

Precision Time Protocol (PTP)

IEEE-1588規格で定義されたPrecision Time Protocol (PTP) は、ローカル・エリア・ネットワーク (LAN) の上のコンピュータをこれまで不可能とされた精度で時刻同期させる手段を提供します。既存のLANにおいても、PTPは複数のクロックを10マイクロ秒RMS以下の精度で同期させることができます。GPSもしくはCDMA受信機とPTPを備えたNetwork Time Serverは「IEEE-1588 グランドマスター」と呼ばれます。本紙では、PTPの基本原理、PTPの様々な実現方法、測定方法、およびEndRun グランドマスターを使用した時刻同期とその結果について説明します。

PTPによる時刻同期

このプロトコルは、Network Time Protocol(NTP)で使われているのと同じサーバー - クライアントモードと、マスター - スレーブ間でやり取りされる同期メッセージを定義しています。マスターは時刻の提供者であり、スレーブはマスターに同期します。グランドマスターは、GPSやCDMAなどの基準時刻に同期する特別に正確な時刻を持つマスターです。

プロトコルのメッセージには、マスター Clock Syncメッセージ、マスター Clock Delay Responseメッセージ、およびスレーブClock Delay requestメッセージがあります。これらのメッセージに加えて、Best マスター Clock(BMC)アルゴリズムが、複数のマスターからその中からネットワークに最も適したクロックを選出利用することを可能にします。

LANにおける時刻同期には少なくとも1台のマスターと1台のスレーブが必要です。複数のスレーブが1台のマスターに同期することもできます。マスタークロックは同期メッセージを送信し、スレーブはそれを利用して自身の時刻を修正します。精密なタイムスタンプを持つメッセージがマスターとスレーブのクロックの間でやり取りされます。このタイムスタンプから、スレーブをマスターに同期させるのに必要となるネットワーク遅延を計算します。通常、マスターから2秒毎に、スレーブからは約1分に1回程度の頻度でDelay Requestメッセージが送られます。

4種類のタイムスタンプがマスターとスレーブクロックの間でやり取りされ、それぞれT1、T2、T3、T4と呼ばれます(図1 参照)。これらのタイムスタンプはスレーブのオフセット計算に必要なものです。

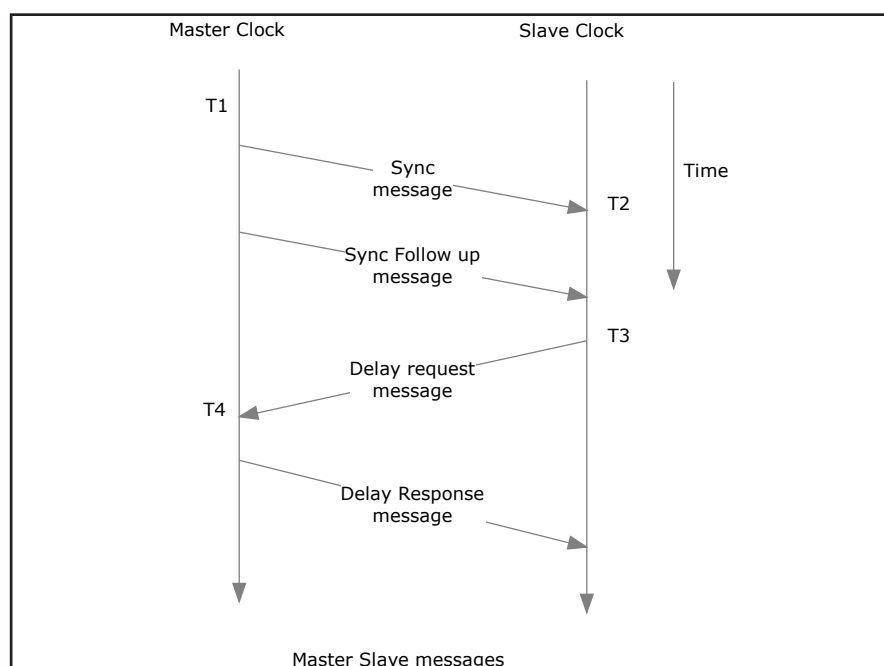


図 1. PTP タイムスタンプ (T1 - T4)

マスターからスレーブと、スレーブからマスターへの2つの経路について時間差を計算する必要があります。まずマスターからスレーブへの経路について時刻の差を算出します:

最初のタイムスタンプはT1です。マスターがSyncメッセージを送信した正確な時刻であり、Syncメッセージがイーサネットポート上に送られた時刻をT1としてfollow-upメッセージでスレーブに送ります。

2番目のタイムスタンプはT2です。スレーブがSyncメッセージを受け取った正確な時刻です。

T1とT2からマスターからスレーブの経路で見た時刻差を計算できます:

$$\text{マスターからスレーブへの差} = T2 - T1$$

次いで、スレーブからマスターへの経路の計算をします:

3番目のタイムスタンプはT3です。スレーブからのDelay Requestメッセージを送った精密な時刻です。4番目のタイムスタンプはT4であり、マスターがDelay Requestメッセージを受け取った精密な時刻です。T4はDelay Responseメッセージでスレーブに伝えられます。

スレーブがT3とT4を知ると、スレーブからマスターの経路で見た時刻差が計算できます。

$$\text{スレーブからマスターへの差} = T4 - T3$$

マスターからスレーブへの差およびスレーブからマスターへの差をスレーブが知ると、一方方向遅延時間が計算できます:

$$\text{一方方向遅延} = (\text{マスターからスレーブへの差} + \text{スレーブからマスターへの差}) / 2$$

以下のオフセットがスレーブクロックの修正に使われます:

オフセット = マスターからスレーブへの差から一方方向遅延を引き算したもの
あるいは
オフセット = $((T2 - T1) - (T4 - T3)) / 2$

したがって、ネットワーク伝送遅延が一定であり、温度など運用条件は徐々に変化すると仮定した場合に、本アルゴリズムに関して以下の記述が正しいと言えます:

スレーブクロックは、マスタークロックと同じ時刻になるよう自身を調整するのにオフセットを利用します。通常、スレーブクロックはオフセットに影響を与えるネットワーク伝搬遅延と、スレーブクロックの水晶発振子の温度特性と発振子の安定性へのエージング効果を考慮したクロックチューニングアルゴリズムを使用します。

PTPの実装

IEEE-1588プロトコルは、マスターやスレーブへどのようにPTPを実装すべきかを定義していません。以下は、これまで採用されたいくつかの方法の説明です。

ソフトウェアのみによる実装

マスターとスレーブをソフトウェアのみによって実装します。具体的には、普通のPCなどのPTP専用のハードウェアを持たないコンピュータ上でPTPソフトウェアデーモンを実行します。マスターは高安定なハードウェアクロックを持ちませんから、スレーブのPTPデーモンは自身の発振器ドリフトとマスターの発振器ドリフトの両方を補正しなければなりません。これは時刻同期精度を悪化させます。マスターとスレーブはおおよそ10から100マイクロ秒の精度で同期します。UTCに準じた時刻は得られません。

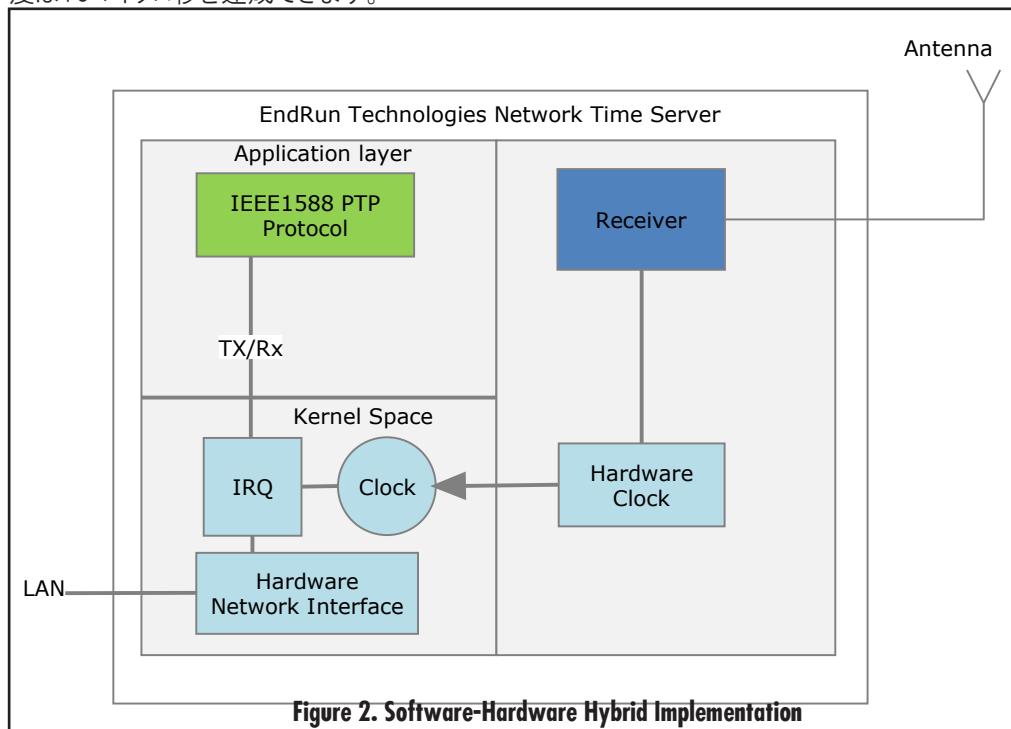
ハードウェアによる実装

共にハードウェアタイムスタンプ機能を持つマスターとスレーブ、それにPTPデーモンソフトウェアの組み合わせにより1マイクロ秒以下の同期精度を提供し、OSやネットワーク負荷の影響を受けません。このような高い精度の同期を実現するにはマスターは高い安定度を持つハードウェアクロックを備えて、マスターもスレーブもハードウェアタイムスタンプ機能を備えていなければなりません。PTPに対応したネットワークスイッチを使った場合は10から100ナノ秒の精度の同期が可能となり、普通のネットワークスイッチを使用した場合は10マイクロ秒程度の同期精度となります。マスターがGPS時刻に同期する機能を持っていれば、UTCに準じた時刻を得ることができます。

ハイブリッド実装

EndRunのIEEE-1588グランドマスタークロック(図2参照)にはハイブリッドアーキテクチャが採用されています。PTPソフトウェアデーモンをGPSやCDMAに正確に同期するハードウェアクロックと組み合わせることで、UTCに準じた時刻を提供します。このハードウェアクロックはOSのクロックにも結合されており、発振周波数のドリフトを防ぎ、安定度を向上させます(PTPの分散の改善)。ソフトウェアタイムスタンプはカーネルレベルの割り込み要求(IRQ)でトリガされます。この利点は、PTP、NTP、HTTPといったアプリケーションレイヤーがカーネルスペースのタイムスタンプにまったく影響を与えないことです。

ハイブリッドグランドマスターの優位性は、ハードウェアクロックの利点を持ちつつ、既存のコンピュータとネットワークスイッチを手軽に利用できることにあります。すなわち 特別なスレーブやPTPを備えたネットワークスイッチを必要としません。それでいて、マスターとスレーブの同期精度は10マイクロ秒を達成できます。



時刻精度

PTP スレーブの得られる時刻精度は、マスターの時刻精度とネットワークアーキテクチャ、PTPの実装方法とスレーブの性能に依存します。例えば、スイッチ一台の小規模なLANは、複数のスイッチやルーターやハブやワイヤレスアクセスポイントを持つ複雑なネットワークに比べて高水準の同期が得られます。

代表的な計測方法

以下にPTP マスターに同期するPTP スレーブの同期精度を測定する2つの方法を示します。いずれの方法にも短所があります。

1. スレーブ上で収集される統計的情報は同期能力を理解するための簡単な手段ではありますが、スレーブクロックの実際の時刻精度を示すものではありません。
2. タイムインターバルカウンターやオシロスコープなどの測定器を使ってスレーブとマスターを比較する方法は、スレーブとマスター双方が1PPSパルスを出力できるのであれば有効な方法です(図3参照)。この方法では、1PPSパルスの時間差を測定します。有意な方法ではありますが、時刻の情報が欠けているために秒単位の誤差を見逃すかもしれません。

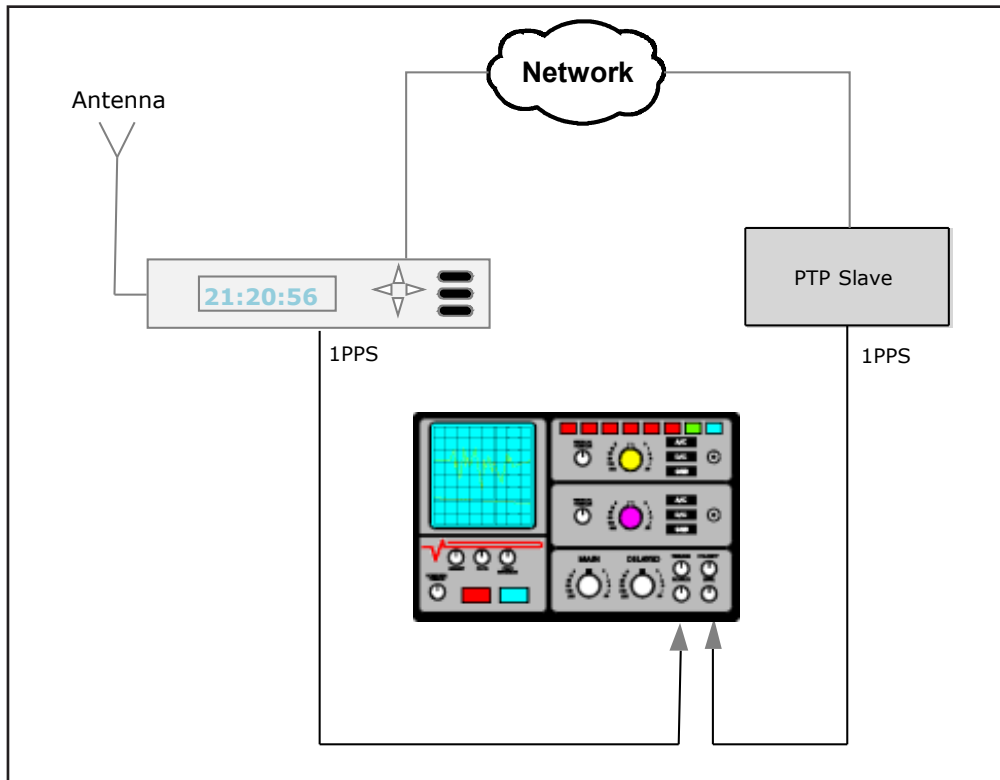


図 3. SlaveとMasterを比較する一般的な測定方法

EndRunのPTP時刻同期精度測定法

PTPシステムの時刻同期精度を試験するために、PTPスレーブの時刻の精度を絶対時刻標準と比較する計測方法を開発しました。これにより、一般的な方法にある問題を排除することができます。

PTPスレーブ計測デバイス

GPS受信機とハードウェアクロックによる時刻標準を備えたPTP スレーブクロックを設計しました。時刻比較レジスタを使うことで、PTPスレーブクロックをハードウェアクロックと何日間にも渡りナノ秒単位で比較できます。この時刻比較レジスタによって得られた結果は16秒毎にその時刻と共に記録されました。そのデータはシステム上(図4参照)に記録され、後ほど精度と安定度を検証するために取り出されました。

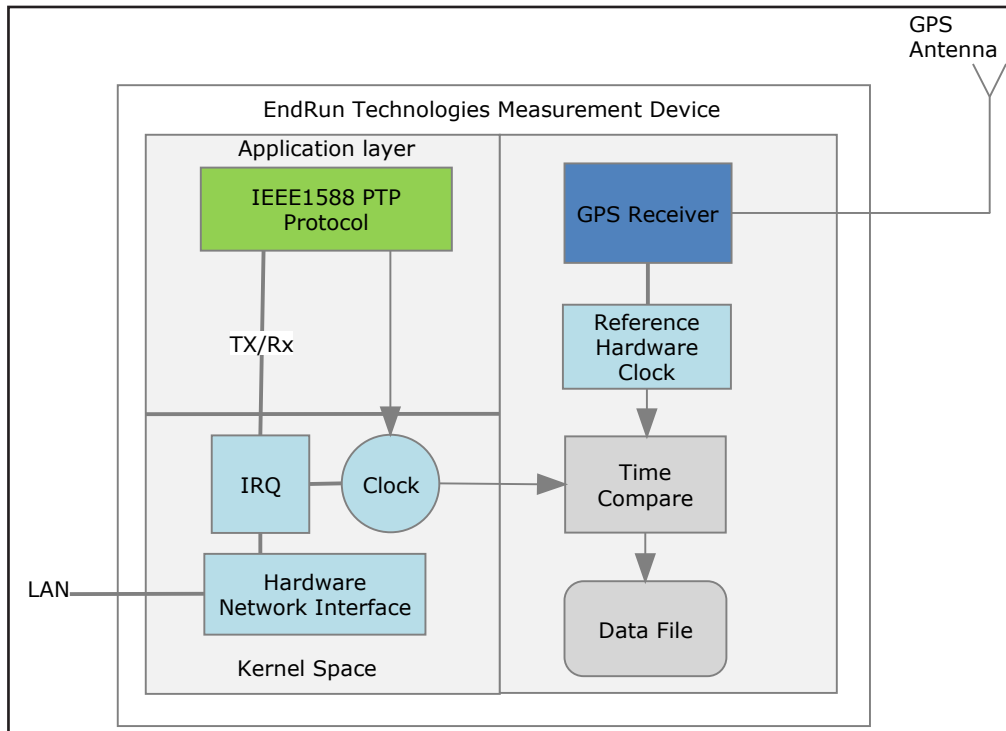


Figure 4. Special PTP Slave Measurement Device

GPSマスターとCDMAマスターによる2つの試験構成

この試験に用いたネットワークは、グランドマスタークロック、ネットワーク機器、PTPスレーブ計測機器(図5参照)から構成されています。違いをはっきりさせるために、GPSとCDMAのマスターの構成を別々に示しました(図6と7)。GPSマスターの構成では、グランドマスタークロックもスレーブクロックもGPSを基準とし、それぞれのGPSアンテナは2mの距離に隣接して置かれています。CDMAマスターの構成では、グランドマスタークロックはCDMA基地局を中継してGPSに同期しますので、そこで不確定なオフセットが発生します。いずれの場合もPTPグランドマスタークロックは2秒毎に同期フレームを送信します。このネットワークには日常的な数々のトラフィックが流れており、データは24時間以上収集されました。

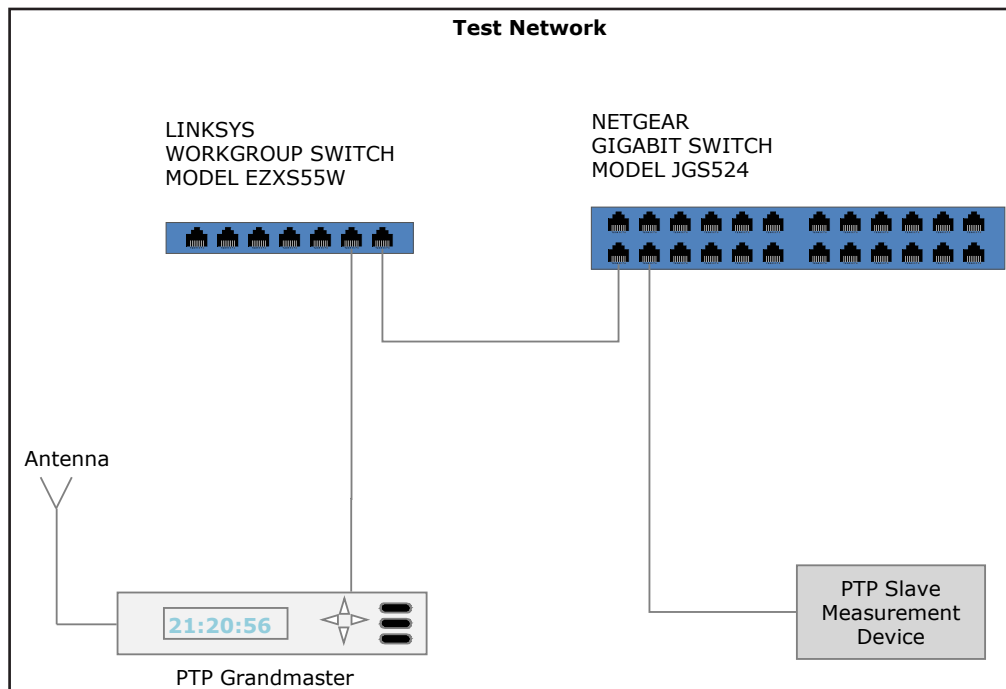


図 5. EndRunの試験用ネットワーク構成

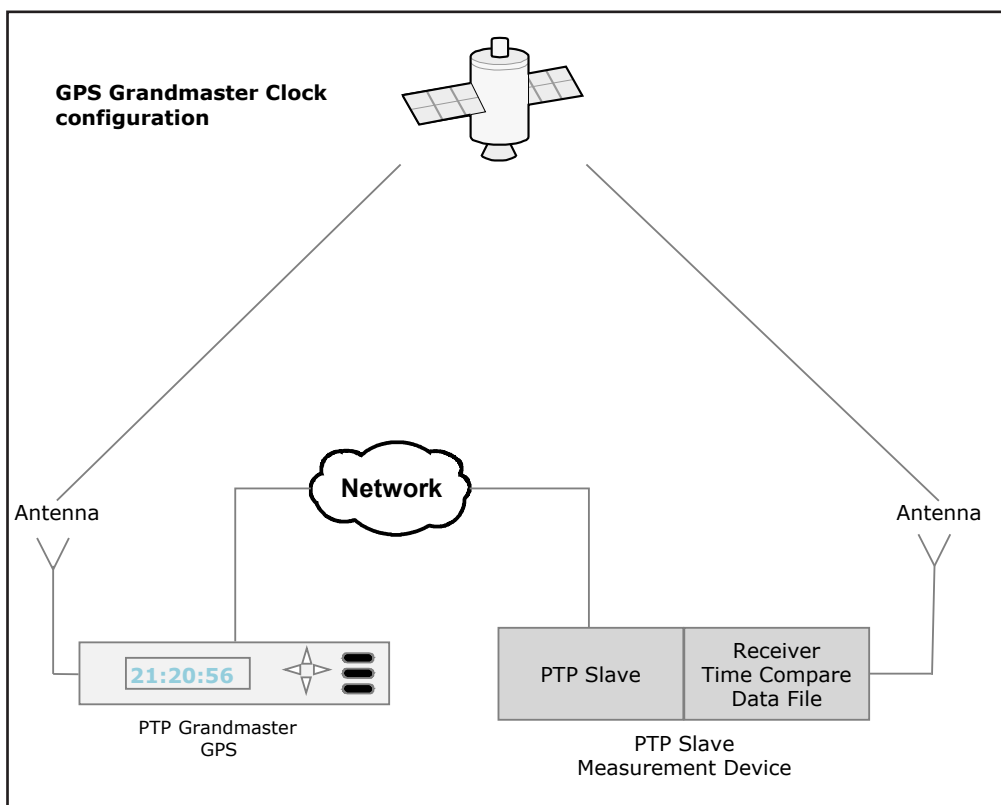


図 6. EndRun GPS Grandmaster による試験

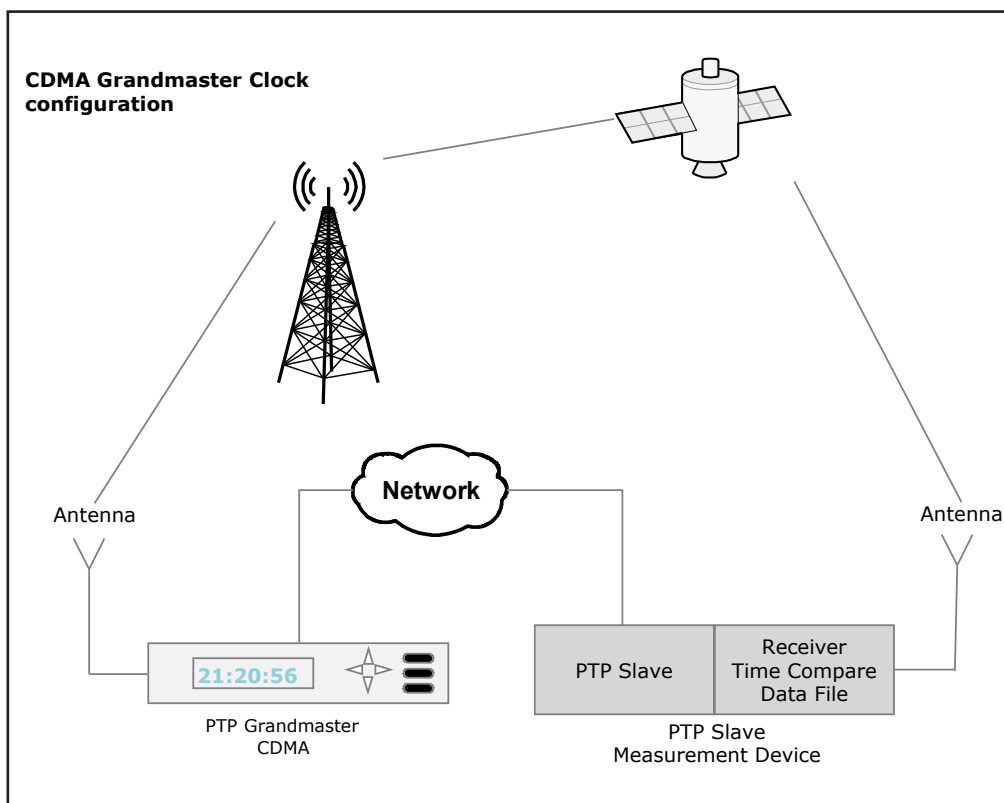


図 7. EndRun CDMA Grandmasterによる試験

計測結果の解析

この時刻同期の解析は、GPSないしCDMAを基準としたグランドマスタークロックと、パケット伝搬遅延の変化 (PVD = Packet Delay Variation)とスレーブクロックからなる系全体に対して行われたものです。

変動の最大の要因はネットワークによる影響、すなわちPDVです。この場合には、PDVはグランドマスターからスレーブに送られるパケット遅延のパケットごとのばらつきを意味します。PDVは実質ネットワークスイッチ内での送信待ち時間のばらつきであり、これはネットワークトラフィックの影響を受けます。

次の図は、GPSグランドマスターに対するPTPスレーブのオフセット(図 8)とGPS グランドマスターに同期したPTP スレーブのヒストグラム(図 9)です。GPS時刻とスレーブを比較したところ、同期精度は5.24マイクロ秒RMSであり、1マイクロ秒平均のオフセットを伴っていました。

図 10と図 11はCDMAランドマスターにおけるPTP スレーブのオフセットと、CDMAグランドマスターに同期したPTP スレーブのヒストグラムです。GPS時刻と測定したスレーブを比較したところ、同期精度は9.72マイクロ秒RMSで-8.47マイクロ秒平均のオフセットを伴っていました。このオフセットはCDMA基地局との距離による伝搬遅延により生じたもので、GPS グランドマスターには見られないものです。

結論

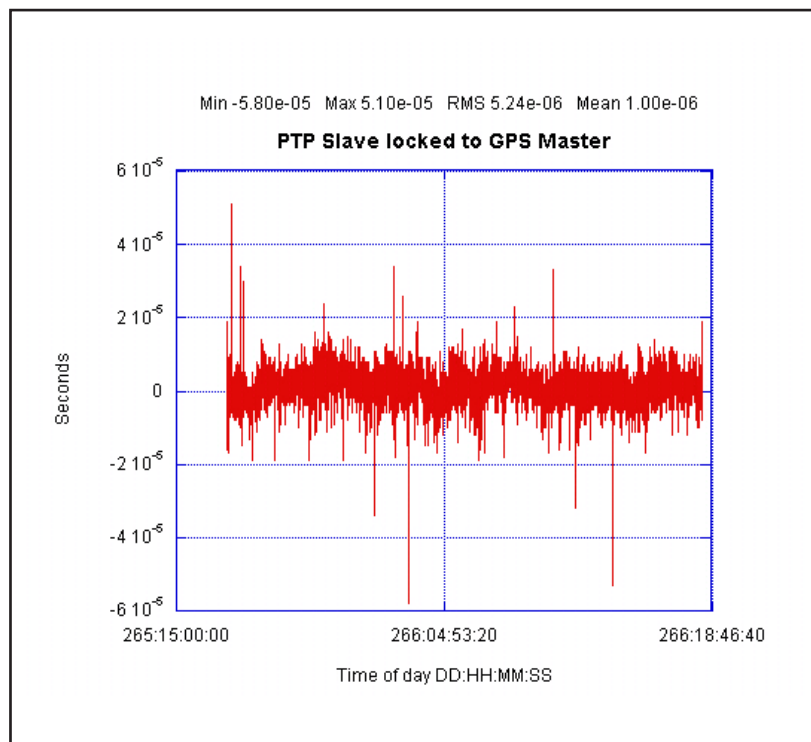


図 8. GPS Masterに同期したPTP Slave

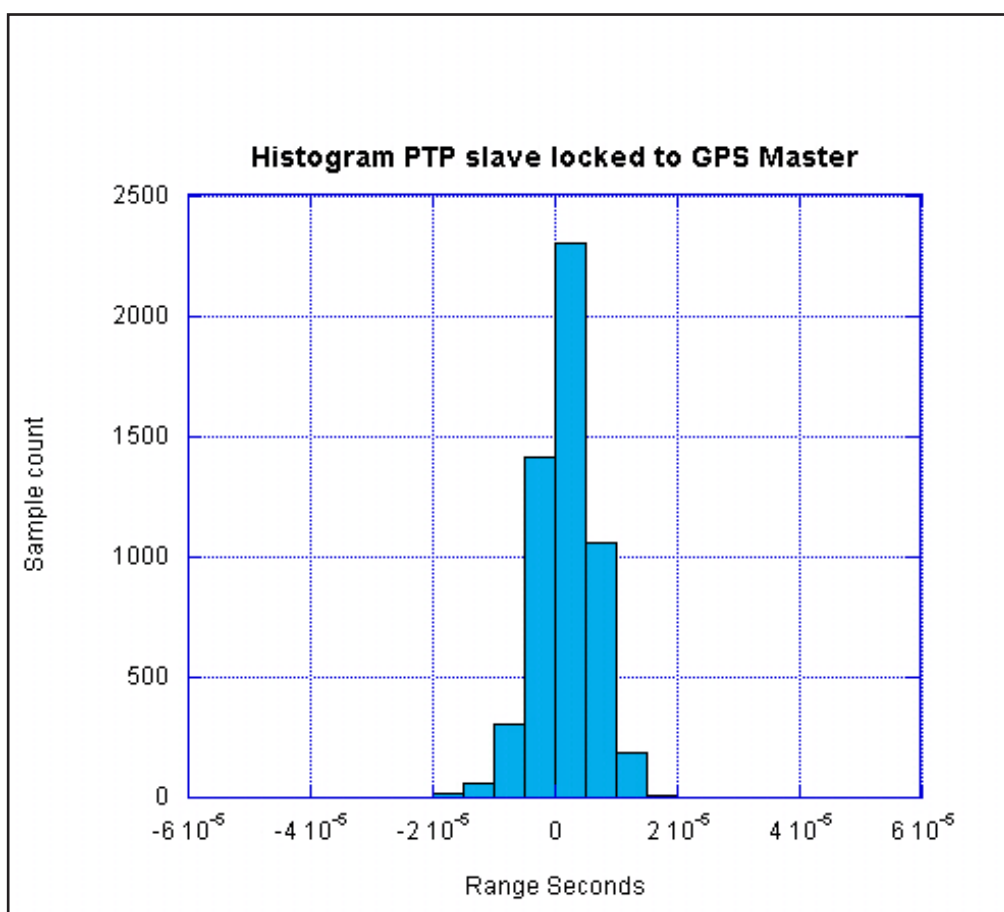


図 9. GPS Masterに同期したPTP Slave

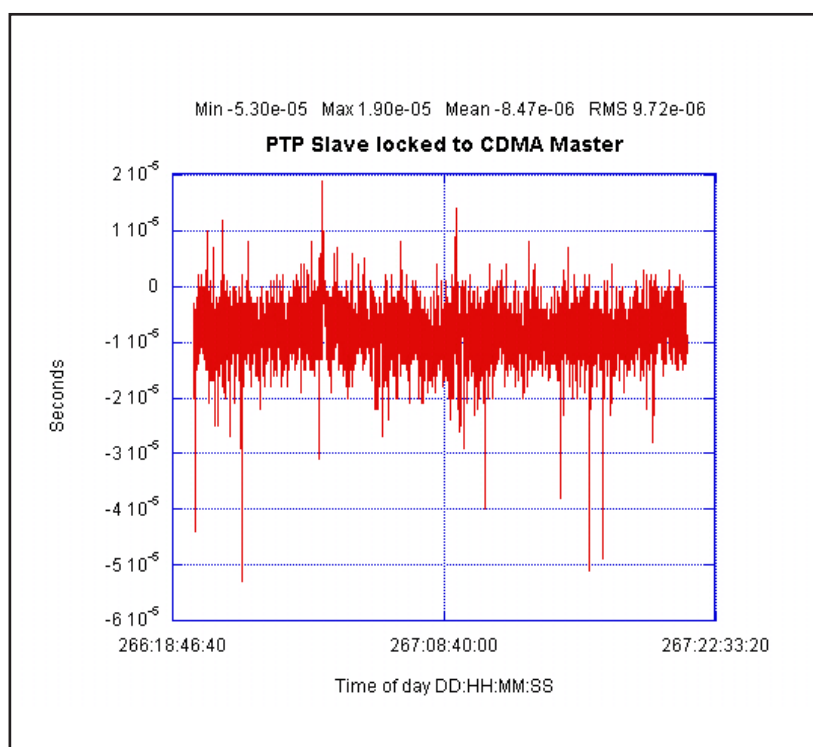


図 10. CDMA Masterに同期したPTP Slave

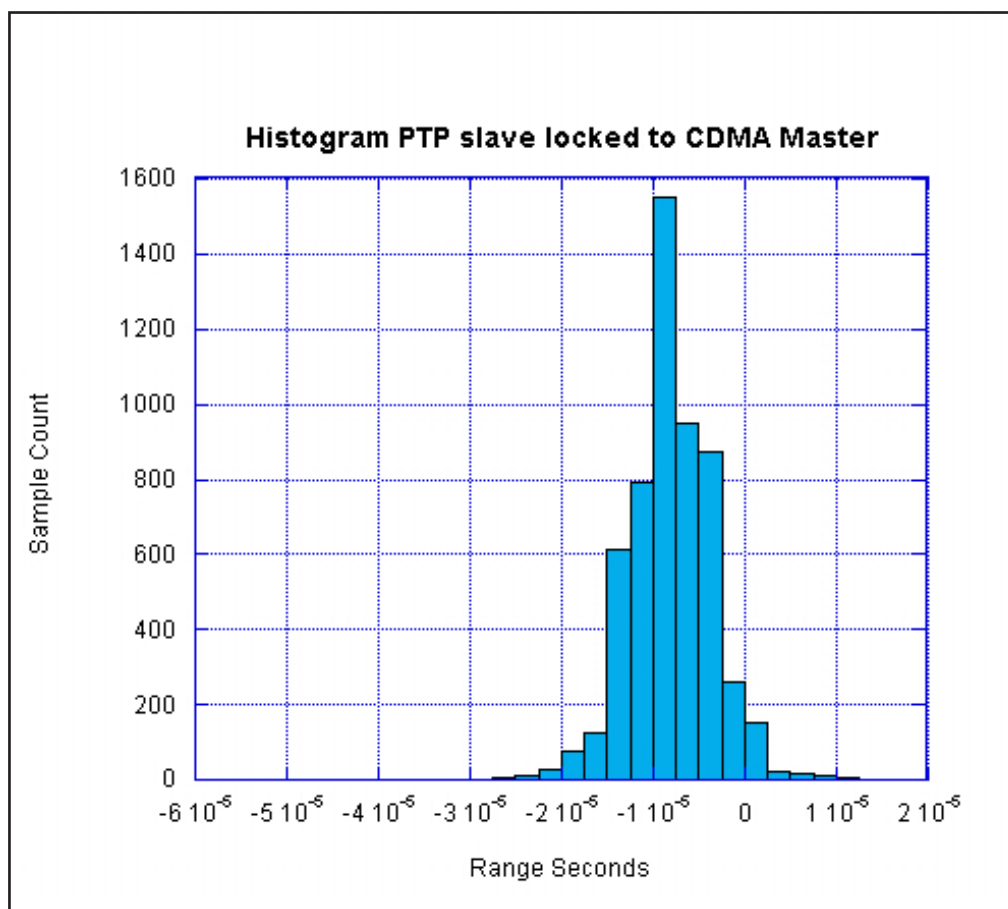
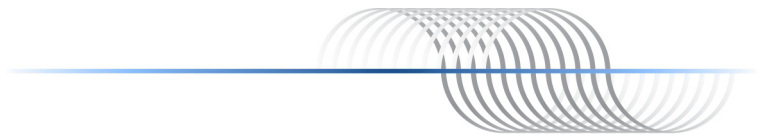


図 11. CDMA Masterに同期したPTP Slaveのヒストグラム

同じLAN上においても、PTPは従来の時刻同期手順であるNTPに比較してはるかに優れた時刻同期を提供します。EndrunのGPSとCDMAグランドマスタークロックは、PTPをサポートする特別なハードウェアを持たない既存のネットワークにおいても10マイクロ秒RMS以下の同期精度を達成できます。また、EndRunのタイムサーバーは、ハイブリッドソリューションによりUTCに対して1マイクロ秒以内のタイムスタンプ精度を提供します。



EndRun
TECHNOLOGIES
"Smarter Timing Solutions"

Santa Rosa, CA, USA
1-877-749-3878 or 707-573-8633
sales@endruntechnologies.com
www.endruntechnologies.com

161206
お問い合わせは
株式会社 昌新 情報システム営業部
東京都中央区日本橋本町1-9-13
Tel. 03-3270-5925 IS@shoshin.co.jp
<http://www.shoshin.co.jp/c/endrun>