク機器の同期に使用されるタイミングデバイスの要件の概略が解説されています。また、帯域や周波数確度、ホールドオーバー、ノイズ生成などのクロック要件も定義されています。

ITUのG.8262には、同期イーサネットに対する2つのオプションが含まれています。第1のオプションはEECオプション1といい、2048kb/s階層用に最適化されたネットワークとの相互運用用に設計された同期イーサネット機器に適用されます。こうしたネットワークでは、最悪時の同期リファレンスチェーンを許可しています。2番目のオプションはEECオプション2といい、1544kb/s階層用に最適化されたネットワークとの相互運用用に設計された同期イーサネット機器に適用されます。こうしたネットワークの同期リファレンスチェーンはG.813の付録II.3に定義されています。G.8262では、EECオプション1と2のジッター/ワンダー要件が定義されています。ITUのO.174は、同期イーサネットのジッターのテスト方法を定義するための新しい規格です。

## まとめ

イーサネットをWANのキャリアグレードの技術にすべく、通信事業者やベンダーはアダプティブ・クロックリカバリや同期イーサネット、プレシジョンタイムプロトコル(PTP、IEEE 1588)を含む、パケットネットワーク上のタイミングと同期の転送に関するいくつかの重要な技術を導入しました。適切な技術を選定して検証するためには、実験室と現場における入念な解析とテストが必要です。検証には、TDMおよびイーサネットインターフェイス上のネットワークのジッター/ワンダー性能の特性評価を含める必要があります。Viaviは、ONTおよびMTS-8000製品ラインを含む、ジッター/ワンダーのテストおよび測定製品のリーディングプロバイダです。

## 参考資料

- ITU-T Recommendation G.823, the control of jitter and wander within digital networks which are based on the 2048 kbit/s hierarchy, 2000.
- ITU-T, G.810. Definitions and terminology for synchronization networks, 1996.
- ITU-T, ITU-T. G.811, Timing requirements of primary reference clocks, 1997.
- ITU-T, G.803. Architecture of transport networks based on the synchronous digital hierarchy (SDH), 2000.
- ITU-T, G.823, The control of jitter and wander within digital networks which are based on the 2048 kbit/s hierarchy, 2000.
- ITU-T, G.824, The control of jitter and wander within digital networks which are based on the 1544 kbit/s hierarchy, 2000.
- ITU-T, G.8262, Timing characteristics of synchronous Ethernet Equipment slave clock (EEC), 2007.
- ITU-T, G.8261 Timing and Synchronization aspects in Packet Networks, 2008.
- ITU-T, G.8264, Distribution of timing through packet networks, 2008.
- IEEE, 1588-PTP, Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control System, 2008.
- IETF RFC 5086 Structure-Aware Time Division Multiplexed (TDM) Circuit Emulation Service over Packet Switched Network (CESoPSN), 2007.
- IETF RFC 4553 Structure-Agnostic Time Division Multiplexing (TDM) over Packet (SAToP), 2006.
- IETF RFC 1305 Network Timing Protocol (Version 3), 1992.
- IETF RFC 3985 Pseudo Wire Emulation Edge-to-Edge (PWE3) Architecture, 2005.
- Symmetricom, Lee Cosart, Timing Measurements in Packet Networks, 2007.
- Viavi, Andreas Alpert, Jitter and Wander Measurements in Synchronous Ethernet Networks, 2008.
- Ericsson, Synchronization in packet-based networks: challenges and solutions, 2009.



〒163-1107  
東京都新宿区西新宿6-22-1  
新宿スクエアタワー7F

電話: 03-5339-6886  
ファックス: 03-5339-6889  
Email: support.japan@viavisolutions.com

© 2017 Viavi Solutions Inc.  
この文書に記載されている製品仕様および内容は  
予告なく変更されることがあります  
timesync-wp-tfs-tm-ja  
30186133 901 0712