

令和 4 年 6 月 15 日現在

機関番号：33907

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K11954

研究課題名(和文) 低遅延ネットワーク実現に向けた簡易かつ高精度な同期技術

研究課題名(英文) A simple and precision synchronization scheme for low latency networks

研究代表者

桑野 茂 (Kuwano, Shigeru)

大同大学・情報学部・教授

研究者番号：20761513

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：低遅延ネットワークのための簡易な同期技術として、標準電波等を活用した周波数同期技術とネットワークベースの時刻同期技術を併用したシステムについて検討を行った。低コストな発振器を用いた場合においても1ppbのオーダの周波数同期性能を達成できるとともに、3 μ s程度の時刻精度を実現可能であることを示した。また、基準信号断時のホールドオーバー動作において、温度に基づいた制御を行うことにより、2時間以上同期性能を維持できることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

低遅延ならびに定遅延のネットワークは時間に敏感なサービスを実現するために必要であり、実現のためには端末の高精度な同期が必要となる。

本研究では、通常のLANに接続された機器を対象として、標準電波等を活用した周波数同期技術とネットワークベースの時刻同期技術を併用したシステムについて検討を行い、高精度な同期性能を確認するとともに安定動作を実現した。これにより、様々な環境の端末に対する時間に敏感なサービスの適用範囲拡大が期待できる。

研究成果の概要(英文)：Synchronization performance of a hybrid synchronization system employing radio wave based frequency synchronization and network based time synchronization techniques is investigated. A frequency accuracy in the order of 1 ppb can be achieved with a low-cost oscillator, and time offset of lower than 3 microsecond can be realized over conventional LAN. Moreover, under the loss of reference case, the holdover performance of frequency synchronization is hold within 10 ppb by using temperature based control.

研究分野：情報ネットワーク

キーワード：低遅延ネットワーク 時刻同期 周波数同期 ホールドオーバー

1. 研究開始当初の背景

第5世代移動通信(5G)以降のネットワークでは、従来の人と人との通信だけではなく、人とモノさらにはモノとモノの通信(Internet of Things (IoT))が非常に活発に行われると想定されており、遠隔に配置されるサーバと端末(クライアント)の間で多様なサービスを収容するネットワークが実現されると考えられる。特に、超低遅延性が要求されるサービスに対して、タイムセンシティブネットワーク(Time Sensitive Network (TSN))に関する研究・開発が広く進められており、この中で、サーバクライアント間では高精度な時刻・周波数の同期技術が必要となる。

このため、通常のLANにTSNを適用するにあたり、TSN用の同期技術では専用の装置や回線が必要となるため、高精度の時刻・周波数同期を簡易かつ安価に実現することが大きな課題となる。また、安定した性能を得るためには、ある程度の時間同期用の基準信号が失われた状態にあっても同期状態を保持できることが必要である。

2. 研究の目的

本研究では、既設インフラを活用したLAN等の閉域ネットワークへタイムセンシティブネットワーク技術を適用することによる低遅延サービスの実現において、その要素技術であるサーバ-クライアント間での簡易かつ高精度な時刻・周波数同期システム技術を確立するため、図1に示すような標準電波等を活用した簡易な周波数同期方式とネットワークベースの簡易な時刻同期方式を併用することによる高精度な同期方式を検討し、数値シミュレーションならびに実機を用いた実験においてその同期性能を評価するとともに、実用化の際に課題となる同期信号喪失時における発振器のホールドオーバー動作の安定運用を実現するための手法を確立することを目的とする。

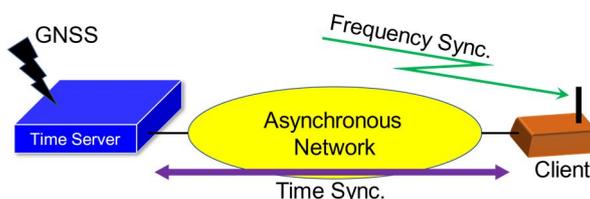


図1: 検討するシステムの構成

3. 研究の方法

本研究では、同期システムの端末側について、外部無線信号を基準とする周波数同期技術、ネットワークベースの時刻同期技術、ならびにホールドオーバー時の安定動作技術の3点について以下の検討を行った。

(1) 周波数同期技術

同期用の基準信号として長波JJYを用いる場合について、受信信号を基準信号として位相同期ループ(PLL)で局部発振器の周波数を同期させ、その同期性能の評価を行う。具体的には、信号受信時の基準信号に付加される雑音ならびに局部発振器として用いる温度補償型水晶発振器(TCXO)の周波数雑音の影響について、周波数変動に関するシミュレーション実験を行い、周波数誤差ならびに時刻誤差の時間変動特性を評価する。

(2) 時刻同期技術

ネットワークベースの同期プロトコルであるNetwork Time Protocol(NTP)やPrecision Time Protocol(PTP)を基本とする。ネットワーク中でのパケットの遅延変動の影響を低減するため、高精度な周波数同期が確立できていることを前提として、多数の時刻同期パケットを送受信し、それらの統計的処理により遅延時間ならびに時刻オフセットを推定する方式とする。このようにすることで高精度化を図る。パケットの遅延時間ゆらぎのモデルに基づいて時刻オフセット推定誤差のシミュレーション実験を行い、時刻オフセットを評価する。

(3) ホールドオーバー時の安定動作技術

長波JJYの伝搬特性および運用状況により基準信号ができない状態が生じる。この場合、特に環境温度の変動により発振器発振周波数が大きくドリフトするが、その間もシステムを運用するためにはドリフトを抑圧し同期状態を維持する必要がある。このため、温度をモニタし補正する実機による簡易な構成を実装し、ホールドオーバー時の周波数安定動作を確認する。

4. 研究成果

(1) 周波数同期技術

基準信号に付加される熱雑音、ならびに局部発振器の周波数雑音としてTCXOの白色雑音、フリッカ雑音、ランダムウォーク雑音を考慮し、シミュレーションを行った。図2に局部発振器出力から生成される1秒ごとの時刻パルス(PPS)のアラン偏差を示す。同図において、基準信号の1Hzあたりの搬送波対雑音電力比(CN比)をパラメータとして変化させている。約60

秒未満の短時間間隔での変動については、CN 比の劣化に伴い性能が劣化しているが、それより長い時間間隔については CN 比による大きな差はない。これは、PLL 内の LPF の帯域幅を 10mHz 程度に設定していることに起因している。熱雑音の影響については、短期変動部分は LPF で抑圧された成分が影響を与えているとともに、長期変動部分については観測時間の逆数の周波数成分の白色雑音の影響を与えている。周波数雑音については、短期変動部分は PLL で補償できない周波数雑音の影響を与えており、これは発振器そのもののアラン偏差と同等である。また、長期の変動について、PLL で補償しきれないフリッカ雑音やランダムウォーク雑音といった周波数のべき乗に逆比例する電力密度スペクトルを持つ TCXO の周波数雑音の影響であると考えられる。さらに、変動の絶対値としてみると、短期の変動については、1ppb(10^{-9})程度であり、安価な発振器を用いた場合でも高精度な周波数同期が実現できていることがわかる。次に、基準信号に基づく 1 秒間隔のパルスを 43 万秒程度（約 5 日間）観測した場合の最大時間間隔誤差 MTIE(Maximum Time Interval Error)について図 3 に示す。MTIE は観測期間内でのタイミング誤差の最大値と最小値の差の全観測時間での最大値を表している。観測時間が PLL 内の LPF の時定数よりも短い場合（100 秒未満）については、TCXO の周波数雑音の影響が支配的であり一定の傾きを持っている。が、また、雑音源に関して、基本的には発振器の周波数雑音の影響が支配的であるが、低 CN 比の場合には、熱雑音の影響が加算された形となっている。図より 1 日以上の大期間の観測においても最大時刻誤差は数百 ns に抑えられており、安価な TCXO を精度の高い周波数基準として使用可能であることがわかる。

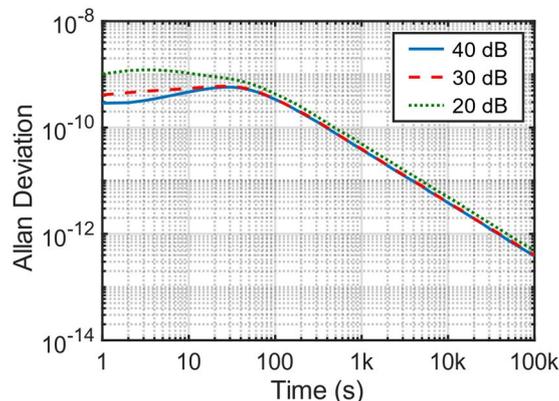


図2: 発振器出力周波数のアラン偏差

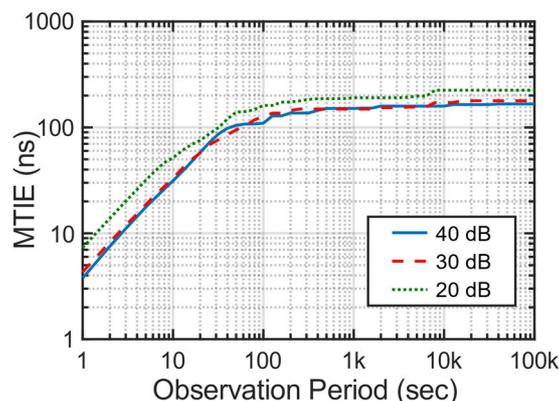


図3: 端末側タイミングのMTIE

(2) 時刻同期技術

ネットワーク中でのパケットの遅延ゆらぎのモデルとしてよく知られているガンマ分布を適用しシミュレーション評価を行った。但し、シミュレーションを実施するにあたり、ガンマ分布のパラメータを 1 秒ごとにランダムに変化させることにより非定常性をエミュレートしている。シミュレーションでは、遅延ゆらぎの平均値を $200\mu\text{s}$ とし、時刻同期用パケットを毎秒 10 パケット送信するものとし、10,000 秒分のデータを取得している。観測時間をパラメータとして変化させ、移動平均を 1 秒ごとに取ることにより評価する。観測時間ごとの遅延時間の平均値の分布を図 4 に示す。図より観測時間を長くすることにより平均遅延時間のゆらぎが小さくなっていることが分かる。これは、非定常性の影響が長時間観測することで平均化されて高精度化できることを示している。例えば、10 秒間の平均の場合 $30\mu\text{s}$ 程度の標準偏差のゆらぎが生じているのに対して、1000 秒間では $3\mu\text{s}$ 程度に抑圧できている。観測時間をさらに長くすることにより更なる高精度化できるように思えるが、実際には長くなればなるほど非定常性の影響が大きくなるため、高精度化は難しい。このため、本方式による時刻同期のオフセットは数 μs となる。トラヒックの 1 日単位での変動を考えると、毎日定時に一定時間観測を行い、それらを平均化することで高精度化が図れると考える。

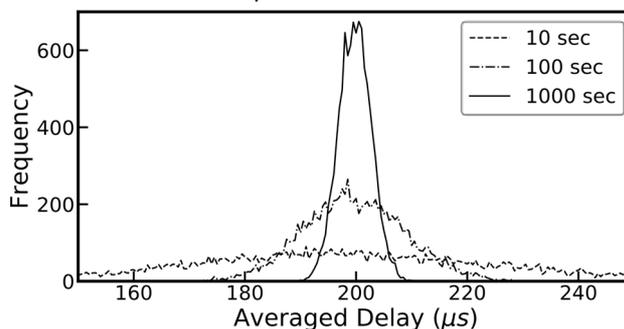


図4: ネットワーク遅延時間の平均値のゆらぎ

(3) ホールドオーバー時の安定動作技術

ホールドオーバーの評価系について、市販の安価な部品を用いた簡易な構成とした。発振器としては市販の低コスト VCTCXO を用いており、最大 $\pm 3\text{ppm}$ の温度による周波数変動がある。発

振器の制御電圧はカウンタ値をベースにマイコン (Raspberry Pi) で演算処理し、DA コンバータ出力として供給する。DA コンバータは 12 ビットであるが、信号処理により 16 ビット相当で動作させ、1 秒ごとに発振器の制御電圧値を変化させている。また、発振器の温度はサーミスタの両端電圧としてモニタし、12 ビットの AD コンバータ

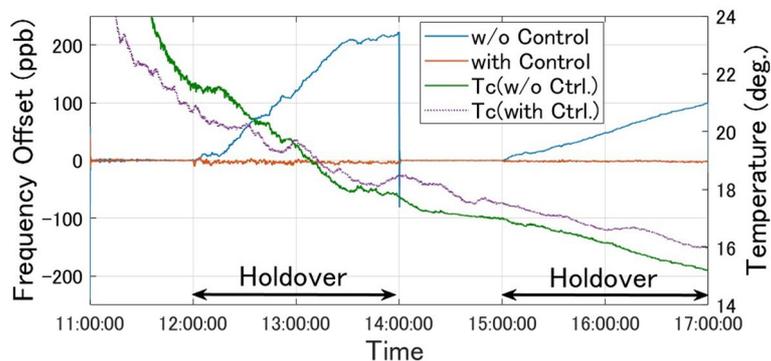


図5: ホールドオーバー時の周波数変動

でデジタル化しマイコンに転送する。実験では 3 時間周期で最初の 1 時間を同期状態とし、その後の 2 時間をホールドオーバー動作としている。温度に基づく制御について、同期状態で温度を変化させ、温度と制御電圧の関係を測定し、その結果に基づいてホールドオーバー時の制御電圧を決定している。図 5 に温度変化時の特性を示す。図より、温度に基づいた制御をしない場合、VCTCXO 筐体の 4 の温度変化に対して 200ppb の周波数変動があるのに対して、制御する場合には変動は 10ppb 未満に抑圧されていることがわかる。このようにして、ホールドオーバー時においても 2 時間以上にわたり周波数を高精度に維持できることが明らかとなった。

< 引用文献 >

- Time-Sensitive Networking (TSN) Task Group, <https://1.ieee802.org/tsn/>, 2022.
- Bruggemann, T.S., Greer, D.G. and Walker, R., "Chip Scale Atomic Clocks: Benefits to Airborne GNSS Navigation Performance," IGNSS Symposium, 2006.
- ITU-T Recommendation G.810, Definitions and Terminology for Synchronization Networks, 1996.
- Hadzic, I., Morgan, D. R., "On packet selection criteria for clock recovery," IEEE ISPCS, 2009.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 桑野茂
2. 発表標題 エッジ端末用発振器のホールドオーバー動作でのネットワークベースの周波数オフセット削減
3. 学会等名 令和4年電気学会全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松本直哉, 吉田悠里, 桑野茂
2. 発表標題 簡易GNSS受信モジュールを用いた時刻基準に関する検討
3. 学会等名 令和3年度 電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉田悠里, 松本直哉, 桑野茂
2. 発表標題 簡易RTK-GNSS基準局を用いた屋外測位に関する検討
3. 学会等名 令和3年度 電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 桑野茂
2. 発表標題 エッジ端末用低コスト発振器のホールドオーバー動作に関する一検討
3. 学会等名 令和3年電気学会全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 原裕貴，都築康徳，長屋亮輔，桑野茂
2. 発表標題 簡易GPS モジュールを用いたTSN 用時刻基準の検討
3. 学会等名 令和元年度 電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高田響，佐藤祐樹，中村嵐，花井秀行，桑野茂
2. 発表標題 VLANフレームを用いたフレームプリエンプションの検討
3. 学会等名 令和元年度 電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 桑野茂，中山悠，久野大介，丸田一輝，吉本直人
2. 発表標題 PON下り区間における低ジッタ転送に関する検討
3. 学会等名 2019年電子情報通信学会通信ソサイエティ大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 桑野茂，中山悠，久野大介，丸田一輝，吉本直人
2. 発表標題 LAN内でのNTPを用いた高精度時刻同期に関する検討
3. 学会等名 2020年 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------