



NTPハードウェア実装 (HwNTP) を用いた IP網クロック配信技術

NTT未来ねっと研究所

やまだ よしあき ひさどめ けんじ てしま みつひろ いしだ おさむ
山田 義朗 / 久留 賢治 / 手島 光啓 / 石田 修

IP網で正確な周波数や時刻を配信するため、時刻同期プロトコルNTPをハードウェア実装したHwNTP技術を開発しました。HwNTPを使えば、1msのジッタがあるネットワークでも1 μ s以内の同期精度が実現できます。本技術は、デジタル光ファイバ無線・超高速並列伝送・映像伝送等への応用が期待されます。

IP網におけるクロックの必要性

現在、同期多重技術に基づく従来のネットワークから、インターネットやNGN (Next Generation Network) といったIPに基づくネットワークへの転換が進展しつつあります。IP網では情報をパケット単位で転送するので、従来の同期網のような高精度な基準クロックは不要です。しかし、アプリケーションによっては高精度クロックが必要になる場合があります。例えば、デジタル光ファイバ無線では、時刻同期精度1 μ s以内の高精度クロックが必要です⁽¹⁾。

クロック配信技術の比較

そのような高精度クロックを配信するためには、どのような手段が考えられるでしょうか？

電波時計に用いられているJJYやカーナビゲーションなどに用いられているGPS (Global Positioning System) などの標準電波を受信できれば、1 μ s以内の高精度な基準クロックを得ることが可能です。しかし、そのためにはアンテナ設置などの工事等が必要となります。特に、高層ビルの多い大都市圏では電波の見晴らしが良くない場所が多いので、常時安定した電波受信環境を得るのは簡単ではありません。

これに対し、ネットワークで時刻同期を行うことで基準クロックを供給するこ

ともできます。例えば、LANの世界ではイーサネットを用いた時刻同期プロトコルであるPTP (Precision Time Protocol) がIEEE1588規格として標準化されています。PTPは実装の仕方によっては1 μ s以内の高い同期精度を得ることができますが、現時点における適用領域は、工場内LANや家庭内AV用LAN (IEEE802.1as) のような比較的小規模なネットワークに限られています。

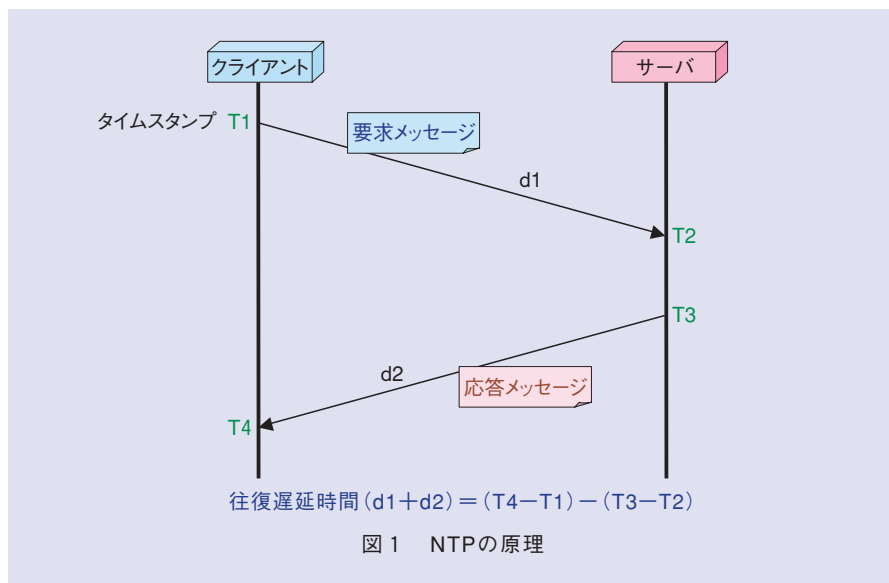
IP網で汎用的に使える時刻同期プロトコルとしては、NTP (Network Time Protocol)⁽²⁾ あるいはその簡易版であるSNTP (Simple Network Time Protocol)⁽³⁾ が広く普及しています。NTP (以下、SNTPも含めてこ

う呼びます) を使えば、通常のPCの時計合わせやe-文書サービスなどには十分な精度が得られますが、100 μ s以内の高精度を得るのは困難です。

NTT未来ねっと研究所では、従来のNTPで高い同期精度が得られない原因を検討し、NTPの汎用性を生かしつつ1 μ s以内の高精度なクロック配信を可能とするNTPハードウェア実装 (HwNTP: Hardware-implemented NTP) 技術を開発しました⁽⁴⁾。

NTPの原理とハードウェア実装のメリット

図1によってNTPの原理を簡単に説明しましょう。NTPクライアントはNTP



サーバに対して時刻同期を行うための要求メッセージを送信し、この要求メッセージを受信したNTPサーバはNTPクライアントに応答メッセージを返信します。このNTPメッセージ交換により、NTPクライアントは、要求メッセージの送信タイムスタンプ (T1) ・受信タイムスタンプ (T2) と応答メッセージの送信タイムスタンプ (T3) ・受信タイムスタンプ (T4) を知ることができます。NTPクライアントは、この4種類のタイムスタンプに基づいてメッセージの往復遅延時間を計算します。往復遅延時間は要求メッセージの遅延時間 (d1) と応答メッセージの遅延時間 (d2) の和なので、それぞれの片道遅延時間が等しいならば往復遅延時間の半分になるはずですが、したがって、応答メッセージの送信タイムスタンプ (T3) を片道遅延時間 (d2) だけ遅らせた時刻にNTPクライアントの時刻を合わせれば、時刻同期が確立します。

NTPの同期精度を劣化させる要因として大きく2点が挙げられます。第1の要因はタイムスタンプの誤差、第2の要因は片道遅延時間の変動です。

通常のNTPはソフトウェアとして実装されています。NTPメッセージを送信するとき、NTPソフトウェアはローカルクロックのタイムスタンプを読み込んでNTPメッセージに書き込み、UDP/IP/MACの各レイヤの処理を行い、ネットワークインタフェースからメッセージを送信します。以上の各プロセスの間に、OSの割込みなどにより誤差が蓄積してしまいます。NTPメッセージを受信するときも同様です。これに対し、HwNTPではすべてのプロセスが極めて小さい遅延時間でハードウェア処理されるので、タイムスタンプの誤差がほとんど蓄積しません。こうして、NTPの同期精度劣化の第1の要因が除かれます。

前記の説明では「それぞれの片道遅延時間が等しい」と仮定しましたが、実際のIP網ではこの仮定が成立する保証はありません。片道遅延時間の誤差については、ネットワークの経路自体の差、トラヒックの多寡によるスイッチやルータにおける輻輳状況など、多くの原因が考えられます。それらの影響を正確に見積るのは非常に困難です。数回の試行の中から最小遅延時間のNTPメッセージだけを選択してローカルクロックの制御に用いるといったフィルタリング機能を実装している例もありますが、経路切替によって片道遅延時間が変動すると、それに引きずられて同期精度が劣化することを防ぐことはできません。これに対し、

HwNTPでは、多数のNTPメッセージを統計処理して片道遅延時間の変動の影響を除去する手法を適用することにより、NTPの同期精度劣化の第2の要因を除きました。統計処理を行うため、NTPクライアントとNTPサーバとの間で多数のNTPメッセージを交換する必要がありますので、この点でもハードウェア実装によるスループットの向上は有効です。

HwNTP装置の概要

以上の検討に基づいて、NTPメッセージ処理機能やローカルクロック制御機能などをハードウェア実装した2種類のHwNTP装置を試作しました。1つは「HwNTPアプライアンス」で、単体の



図2 HwNTPアプライアンスの外観

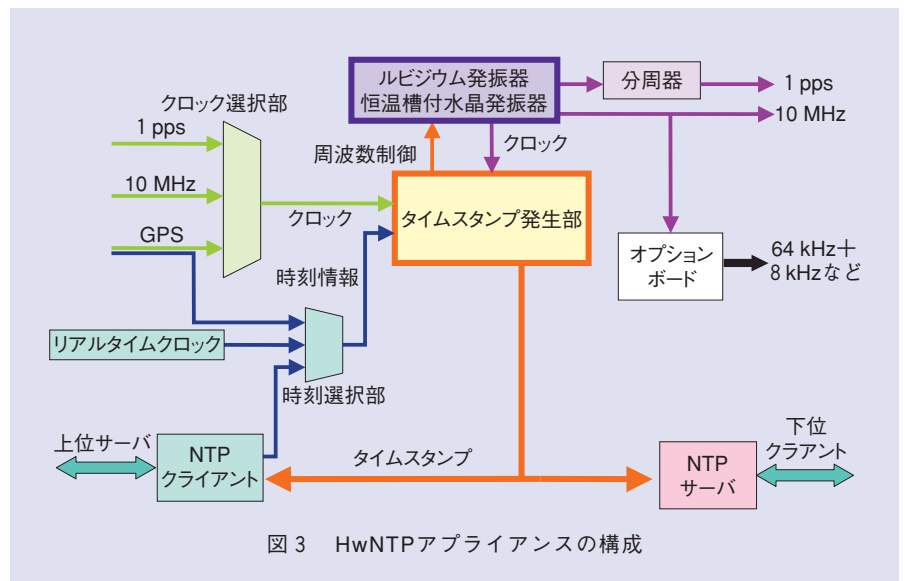


図3 HwNTPアプライアンスの構成

NTPサーバとして使用できるように設計されています。もう1つは「HwNTPモジュール」で、他の機器に組み込んで使用することを想定して設計されています。これらのHwNTP装置で用いられているNTPメッセージのフォーマットは標準的なNTPと完全互換なので、一般（ソフトウェア実装）のNTPサーバ・クライアントとも接続可能です。

HwNTPアプライアンスの外観を図2に、構成を図3に示します。GPSや外部の基準信号源（セシウム周波数標準器など）を接続することもできますし、他の上位サーバに同期させることもできます。基準信号源などに障害が発生したときのことを考慮し、ホールドオーバ（基準信号源から独立した状態でも周波数精度を維持したまま発振する）特性に優れたルビジウム発振器あるいは恒温槽付水晶発振器を搭載しています。出力は10 MHzおよび1 ppsを標準として備えているほか、オプションボードを追加すれば64 kHz+8 kHzなどを出力することも可能になります。ネットワークインタフェースとしてはギガビットイーサネット（1000Base-X）を4ポート搭載しています。装置全体は19インチ1

ユニットの筐体に収容されており、AC100 Vで動作します。

次にHwNTPモジュールの外観を図4に示します。HwNTPモジュールは機器組込み用を想定しているため、必要最小限の機能だけに限定して小型化しています。ネットワークインタフェースに関しては1000Base-Xを2ポート搭載したタイプと、ネットワークインタフェースを搭載しないタイプ（GMIIでNTPメッセージの送受信を行います）の2種類があります。前者は9 cm×7 cm、後者は5 cm×7 cmの基盤に実装されてお

り、両タイプともDC3.3 Vおよび1.8 Vで動作します。

HwNTP装置の同期特性

ハードウェア実装の効果を確認するため、HwNTP装置のタイムスタンプ自体の揺らぎを測定したところ、 $\sigma=3.6$ nsの値が得られました。ソフトウェアベースの市販NTPサーバでは $\sigma=1\,600$ nsだったので、ハードウェア実装によってタイムスタンプ自体の誤差が400分の1以下に低減されていることが確認できました（図5）。

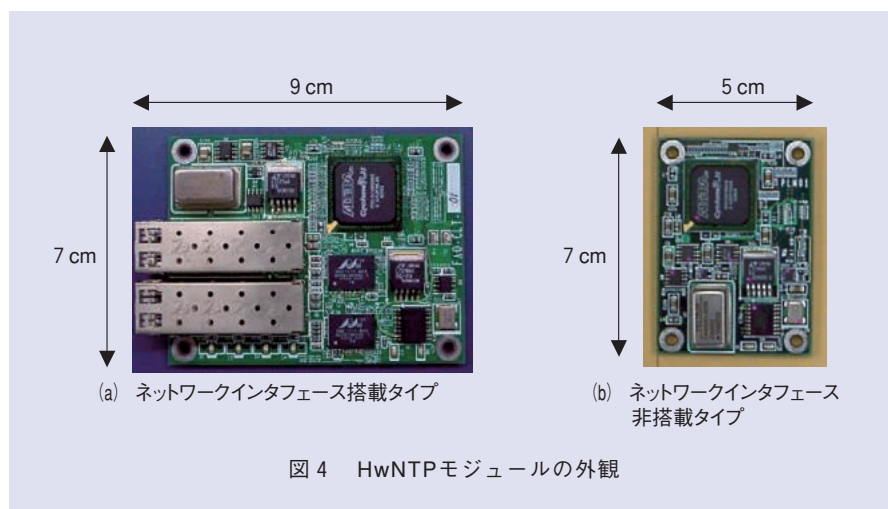


図4 HwNTPモジュールの外観

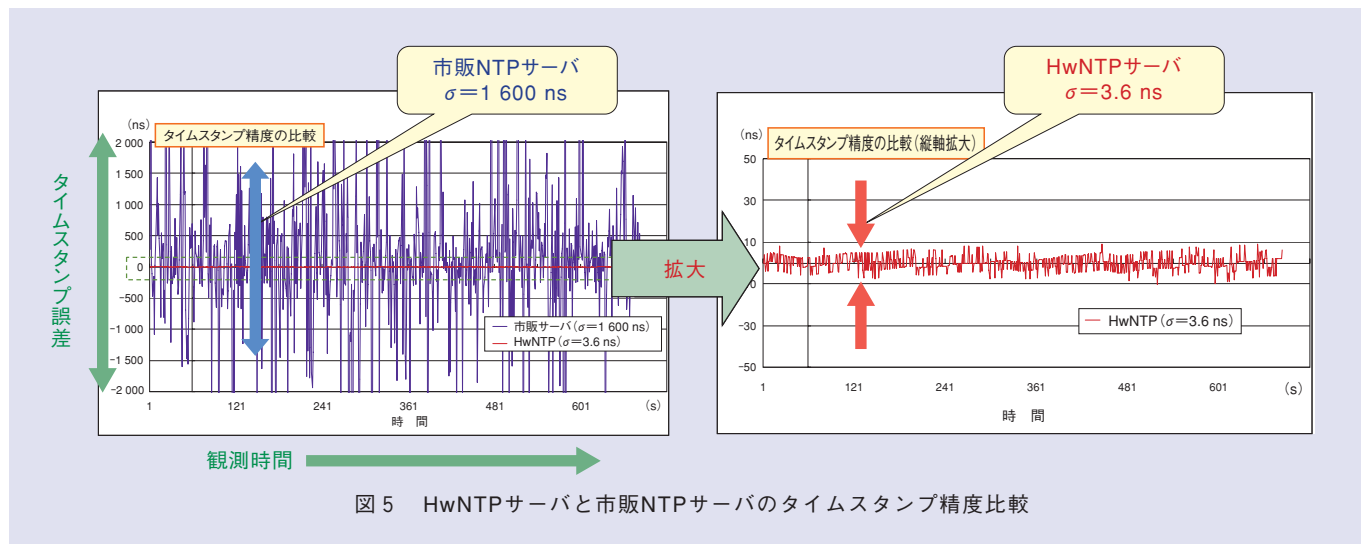


図5 HwNTPサーバと市販NTPサーバのタイムスタンプ精度比較

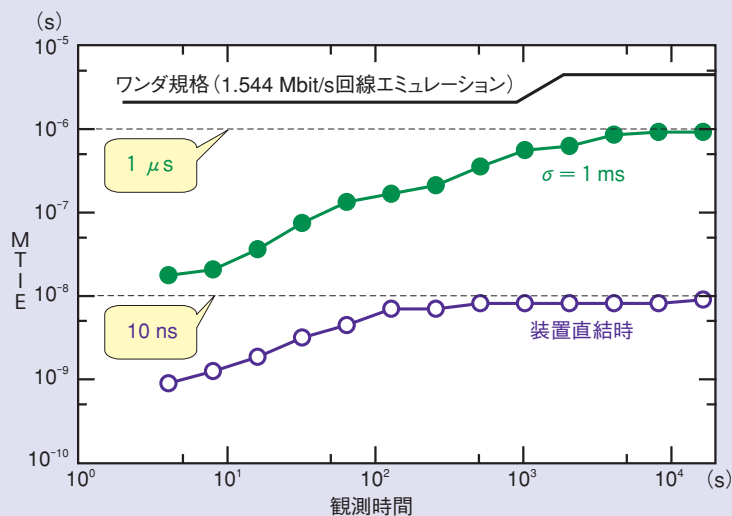


図6 HwNTP装置の同期精度

次に2台のHwNTP装置を同期させて、その時刻差をタイムインターバルカウンタによって測定しました。HwNTP装置間を直結した場合および装置間ネットワークエミュレータを挿入して $\sigma = 1 \text{ ms}$ のジッタを与えた場合の最大位相変動 (MTIE: Maximum Time Interval Error) を図6に示します。参考として、ITU-T G.8261/Y.1361⁽⁵⁾に規定されている回線エミュレーションサービスの1.544 Mbit/sインタフェースに対するワンダ規格も同図に示しました。 $\sigma = 1 \text{ ms}$ のジッタを与えた場合のMTIEは元のジッタの1000分の1の1 μs 以内になっていることが分かります。

今後の予定

(1) デジタル光ファイバ無線

NTT未来ねっと研究所で研究を進めている広域ユビキタスネットワークでは、遍在する無線端末を収容するために、半径数kmの無線セルに複数のアンテナを配置し、デジタル光ファイバ無線により高感度なサイトダイバーシティを実現する基地局構成を用いることを検討していま

す。その際に必要となるアンテナ間の周波数およびサンプリング時刻同期に、HwNTPの高精度同期技術を活用しています⁽¹⁾。

(2) 超高速並列伝送

NTT未来ねっと研究所では将来のネットワークの基盤技術となるテラビットLAN⁽⁶⁾の要素技術の1つとして、複数のリンクを束ねることにより仮想的な超高速リンクを実現する超高速並列伝送技術を研究しています。1つのデータフローを複数のリンクで並列伝送した場合、リンクごとに物理的経路やスイッチにおける待ち時間が異なり、受信側でフレームの順序が維持できなくなる事態も起こり得ます。この問題を解決するためにHwNTPによる時刻同期を用いて各フレームにタイムスタンプを付けて遅延補正する方式を提案しています。

(3) 映像伝送

H.264/AVCのような高圧縮符号化技術の進展により、高品質の映像を低コストで伝送できるようになりました。しかし、素材伝送のような分野では低遅延の非圧縮伝送に対する需要も少なくあり

ません⁽⁷⁾。HwNTPで送受信局間の周波数同期をとることにより、少ないバッファで低遅延の映像伝送がIP網でも可能になると期待できます。

参考文献

- (1) 桑野・鈴木・山田・渡邊：“広域ユビキタスネットワーク用デジタル光ファイバ無線技術,” 信学技報, OCS, Vol.107, No.343, pp.27-32, 2007.11.
- (2) D. L. Mills: “Network time protocol (version 3) specification, implementation and analysis,” IETF, RFC 1305, 1992.3.
- (3) D. L. Mills: “Simple network time protocol (SNTP) version 4 for IPv4, IPv6 and OSI,” IETF, RFC 2030, 1996.10.
- (4) 山田・小林・久留・手島・石田：“NTPハードウェア実装を用いたクロック配信技術,” 信学技報, OCS, Vol.107, No.343, pp.21-26, 2007.11.
- (5) ITU-T G.8261/Y.1361, “Timing and synchronization aspects in packet networks,” 2006.3.
- (6) O.Ishida: “40GbE, 100GbE, and Terabit LAN Challenges,” 3rd FON, OECC/IOOC 2007, July 2007.
- (7) 川崎・手島：“次期映像伝送アーキテクチャの開発,” ビジネスコミュニケーション, Vol.43, No.1, 2006.



(左から) 手島 光啓/ 山田 義朗/
久留 賢治/ 石田 修

高精度な時刻・周波数を活かした新たなアプリケーション・サービスの研究開発を進めていきます。

◆問い合わせ先

NTT未来ねっと研究所
メディアイノベーション研究部
TEL 046-859-2469
FAX 046-859-8585
E-mail yamada.yoshiaki@lab.ntt.co.jp