

ISDN 網を用いた分散高精度時刻／周波数同期

山下 高生

小野 諭

NTT ソフトウェア研究所

東京都武蔵野市緑町 3-9-11

E-mail: yamasita@slab.ntt.jp ono@slab.ntt.jp

我々は、インターネットのようにジッタの小さくないネットワーク上の広域分散環境において point-to-point, point-to-multipoint, multipoint-to-point など、通信形態に依存しない連続メディア処理のための周波数同期方法を実現することを目的として、高速デジタル網を用いた高精度周波数同期を実現してきた。本論文では、高速デジタル網を用いた高精度周波数同期を行なっている計算機間での時刻同期方法を提案し、ISDN を用いて実装・評価をおこなった結果について述べる。この方法は、クロック・サーバとクライアントが通信を行ない、パケットを運ぶ INS64 の HDLC フレーム送受信終了時刻をハードウェア的に正確に測定して、サーバ・クライアント間の時刻差を計算することを特徴とするものである。本方式により、サーバ・クライアント間で、 $15.6\mu s$ 以下の精度で時刻を同期させることができる。

Precise clock and frequency synchronization for continuous media processing using a ISDN network in distributed systems

Takao Yamashita , Satoshi Ono

NTT Software Laboratories

9-11, Midori-Cho 3-Chome Musashino-Shi, Tokyo 180 Japan

E-mail: yamasita@slab.ntt.jp ono@slab.ntt.jp

Precise clock and frequency synchronization is essential for high-quality continuous media processing in distributed systems. Previously, we proposed the frequency synchronization using framing clock supplied by high-speed digital networks. This method is suitable for communication with delay jitter and arbitrary topology. In this paper, we propose a new clock synchronization method between computers whose clock signal frequency is synchronized using framing clock. Its characteristic is hardware-supported measurement of EOF (End of Frame) timing. In addition, we state how to implement and measure the accuracy of clock synchronization. The difference between a clock server and a client can be less than $15.6\mu s$.

1 序論

分散システムにおける高品質連続メディアのデジタル処理には高精度の時刻同期および周波数同期が不可欠である。通常、計算機内の時計は、ある瞬間の絶対時刻を与えてやると、その瞬間から内部の水晶クロックなどを使用し、経過時間を計ることによって各時点の時刻を計測する。ここで、絶対時刻を合わせることで時刻同期であり、経過時間を測定するためのクロックの周波数、すなわち時間の進む速度を合わせることで周波数同期である。周波数同期は、連続メディア処理においてメディア・ストリームの生成および再生レートを同期させるために必要であり、時刻同期は、異なるメディアストリーム中のデータの時間的な位置関係を決定するために必要である。

広域分散環境で時刻同期を実現する手段は、専用のハードウェアを使用する方法とソフトウェアのみによる方法に分類することができる。GPS(Global Positioning System)やJJYなどの電波を使用する方法などのハードウェア型は、NTP[1]などのソフトウェア型に比べて高い精度が実現できる反面、高いコストが必要であり、また電波を用いる方法では受信安定性の面でも問題があった。また、これらによって実現できるのは時刻同期のみであり、周波数同期を行なうことは容易ではない。

広域分散環境で周波数同期を実現する方法は、通信グループ非依存(ICG: Independent of Communication Group)型と、通信グループ依存(DCG: Dependent of Communication Group)型に分類することができる。通信グループとは、通信を行なっている計算機ノードから構成されるグループである。

ICG型とは、通信に参加しているノードに関係なく、各ノードは、高精度な周波数をもつ基準クロック発生器からの信号によって互いに同期する方法である。これは、独立、従属、および相互同期技術を用いて実現される[2]。DCG型は、通信に参加しているノードの一つがクロックのマスタとなり、他のノードに対して、クロック情報を配送する方法である。DCG型は、さらにフォワード型とバックワード型に分けられる。フォワード型は、メディア・ストリームにクロック情報を重畳し、受信側で、このクロック情報をもとにクロックを生成する。バックワード型は、受信側の受信バッファの長さの情報を送信側に送り、この長さ情報をもとに送信側が受信側のクロックに同期させる方法である。

ICG型としては、シンク・ジェネレータを用いた通常のプロ用のAudio/Video機器の同期がある。この方法では、シンク・ジェネレータによる同期信号がリファレンスクロックとして、すべての機器に分配される。そして、各機器はこのクロックをもとにA/D D/A変換を行なう。しかし、このような方法は、同期できる地理的な範囲が限られ、広域分散環境において実現することはコスト的に困難である。フォワードDCG型としては、MPEG規格[3]に定められている方法があ

る。この方法は、point-to-pointやpoint-to-multipointでは、有効である。しかし、異なった周波数のクロック情報が複数のストリームに重畳されて送られてきても、1つの受信ノードが複数のクロックに同期することは不可能であるので、multipoint-to-pointには、有効ではない。さらに、ジッタが1ms以上になるとMPEG規格で定められている方法では、クロックを回復することが困難であることがわかっており[4]、現在のインターネットのようにジッタの大きいネットワーク上での実現することは難しいと考えられる。バックワードDCG型には、queueing feedback方式がある。この方法は、フォワード型とは逆にpoint-to-multipoint通信において同様の理由によって有効ではない。

我々は、広域分散環境において、インターネットのようにジッタの小さいネットワークでpoint-to-point, point-to-multipoint, multipoint-to-pointなど、通信形態に依存しない時刻/周波数同期方法を実現することを目的として、これまで高速デジタル網を用いた高精度周波数同期方法を提案し、INS64のフレーム同期クロック(IBFC: ISDN BRI Framing Clock)を用いた周波数同期システムの実装・評価を行なってきた[5]。そして、現在分散並列環境における連続メディア処理アーキテクチャへの応用を考えている[6]。本報告では、IBFC周波数同期システムのより詳細な評価について述べるとともにIBFC周波数同期システムを持つ計算機間での、INS64を用いた時刻同期方法を提案し、その精度評価について述べる。

本報告の構成について述べる。章2では、IBFCによって周波数同期を行なった計算機間での時刻同期方法について述べる。章3では、時刻および周波数同期の評価方法について述べる。章4では、評価結果および考察を述べる。章5では、まとめと今後の課題について述べる。

2 時刻/周波数同期方法

2.1 IBFCを用いた周波数同期

現在のデジタル通信網は、デジタル交換機、多重化装置、デジタル伝送装置などから構成されている。これらの機器は、ネットワーク上の各リレーポイントでのデータスリップ確率を下げるために全世界的に同期したかたちで動作している。デジタル網内の機器は、共通のクロック、すなわちPRC(Primary Reference Clock)にロックしている[7][8]。PRCは、部分的に独立した、クロック分配網で配送されている。ITU-T G.811によると、スリップの確率を70日に一回以下にするためにPRCの安定性は、 10^{-11} 以下が推奨されている。PRCは通常セシウム周波数標準のような高精度クロックソースから生成されている[9]。ユーザ網インターフェイス(UNI: User Network Interface)から取り出されるフレーム同期クロックも、PRCから作り出されている。フ

フレーム同期クロックとは、フレーム同期を行なうフレームビットをもとに通信端末で内部的に生成されるクロックのことである。

我々が提案してきた周波数同期方法は、分散環境における計算機ノードがフレーム同期クロックを共有することによって周波数同期を実現するという方法である。UNIとしてINS ネット64(以下INS64と略す。)を用いた場合、フレーム同期クロックによる周波数同期方式は、高精度周波数同期を実現することが可能であることが明らかになっている [5]。

2.2 時刻同期

2.2.1 概要

フレーム同期クロックを用いて周波数同期をしている計算機間で、INS64を用いて時刻同期を行なう方法について説明する。この方法では、クロック・サーバとクライアントが存在し、クライアントはサーバと通信を行ない、クライアント・サーバ間の時刻同期プロトコルの通信で時刻同期を行なう。この方法は、バケットを運ぶINS64のHDLCフレームの送受信終了時刻を正確に測定するハードウェアを有することを特徴としている。送受信終了時刻をサーバからクライアントに送り、それをもとにクライアントはサーバの時刻に同期させる。

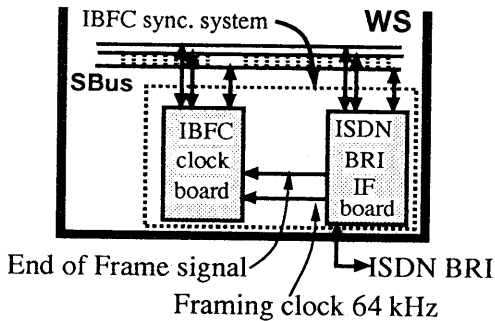


図1: IBFCを用いた時刻/周波数同期システム

この送受信終了時刻を測定するハードウェアは、INS64による周波数同期に用いたシステム [5] に付加する形で実装を行なった。IBFCによる時刻周波数同期システムを図1に示す。時刻/周波数同期システムは、ISDN BRI IF (interface) board および IBFC clock board から構成される。ISDN BRI IF board は、ISDN BRI (INS64) UNI のフレーム・ビットから 64kHz のフレーム同期クロックを生成する。このフレーム同期クロックは IBFC clock board に入力される。また、ISDN BRI IF (interface) board から B チャンルの Tx, Rx 信号が IBFC clock board に入力される。IBFC clock board では、IBFC をカウントして時刻を測定するとともに、Tx, Rx 信号から HDLC フレームの送受信終了を知らせる信号 (End of Frame シグナル) を生成し、この信号に

よって時刻情報をハードウェア的にレジスタに格納する。

2.2.2 同期用ハードウェアの詳細

以下に、IBFC clock board および ISDN BRI IF board の詳細について述べる。

ISDN BRI IF board ISDN BRI IF ボードは、市販のINS64用のネットワーク・インターフェース・ボード (CSR 社製 BM-IS64) を改造したものであり、INS64のフレーム同期クロックを取り出すために使用した。INS64 インターフェースからは 4kHz のフレーム同期クロックが供給されている。4kHz クロックは INS64 IF ボードで 16 倍に通信されて 64kHz のクロックとなる。この 64kHz のクロックを IBFC clock board に入力した。また、IBFC clock board で HDLC フレーム送受信終了シグナルを生成するために B チャンルの Tx, Rx 信号を取り出すための回路を付加してある。

IBFC clock board IBFC clock board は、今回試作したものであり、ブロック図を図2に示す。このボードは、ISDN BRI IF board から入力されるフレーム同期クロックをカウントするダウン・カウンタ、カウンタ値をラッチするためのラッチ・レジスタ、ISDN BRI IF board からの B チャンル Tx, Rx 信号をもとに End of Frame (EOF) 信号を生成する EOF デテクタ、これらを制御する制御/状態レジスタおよび制御回路、内部水晶発振器から構成される。クロック源として、IBFC clock board では IBFC と内部水晶発振器を選択することができる。ボードの概観を図3

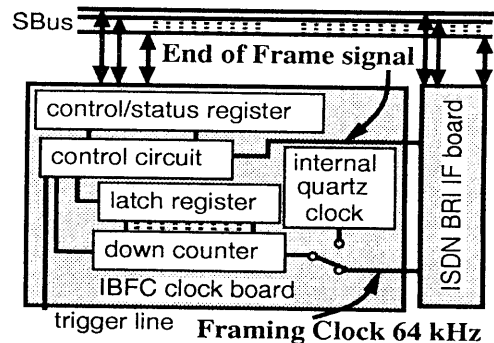


図2: IBFC clock board のブロック図

2.2.3 時刻同期プロトコル

まず、時刻同期プロトコルで用いるバケット送受信終了時刻を図4を使って説明する。時計同期プロトコルは、すべてUDP (User Datagram Protocol) を使って実装した。このUDPパケットは、IP (Internet Protocol) に格納され、さらにPPP (Point-to-Point Protocol) パケットに格納される。そして、最終的には、HDLC フレームに格納される。送信および受信終了時刻は、そ

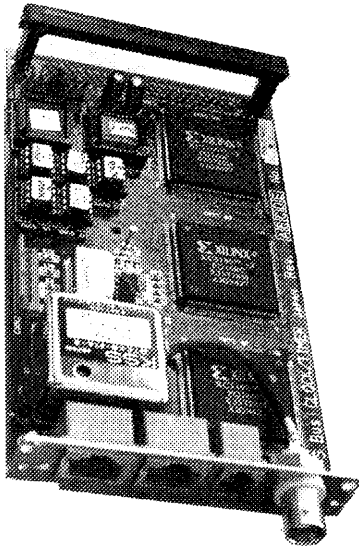


図 3: IBFC clock board の概観

それぞれ図の t_s と t_r であり、この時刻に ISDN BRI IF board から発生する End of Frame 信号を契機として、IBFC clock board は、その時刻をレジスタに格納する。プロトコルについて図5を用いて説明する。

1. クライアントがサーバに時刻同期リクエストを送る (P1)。
2. サーバから時計同期許可を送る (P2)。
3. 測定用パケットをクライアントからサーバに送る (P3)。
4. サーバは上記のパケットの受信完了時刻 t_{r1} をクライアントに送る (P4)。
5. 測定用パケットをクライアントからサーバに送る (P5)。
6. サーバは、上記のパケットの送受信完了時刻 t_{s2}, t_{r3} をクライアントに送る (P6)。
7. 測定用パケットをクライアントからサーバに送る (P7)。
8. サーバは、上記のパケットの送受信完了時刻 t_{s4}, t_{r5} をクライアントに送る (P8)。

クライアントの時刻同期方法について説明する。クライアントおよびサーバの時刻をそれぞれ T_c および T_s と

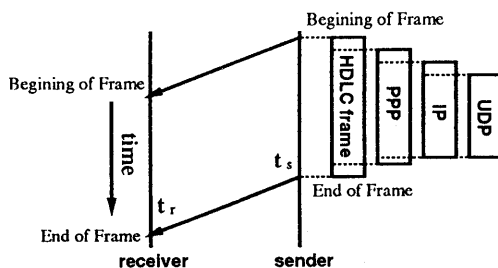


図 4: パケット送受信終了時刻の測定

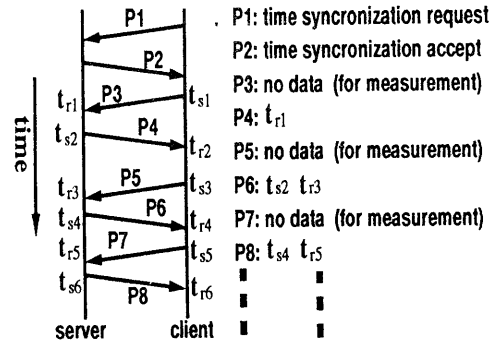


図 5: 時刻同期プロトコル

し、その差を Δ とすると、

$$T_c = T_s + \Delta \quad (1)$$

また、クライアントからサーバへの伝搬遅延時間を D_{cs} 、サーバからクライアントへの伝搬遅延時間を D_{sc} とすると、

$$t_{s1} + D_{cs} = t_{r1} + \Delta \quad (2)$$

$$t_{s2} + \Delta + D_{sc} = t_{r2} \quad (3)$$

よって、

$$\Delta = \frac{(t_{s1} + t_{r2}) - (t_{s2} + t_{r1}) + (D_{cs} - D_{sc})}{2} \quad (4)$$

ここで、 $D_{cs} = D_{sc}$ と仮定すると、

$$\Delta = \frac{(t_{s1} + t_{r2}) - (t_{s2} + t_{r1})}{2} \quad (5)$$

となり、サーバとクライアント間の時刻差 Δ を求めることができる。

以上の方法で時刻同期を行なった場合の誤差について述べる。サーバとクライアントは、UNI から取り出される 64kHz(周期 15.6 μ s) のフレーム同期クロックを持っている。図6に示すように、それぞれの秒位相は、フレーム同期クロックの立ち上がりエッジ部分に合わせるため、秒位相の変更はその周期 15.6 μ s 単位となる。よって、式5からサーバとGPSの時刻は、 $\pm 7.8\mu$ s の誤

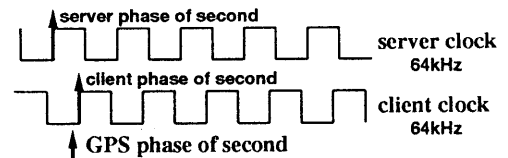


図 6: GPS、クロック・サーバおよびクライアントの秒位相

差を含むことになる。

サーバとクライアントについては、 $t_{s1}, t_{r2}, t_{s2}, t_{r1}$... が、周期 15.6 μ s のクロック信号によって測定されているため 0 ~ 15.6 μ s の誤差を含む。よって、 Δ は 0 ~ 15.6 μ s 周期の誤差を含むことになる。

クライアントとGPSの誤差は、サーバとGPSの時刻誤差とサーバとクライアント間の誤差の和となり、0 ~ 31.3 μ s の誤差をもつ。

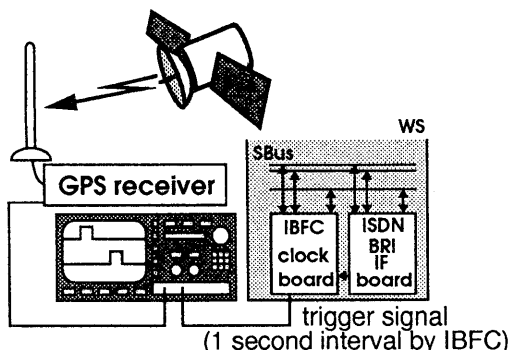


図7: GPSを用いた時刻/周波数同期の測定系

3 測定方法

3.1 時刻同期精度の測定

GPS、クロック・サーバおよびクライアントの時刻の秒位相の時間差を測定する方法を説明する。図7に測定系を示す。まず、サーバおよびクライアントのIBFC clock board から、秒位相毎にトリガ信号を発生させ、これをデジタル・オシロスコープに入力する。また、GPSの秒パルス信号もデジタル・オシロスコープに入力する。これらのパルスの時間差をデジタル・オシロスコープで読みとることによってGPS、サーバおよびクライアントの時刻のずれを測定することができる。GPSは、古野電気社製のGN-72を用いた。GN-72の秒パルスの精度は、 $\pm 1\mu\text{s}$ である。

3.2 GPSを用いた周波数同期精度の測定

IBFCの周波数の精度については、ルビジウム周波数標準を使用して測定すると 1.9×10^{-10} (年差 6.0×10^{-3} 秒)である[5]。本報告では、GPSの秒パルスを使用した、より詳細な精度測定方法を以下に行なう。測定系は、節3.1と同じものを用いる。まず、GPSの秒パルス信号によって測定した時間(T_G)に対する、フレーム同期クロックの規格周波数(64kHz)が正しいとして測定した時間(T_I)を測定する。周波数の精度は、 T_I および T_G を用いて $(T_G - T_I)/T_I$ となる。

4 測定結果および考察

4.1 時刻同期

図8に、GPSの時刻に対するクロック・サーバの時刻差を示す。横軸が測定時間であり縦軸がGPSの時刻に対するクロック・サーバの時刻の差である。この図から、クロック・サーバの時刻差は、 $2.5 \sim 4.2\mu\text{s}$ であり、節2.2.3で述べた範囲内である。また、秒位相のふらつきは $1\mu\text{s}$ 程度の範囲である。この原因としては、GPSの秒パルスの $\pm 1\mu\text{s}$ の誤差およびフレーム同期クロックがふらついていることが考えられる。INS64の場合、フレーム同期クロックが、加入者終端装置(SLT:

Subscriber Line Terminal)から直接送られているのではなく、TCM(Time Compression Modulation)を用いているため[10]、DSU(Data Service Unit)で周波数変更が行なわれており、さらにISDN BRI IF boardでも周波数変更が行なわれているためフレーム同期クロックが安定していない可能性がある。

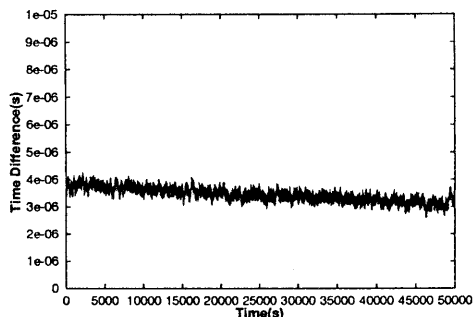


図8: GPSの時刻に対するクロック・サーバの時刻差

図9に、時計同期プロトコルによってクロック・サーバに時刻同期を行なった直後からのクロック・サーバに対するクライアントの時刻差を示す。横軸が測定時間であり、縦軸がクロック・サーバの時刻に対するクライアントの時刻差である。この図からこの図から、クライアントとサーバの時刻差は、 $-500 \sim 490\text{ns}$ であり、節2.2.3で述べた範囲内である。また、秒位相のふらつきは $1\mu\text{s}$ 程度の範囲である。ふらつきの原因は、前述のようにINS64のクロック分配の方法によるフレーム同期クロックのふらつきと考えられる。

今回の測定では、サーバとクライアントは同じ電話局から引いたINS64回線を使用した。このためサーバとクライアントのフレーム同期クロックの位相がかなり等しかったことも、非常に精度の高い同期が測定されたことの原因と考えられる。

図10に、時計同期プロトコルによってクロック・サーバに時刻同期を行なった直後からのクライアントのGPSに対する時刻差を示す。横軸が測定時間であり、

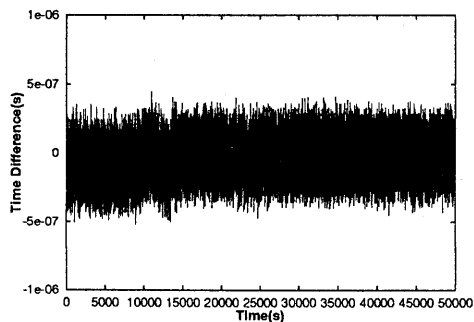


図9: クロック・サーバの時刻に対するクライアントの時刻差

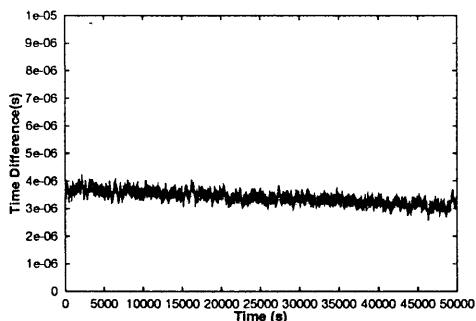


図 10: GPS の時刻に対するクライアントの時刻差

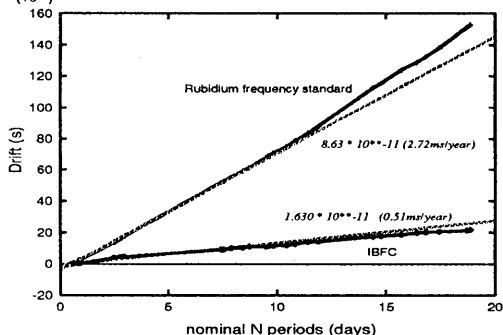


図 11: GPS の周波数同期精度

縦軸がGPSの時刻に対するクライアントの時刻差である。この図から、時刻差は、 $2.5 \sim 4.2 \mu\text{s}$ であり、節2.2.3で述べた範囲内である。また、秒位相のふらつきは $1 \mu\text{s}$ 程度の範囲であるが、この原因は、サーバとGPSの時刻差のふらつきと同じ原因と考えられる。

4.2 周波数同期

IBFCの周波数の精度については、ルビジウム周波数標準を使用して測定すると 1.9×10^{-10} (年差 6.0×10^{-3} 秒)であった[5]。GPSの秒パルスを使用した、より詳細な精度測定結果を図11に示す。横軸が、測定時間であり、縦軸がGPSによる時間からのドリフト値である。この図から、IBFCの周波数精度は 1.6×10^{-11} である。通常、GPSの精度は 1.7×10^{-12} 以下であり、さらに文献[5]で用いたルビジウム周波数標準の温度による発信周波数の精度が 3×10^{-10} であることから、GPSによる今回測定された精度の値がより実際の値に近いと考えられる。

5 まとめと今後の課題

本報告では、まず我々がこれまで提案し実装・評価を行ってきたフレーム同期クロックを用いた周波数同期を行なっている計算機間での時刻同期方法を提案した。この方法は、パケットを運ぶINS64のHDLCフレームの送受信終了時刻を正確に測定するハードウェアを有す

ることを特徴としている。時刻の誤差は、理論的には、サーバとGPSの間では、 $\pm 7.8 \mu\text{s}$ 、サーバ・クライアント間では、 $\pm 15.6 \mu\text{s}$ である。さらに、本報告では時刻同期について実装・評価を行ない、上記の誤差の範囲での高精度時刻同期が実際に行なえることを確認した。

今後は、遠距離間での時刻同期のサーバ・クライアント間の精度について評価を行なっていく。

謝辞

本研究をご支援下さる、NTTソフトウェア研究所の後藤滋樹広域コンピューティング研究部長に感謝します。また、日頃よりご指導、ご討論下さる高橋直久超並列プログラミング研究グループリーダーに感謝します。

参考文献

- [1] D.L.Mills, "Precision Synchronization of Computer Network Clocks", *Comput. Comm. Rev.*, Vol. 24, No. 2, pp.28-43, Apr. 1994.
- [2] 葉原、井上、「デジタル総合網」、産業図書、1989.
- [3] ITU-T Rec. H.222.0.
- [4] High Performance Networking Team of TEXAS INSTRUMENTS Integrated Systems Laboratory, "Design Issues for a Silicon Implementation of MPEG over ATM", Mar. 1995.
- [5] 山下、小野、「高速デジタル網を用いたクロック周波数同期」、*Tech. Report of IEICE, CPSY94-119*, pp.25-31, Mar. 1995.
- [6] 小倉、小野、高橋、「非同期な並列分散環境における実時間連続メディア処理」*Tech. Report of IEICE, CPSY94-120*, pp.33-40, Mar. 1995.
- [7] M.J.Klein and R.Urbansky, "Network Synchronization - A Challenge for SDH/SONET?", *IEEE Communication Magazine*, pp.42-50, Sep. 1993.
- [8] 牧野、安士、高、「網同期方式」、NTT研究実用化報告第28巻第7号 pp.1467-1486, 1979.
- [9] 十文字、木原、「主局用セシウム原子発振器」、NTT研究実用化報告第28巻第7号 pp.1487-1505, 1979.
- [10] N.Inoue, R.Komiya and Y.Inoue, "Time-Shared Two-Wire Digital Subscriber Transmission System and Its Application to the Digital Telephone Set", *IEEE Trans. on Comm.*, Vol.COM-29, No.11, pp.1565-1572, Nov. 1981.