

NTP を用いた追跡可能な時刻配送システムの設計

福田晴元, 桂木真一郎, 石本英隆, 小野諭
NTT 情報流通プラットフォーム研究所

時刻認証サービスでは, 電子商取引や各種電子申請ではデジタルドキュメントに対して時刻認証を実施することにより, ドキュメントの内容が, 認証を実施した時刻より改竄されていないことを証明する. 時刻認証されたドキュメントのタイムスタンプには, 時刻トレーサビリティと呼ぶ, Time Stamp Authority (TSA)が時刻同期した先の National Time Authority (NTA) への経路情報と, その NTA が管理する時刻と利用したタイムスタンプの時刻誤差情報が要求される. 本稿では, 時刻トレーサビリティを実現する, タイムスタンプに利用した時刻について追跡可能な時刻配送システムの設計について述べる.

A Design of Time Synchronized and Time Traceable Network using NTP

Harumoto Fukuda, Shinichiro Katsuragi, Hidetaka Ishimoto and Satoshi Ono
NTT Information Sharing Platform Laboratories

Time-stamping service can provide the certifications that show the digital-documents are not alternated. The business dealing and public application on the network use this service for keeping the reliability of all digital-documents. The time-stamp of the service requires time traceability. The time traceability has two important integrant. One is the route information that shows the time is supplied from National Time Authority (NTP) to Time Stamp Authority (TSA). The other is the time difference information that shows the time difference between NTA and TSA. In this paper, we propose a design of a time-synchronized network using Network Time Protocol (NTP) that can provide the time traceability information.

1 はじめに

インターネットの普及にとともに, 電子文書を利用した電子申請や電子商取引が活発となってきた. このため, 電子文書の正当性を保証する電子署名システムの利用が始まっている. 現在は, 電子署名に加えて, 電子文書にタイムスタンプを付与する時刻認証により, 文書名義人や文書内容が改竄されていないことを証明するシステムが提案されている. 今後, 公的機関による電子文書の利用が進むにつれ, 時刻認証を用いた公証機能を持つシステムが普及すると考えられる.

電子文書の非改竄を証明する時刻認証は, Time Stamp Authority (TSA)と呼ばれる機関により実施される. TSA が時刻認証のために利用するタイムスタンプとして, National Time Authority (NTA)が管理する標準時刻である Coordinated Universal Time (UTC)を利用する. 一つの NTA が TSA に直接時刻を供給する形態では, 時刻受信可能な TSA の数が限られる. このため, Time Authority (TA)と呼ぶ機関が, NTA から標準時刻を受信し, 多数の TSA へ時刻配送する形態がとられる.

TSA において, 時刻認証を行った電子文書の内容が数年後に問題となった際に, その電子文書が改竄されていないことを証明するためにタイムスタンプが利用される. この際には, タイムスタンプの正当性が, 以下の点より問われる[1].

- ・ 信頼できる時刻源から時刻を受信していた.
- ・ 利用時刻と利用時刻源との誤差が十分満足できる範囲であった.

電子文書が改竄されていないことを検証する際に, TSA は TA に対して, 上述の情報を提供することを要求する. 従って, TA では, NTA から TSA までの時刻配送経路を保証可能であり, かつ, NTP と TSA との時刻差が, TSA が要求する精度内であることを保証可能な方式で, 精度のよい時刻配送を実施する必要がある. また, 時刻配送に関する情報を長期保存し, 上述の情報提供が要求された際に, 要求を満足する内容の情報を開示する必要がある.

このように, TA には, NTA から受信した標準時刻を, 次の TA や多数の TSA へ配送するとともに, 標準時刻配送元である NTA を常に把握し, 指定 NTA から

の時刻配送を保証する必要がある。このため、TA では、TSA が要求する NTA から時刻を配送するとともに、指定 NTA からの配送が行われていることを常に監視する機能が必要となる。

次に、TSA が要求する精度内での時刻配送の保証が要求される。このため、TA では、配送した時刻を測定し、TSA が求める精度範囲内であることを常に監視する機能が必要となる。

本稿では、TA において必要とされる、時刻トレーサビリティと呼ぶ、NTA を特定する時刻配送経路情報と、その NTA が管理する時刻との誤差情報を提示可能な時刻配送システムについて述べる。

2 UTC への時刻同期システム

時刻を供給する方法として GPS (Global Positioning System) が利用されている。GPS システムを利用した場合には、各 GPS 衛星と NIST (National Institute of Standards and Technology) に対する誤差情報[2][3]や、日本における標準時刻である日本標準時(JST)との誤差情報[4]を得ることができる。これらの情報を利用して、GPS 機器の受信時刻に対するトレーサビリティ情報を提供することが考えられる。

しかし、この情報は、理想状態において GPS 受信機が動作した場合の誤差情報と考えられ、GPS 受信機が内蔵する発信器の性能や、衛星の捕捉状況、GPS 受信機の故障といった情報を含まない。このため、GPS 受信機が配送する時刻精度は、公開情報と異なる可能性がある。TSA が GPS 受信機より直接時刻情報を取得している場合には、受信時刻情報と実際にタイムスタンプとして利用した時刻精度とに大きな差異が発生する可能性がある。

GPS 受信機の保持する時刻は、NIST から供給されており、日本標準時とは異なる。TSA が日本標準時へのトレーサビリティを要求した場合には、GPS 受信機の時刻を利用できない。

GPS を利用する場合には、衛星を捕捉するためにアンテナを屋外に設置する。GPS が受信時刻の精度を保つためには、周りに高い建築物がないこと、また、将来に渡って建築物が建たないことが要求され、GPS 受信機設置場所が制約される。

以上のように、GPS 受信機では、数年以上での長期

間安定運用と、時刻トレーサビリティ情報の取得が困難であると考えられる。

日本標準時を受信する方法として、NTP (Network Time Protocol)[5]を用いた日本標準時供給システム[6]の利用が考えられる。このシステムを利用することにより、TSA は NTP のインタフェースを通じて日本標準時に同期可能となる。

NTP は、クライアントからサーバに対してパケットを往復させ、片道遅延時間が等しいとの仮定のもとに、サーバとクライアント間の時刻差を算出して時刻同期を行う。このため、片道遅延時間に差がある場合や、遅延変動が大きい場合には、時刻同期誤差が生じる。

インターネットでは、遅延変動を予測することは困難であり、往復経路の同一性は保証されない。このため、TSA が NTP により、インターネットを通して時刻同期を行った場合には、時刻同期精度を把握することは困難である。このため、時刻トレーサビリティに要求される利用時刻と利用時刻源との誤差が満足できる範囲に収まることは保証できない。

以上のことから、NTA から TSA まで時刻配送を行い、NTA から TSA までの時刻配送経路を保証し、かつ、NTA の時刻と TSA が利用する時刻との誤差が、TSA が要求する誤差範囲内であることを保証する TA の存在が重要と考えられる。TSA が様々な地域に多数配置される可能性を考えた場合には、TA 内部において、時刻配送ネットワークを構築し、各 TSA に対して、設置場所の特異性がない、同等の時刻配送サービスを実施することが必要と考えられる。以降では TA として構築する時刻配送ネットワークについて求められる要求事項と設計について述べる。

3 時刻配送ネットワーク実現への目標

TA は複数の時計装置を用いて時刻配送を実施し、TSA に提供可能な時刻トレーサビリティ情報を収集する。時計装置とは、内部に周波数発振器を持ち、その発信器の周波数により駆動される時刻を管理している装置とする。

時計装置では、標準時刻に対して補正を行った時点で、標準時刻との誤差を知ることができる。また、内蔵周波数発振器の物理的な発振性能により、補正後の経過時間に対する最大誤差を予想できる。しかし、時

計装置では、例えば電源の瞬断による一時的な発信器の停止など、事前に予測困難な障害が発生する可能性がある。このため、時刻トレーサビリティに必要な標準時刻との誤差を、物理的な性能だけで予想できない。従って、十分短い間隔での定期的な誤差計測を実施し、運用中の誤差を TSA に対して証明する。

TSA が要求する誤差範囲内で時刻配送を行うためには、常に配送時刻の監視を行い、要求誤差範囲外となる時計装置を発見した際には、その時計装置を配送経路から除外する。この監視結果を安全に保管することにより、時刻トレーサビリティの誤差情報として提供可能とするシステムを構築する。

この時刻監視により、配送時刻が規定精度範囲内であったことを保証できるが、時刻の補正記録、すなわち、時計装置の動作記録としては利用できない。従って、時刻配送元と時刻配送先となる時計装置間において、時計装置間で時刻同期時に生成する誤差情報を両装置で安全に保管し、時刻補正時に利用した誤差記録を時刻受信側装置が保管することで、補正記録を作成することが望ましい。

誤差計測を実施する場合には、計測対象より精度のよい測定機器を必要とする。従って、時計装置の標準時刻との時刻差計測には、時刻トレーサビリティは必要としないが、時刻配送より高精度な誤差測定方法を用いなければならない。

時刻トレーサビリティの時刻配送経路を保証するため、すなわち、TSA が要求する NTA からの時刻配送を保証するため、各時計装置において、時刻の送信元を常に監視し、要求と異なる時刻源からの時刻を受信して時刻同期している場合には、その時計装置を除外するシステムが必要とされる。この経路監視結果を安全に保存することで、時刻トレーサビリティの時刻配送経路情報として提供可能とする。

このように、精度や経路が想定外となる時計装置を積極的に除外するシステムにより時刻配送を行う場合には、いくつかの時計装置を除外しても時刻配送が途切れないようにする必要がある。NTA から TSA までの時刻配送経路途中で複数台の時計装置が並ぶ場合には、障害の発生した時計装置を時刻配送経路から除外しても、他の経路により時刻配送が行われる時刻配送ネットワークの構成が可能となる。そこで、複数の時

刻配送経路を用意することにより、時刻配送システム全体での可用性を損なわないシステムを構築する。

障害発生のため時刻配送経路から除外された時計装置を修理するためには、保守者が対応可能な時間帯に現地に赴き修理するまでの、停止時間を想定しなければならない。従って、時計装置の障害が取り除かれ、正常状態に回復するまでの日数を考慮して可用性のある時刻配送網を構築する必要がある。

これらの観点から、以下に時刻配送ネットワークに求められる目標をまとめる。

- ・ 可用性のある時刻配送ネットワークの構築
 - 複数台の時計装置を用いた多重経路による時刻配送ネットワーク構築
 - 保守者の稼働時間と時計装置回復までの時間を考慮した機器配置設計
- ・ NTA から TSA まで規定精度範囲内での時刻配送の実現
 - 時計装置の物理的性能を反映した時刻配送ネットワークの構築
 - 各時計装置の常時監視による、障害のある時計装置の発見と除外
 - 監視結果を利用した時刻トレーサビリティ情報の抽出
 - 時計装置における時刻補正記録の生成と、この情報を利用した時刻トレーサビリティ情報の抽出
- ・ NTA から TSA までの配送経路保証
 - 各時計装置における配送経路の常時監視、障害のある時計装置の発見と除外
 - 監視結果を利用した時刻トレーサビリティ情報の抽出

4 時刻配送ネットワークの構築

図 1 に時刻配送ネットワークの構成を示す。TA 内には NTA が補正を行う原子時計があり、TA の時刻配送は、この原子時計が生成した時刻を対象として行われる。NTA と原子時計間の時刻トレーサビリティ情報は NTA が管理する。NTA と原子時計間の補正のためには、GPS Common-view 方式[7]や光ファイバを用いた方式[8]による、高精度な時計誤差計測を用いて実施される。なお、時刻配送ネットワークでは、時計装置と

して NTP サーバを利用して時刻配送を行う。

原子時計からは、同軸ケーブルを用いて NTP サーバへ接続される。原子時計と接続された NTP サーバには、ISDN 回線の同期周波数により時計を計時する時計ボード[9]が搭載される。本ボードは、ISDN 回線周波数の他に、原子時計からの電気信号により時計を計時する機能も持ち、NTP プログラムに時計ボードが保持する時刻を読み取るモジュールを追加することにより、原子時計の時刻を NTP により配送可能とする。

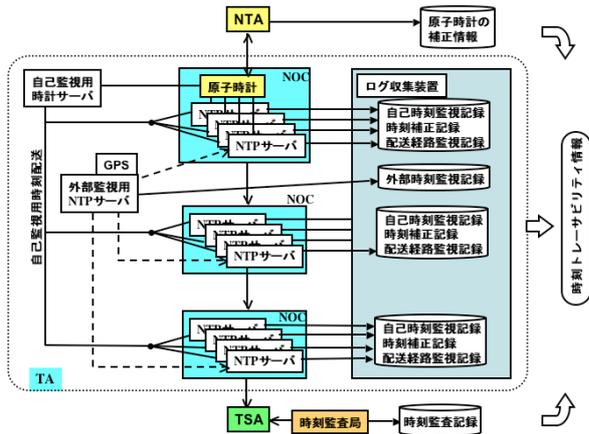


図 1 時刻配送ネットワークの構成

各 NTP サーバにおける、時刻監視記録、時刻補正記録、配送経路監視記録、また、外部監視用 NTP サーバの外部監視記録は、ログ収集装置に集められる。各記録には時刻認証が実施されて、テープや光ディスク等に保管される。この情報により、TSA が利用したタイムスタンプの有効性を保障する。

NTP サーバ間のネットワーク回線は、SPF (Simple Point Failure)の無いネットワークを利用して、回線による障害発生を抑える。IP 層においては、IP ルータを用いて IP ルーティングされており、OSPF (Open Shortest Path Fast)[10]といった、リンク帯域をコストに反映して経路を決定するプロトコルを利用する。このプロトコルの性質を利用して、回線構成とプロトコル設定により往復経路が等しくなるネットワークを構築し、NTP の時刻同期誤差を吸収する。さらに、NTP パケットを、他の IP パケットより優先的にキューに入れて送信するといったキューイングの利用や、Diffserv[10]を利用することで、片道遅延変動に起因する NTP の時刻同期誤差を小さくする。これらのネットワーク設定により、インターネットを通した場合に問題となった NTP の時

刻同期精度を確保する。

以降では、第 3 章で述べた要件を満足する時刻配送ネットワークの設計について述べる。

可用性のある時刻配送ネットワークの構築

時刻配送ネットワークでは、時計装置として NTP サーバを利用する。NTP は、複数台の時計装置を時刻同期先の NTP サーバとして参照した場合、各 NTP サーバの時刻を比較することで、大きく時刻がずれている NTP サーバがある場合には、その NTP サーバを時刻同期対象から自動的に除外する機能を有する。また、NTP サーバからの通信が途絶えた場合には、残された NTP サーバへ時刻同期先を切替える機能を有する。このため、第 3 章で述べた可用性のあるネットワーク構築に適したプロトコルと言える。なお、時刻が大きくずれている NTP サーバを時刻同期対象から外す際には、多数決により判定を行う。本機能を有効にするためには、1 台の NTP サーバが、同時に最低 3 台の NTP サーバを時刻同期先として参照しなければならない。

次に、保守者の稼働時間について検討する。NTP サーバとして、汎用 PC の利用を想定し、1 年に 1 回、障害により停止すると仮定する。1 台の NTP サーバが停止してから、保守者が駆けつけて、回復するまでの時間を 264 時間 (11 日) とする。この場合、3 台同時に停止する可能性は、0.00273% となり、99.99% の稼働率が期待できる。99.999% の稼働率とするためには、1 台の NTP サーバが、同時に 4 台の NTP サーバを時刻同期先として参照する必要がある。

なお、その他のネットワーク機器等については、要求する稼働率を満足する機器構成により構築されると仮定している。

NTA から TSA まで規定精度範囲内での時刻配送の実現

NTP では、配送経路途中の NTP サーバの時計が不正確となった場合に、それ以降の NTP サーバすべての時計が不正確となる。不正確な時刻配送を避けるためには、TSA が参照する NTP サーバのみについて時刻配送結果を監視するのではなく、配送経路中の全ての NTP サーバを監視することが必要となる。

そこで、第 3 章で述べた、NTA から TSA まで、規定精度範囲内での時刻配送を行うために、2 系統の時

刻監視系を用意する。ひとつは、時計ボードを搭載することにより、NTP による時刻配送を自己監視するものである。他は、時計ボードを搭載した外部監視用 NTP サーバを用いて外部より監視するものである。

自己監視系では、原子時計から同軸ケーブルで接続された自己監視用時計サーバを用意する。このサーバでは、NTP サーバと同様に時刻を原子時計より取得する。この時刻を光パスや ISDN を通して分散配置された NTP サーバの時計ボードに送信する[8][9]。各時計ボードでは、自己監視用時計サーバより受信した時刻により補正を行い、その後は、ISDN 回線周波数により時計を計時する。時計ボードの時刻と NTP により配送された時刻を比較することにより自己監視が可能となる。

外部監視系では、外部監視用 NTP サーバに時計ボードが搭載されている。自己監視用時計サーバより時刻を受信して、時計ボードの時刻補正を行い、その後、ISDN 回線周波数により時計を掲示する。監視対象となる NTP サーバの時刻は NTP を用いて取得し、この取得した時刻と時計ボードの時刻を比較することにより外部監視を可能とする。

TSA が要求する精度を k msec とした場合に、原子時計に接続された NTP サーバから TSA までの接続リンク数を n 本とすると、各リンクあたりの許容誤差は、 k/n msec と設定される。これにより、 m 本目のリンクにあたる NTP サーバにおける許容誤差は、 $m \cdot k/n$ とでき、自己・外部監視によりこの許容誤差を監視することが可能となる。

実際には、TSA は複数台接続され、各 TSA までのリンク数は複数種類あるため、1 台の NTP サーバに、TSA ごとに許容誤差を設定することは困難である。このため、全 TSA までの最大リンク数を規定し、それを n として、NTP サーバの許容誤差を一律に求める。時刻配送ネットワークは、この最大リンク数を満たすように構築する。

許容誤差を超えた時刻となる NTP サーバを発見した場合には、その NTP サーバの NTP プロセスをダウンする処置を行い、保守者へ通知する機能を基本的な機能として実現する。

NTA から TSA までの配送経路保証

TA では、複数リンクにより時刻配送を実現するた

め、NTA までの配送経路を把握してその経路を保障する必要がある。このため、各 NTP サーバにおいて、NTA までの経路を正しく確保する配送経路の設定を行う。次に、NTP パケットを送受信可能なホストをフィルタとして設定する。この上で、その配送経路設定が正しいかどうかを、常時監視する。

ここで、障害により配送経路に誤りが発生する場合を想定する。上位 NTP サーバと下位 NTP サーバを想定する。上位 NTP サーバとは、下位 NTP サーバに時刻を配送しているものであり、下位 NTP サーバとは、上位 NTP サーバの時刻を利用して時刻同期しているサーバである。ここで、下位 NTP サーバが `sym_active` モードで上位 NTP サーバに通信を行った場合、上位 NTP サーバは `sym_passive` モードで動作し、下位 NTP サーバを時刻同期先として自動的に参照を開始する。このため、時刻配送ループが発生し、配送精度が低下する。

下位 NTP サーバが GPS などの高精度な時刻源を参照して動作する NTP サーバであった場合、NTP の時刻源選択アルゴリズムの理由から、上位 NTP サーバは、配送経路とは異なる下位 NTP サーバを筆頭時刻源として参照する場合がある。この場合には、NTA までの経路が途絶える。

監視は、各 NTP サーバに参照先 NTP サーバのリストを保管し、そのリストと実際の NTP プログラムの動作を比較して行う。リスト外の NTP サーバを参照し、同期対象時刻源として認識した場合には、その NTP サーバの NTP プロセスをダウンする処置を行い、保守者へ通知する機能を基本機能として実現する。

5 利用する NTP サーバの性能

時刻配送ネットワークでは、NTP サーバとして汎用 PC を利用する。NTP プログラムは、PC 内のシステム時計を利用している。この時計の精度は、PC に内蔵された発振装置に依存する。NTP プログラムは、この発振装置をフィードバック制御して時計を運用する。時計装置に NTP を利用した場合、精度性能は、汎用 PC の発振装置に対する制御範囲（収束性）で決定される。特に、発振装置の単位時間あたりの誤差範囲が NTP プログラムの想定内であり、かつ、一定時間（NTP プログラムにより補正されてから、次に補正されるまでの時間）以上にわたって一定の精度で動作する発振装置

である場合、NTP による制御の結果、性能のよい時計装置を構築できる可能性が高い。

以下では、現在利用している NTP サーバ (2.4G×2CPU, 512Mbyte メモリー, Intel Solari8) に時計ボードを搭載し、その時計ボードの時刻を用いて、NTP プログラムにより時刻同期を行う。その結果より NTP サーバの動作性能を求める。

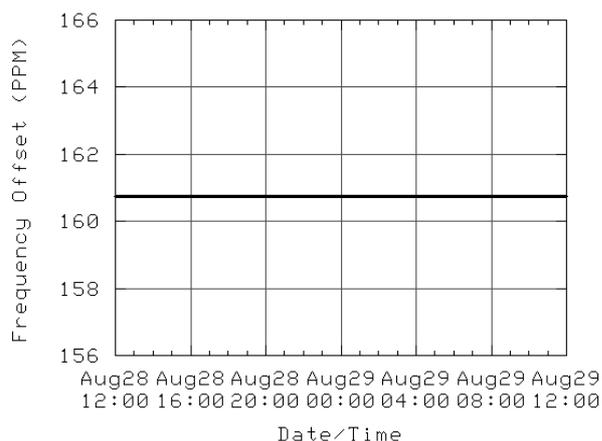


図 2 周波数オフセットの推移

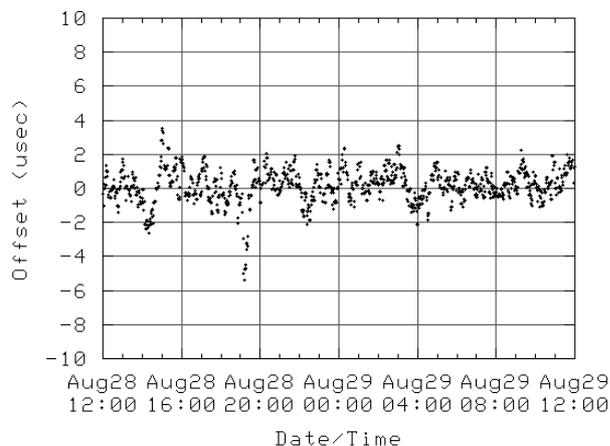


図 3 原子時計とシステム時計誤差

図 2に、NTP プログラムにより制御されている汎用 PC の発振性能を示す。図の縦軸は、NTP プログラムが算出した周波数オフセットを示す。このオフセットは時計ボード、すなわち、ISDN 回線周波数と、汎用 PC の発振装置との周波数オフセットとすることができる。平均は 160.7510ppm、分散は 0.0001、標準偏差は 0.0130 である。ISDN 回線周波数と発振装置の周波数オフセットは観測されるが、その値の変動は小さく収束している。これは、発振装置が NTP プログラムにとって十分制御可能であり、長時間安定動作したことを示す。

図 3に、NTP プログラムにより計測された時計ボードの時刻と汎用 PC のシステム時計との誤差を示す。この図より、±5usec 以内といった精度の時刻同期が行われていることがわかる。このように、NTP プログラムが発振装置を十分制御可能な汎用 PC を利用することにより、マイクロ秒での同期精度を期待できる。

このように、NTP プログラムにより制御可能な汎用 PC では、マイクロ秒での精度を求めることが可能である。時刻認証といった数 100 ミリ秒の精度を求める[1]アプリケーションに対しては、第 4 章で述べた監視においても、リンク毎に数 10 ミリ秒の誤差範囲で監視を行うと考えられる。従って、現在利用している汎用 PC は、時刻配送時に、十分満足できる精度性能を持った時計装置といえる。

次に、ISDN 回線周波数により計時される時計ボードの時刻の動作精度について示す。時計ボードに対して、日本標準時を決定する装置より 1PPS と 10MHz を入力し、この周波数で動作する時計と、ISDN 回線周波数により動作する時計の時刻比較を行った。

図 4に、日本標準時と ISDN 回線周波数により駆動される時計との誤差を示す。縦軸は、日本標準時を 0 とした場合の、ISDN 回線周波数により計時される時計の誤差を示す。

測定は一分おきにマイクロ秒単位で行った。この結果より、ISDN 回線周波数は、年間を通して±3usec 以内で時計を計時できる精度で管理されていることがわかる。自己・外部監視では、ミリ秒単位での監視が実施されるため、時計ボードを監視に用いる際には、十分な精度を持っているといえる。

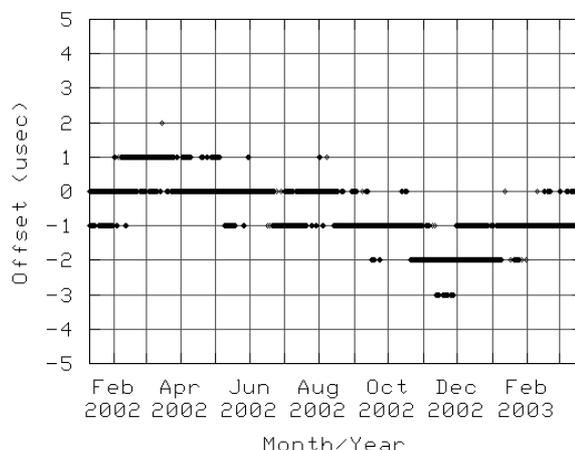


図 4 日本標準時と ISDN 回線周波数により駆動される時計との誤差

ただし、図では、初めに日本標準時に同期した状態から計測されている。このため、時計ボードに時刻を送信した際の時刻同期誤差が、そのまま補正されずに精度よく運用される。時計ボードに時刻を送信する手段として、光パスの利用や ISDN 回線の利用が考えられるが、どちらの方式もミリ秒より下の単位の精度で時刻同期可能であるため、監視において十分な精度を保つことができる。

6 おわりに

時刻認証で利用するタイムスタンプには、時刻トレーサビリティと呼ぶ、信頼できる NTA から TSA までの時刻配送経路に関する情報と、NTA の時刻と TSA の時刻の誤差情報が重要となる。

本稿では、時刻トレーサビリティに関する情報を提供可能な時刻配送ネットワークの設計について述べた。本配送ネットワークは、可用性のある時刻配送ネットワーク、NTA から TSA まで規定精度範囲内での時刻配送の実現、NTA から TSA までの配送経路保証を目標として構築することを述べた。

時刻配送ネットワークでは、NTP を用いた複数経路による時刻配送を実施する。さらに、ISDN 同期周波数で計時する時計を備えた時計ボードを用いた自己・外部監視による規定精度の保証、時刻補正記録の保存、各 NTP サーバにおける時刻参照先の監視による配送経路保障を実現する。

最後に本配送ネットワークで利用する NTP サーバの性能と、ISDN 回線周波数により計時される時計の精度について示した。汎用 PC による NTP サーバにおいても十分な精度での運用が可能と考えられる。また ISDN 回線周波数により計時される時計は、ネットワークの品質変動を受ける NTP を監視するために、十分な精度を持つ安定した発振源により駆動されており、誤差計測装置として利用可能であることを示した。

参考文献

- [1] タイムビジネス推進協議会, "時刻認証基盤ガイドライン", May, 2004.
- [2] Michael A. Lombardi, "Traceability in Time and Frequency Metrology", Cal Lab: The International Journal of Metrology, pp33-39, Sep/Oct, 1999.
- [3] <http://www.boulder.nist.gov/timefreq/service/gpstrace.htm>
- [4] <http://jiv.crl.go.jp/Pub/gps.html>
- [5] David L. Mills, "Network Time Protocol (Version 3) Specification, Implementation and Analysis", RFC-1305, 1992-3.
- [6] 今村國康, 後藤忠広, 金子明弘, 今江理人, 栗原則幸, "ネットワークによる日本標準時供給システム", FIT2002, Sep, 2002.
- [7] Michael A. Lombardi, Lisa M. Nelson, Andrew N. Novick and Victor S. Zhang, "Time and Frequency Measurements Using Global Positioning System", Cal Lab: The International Journal of Metrology, pp26-33, Jul/Aug/Sep, 2001.
- [8] Harumoto Fukuda, Satoshi Ono, "An Accurate Time Measuring System Using an Optical Path Network", SCI2004, Jul, 2004.
- [9] Satoshi Ono, Takao Yamashita, "Precision Synchronization of Computer Clocks using ISDN", Asian '96, pp28-41, 1996.
- [10] Christian Huitema, "Routing in the Internet", Prentice Hall, 1999.