

無線 LAN における高精度時刻同期方式の検討と実験

日山 雅之[†] 山崎 克之^{†‡} 森田 裕一[‡] 篠原 雅尚[‡] 金沢 敏彦[‡]

[†]長岡技術科学大学 〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1

[‡]東京大学地震研究所 〒113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1

Contact : masah [at] stn.nagaokaut.ac.jp

あらまし 本研究では、アプリケーションレベルではなくハードウェアレベルでクロック同期を行う IEEE 1588 高精度時刻同期方式 (PTP) の無線 LAN において実現することを目的とする。地球環境観測の分野では、広範囲に計測ノードを配置することから、計測ノード間のネットワークとしては有線よりも無線が適している場合が多い。このように広範囲に配置されたネットワークでは、分散配置された各計測ノードで取得されたデータの間でのタイムスタンプのずれが分析・解析の精度に大きく影響するため、計測ノード間の時刻同期が必要である。しかし現在、要求される同期精度を満たすことができる無線システムでの時刻同期技術は存在しない。そのため、IEEE2588 高精度時刻同期方式(PTP)を無線 LAN システムに実装する。本稿では研究の第一段階として、基本部分の設計と実装を行い、同期精度についての実験と評価を行ったのでその概要を報告する。
キーワード 無線 LAN, 時刻同期, NTP, PTP, IEEE 1588

Implementation of precision clock synchronization protocol to IEEE802.11

Masayuki Hiyama[†], Kathuyuki Yamazaki^{†‡}, Yuichi Morita[‡], Masanao Shinohara[‡], Toshihiko Kanazawa[‡]

[†]Nagaoka University of Technology, 1603-1 Kamitomioka-cho, Nagaoka City, Niigata, 940-2188

[‡]Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 1-1-1, Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0032

Contact : masah [at] stn.nagaokaut.ac.jp

Abstract In the field of environmental observations and measurements, a network is often constructed with wireless LANs because a lot of nodes are set up in a wide range. The time synchronization between measurement nodes is important in those wireless LANs, since the clock synchronous accuracy among nodes is critical to analysis of measured results. It is, however, difficult to have such a high accurate synchronization in wireless LANs. This paper proposes a design and implementation of IEEE1588 (Precision Time Protocol, PTP) within wireless LANs. As the first step, basic messages and processes of IEEE1588 is developed, and an experiment shows that the proposed method realizes the timing shift between master and slave clocks to be about 2.64 μ s.

Keyword Wireless LAN, Clock Synchronization, NTP, PTP, IEEE 1588

1. はじめに

地球温暖化や世界各地で頻発する地震や火山噴火などへの対処として地球惑星科学分野の研究が活発となっており、その観測ネットワークの構築手法として IP 技術への期待が高まっている^[1]。

地震や火山観測などの分野では無線ネットワークによって計測拠点を接続することが有効であるが、計測拠点間のクロックを正確にあわせることが難しいという課題がある。IP ネットワークで広く使われている NTP (Network Time Protocol) はアプリケーションレベルでの同期方式であり、地震や火山観測で要求するクロック同期精度は得られない。

本研究は、アプリケーションレベルではなくハードウェアレベルでクロック同期を行う IEEE 1588 高精度

時刻同期方式 (Precision Time Protocol, 以下 PTP) を無線 LAN で実現することを目的とする。目標とする時刻同期精度は 10 μ 秒未満であり、これを無線 LAN の MAC ファームウェアとクロック回路で実現する。

本稿では、この研究の第一段階として、無線 LAN で PTP を実現するための基本部分の設計と実装を行い、評価実験の結果、マスター・スレーブ間のタイミング同期を 2.64 μ 秒の精度で実現することができたので、その概要を報告する。

2. 研究の背景と目的

2.1. 無線 LAN の高精度時刻同期への必要

地球環境観測の分野では、広範囲に計測ノードを配置することから、計測ノード間のネットワ

ークとしては有線よりも無線が適している場合が多い。また、地震発生や火山噴火の後の臨時的観測ネットワークの構築にも、タイムリーに設置できる無線が適している。

このように広範囲に配置されたネットワークで重要なのは、計測ノード間の時刻同期である。分散配置された各計測ノードのデータ（多くは3軸の加速度）はタイムスタンプ付で集められて分析・解析されるが、各データ間のタイムスタンプのずれは分析・解析の精度に大きく影響する。現在、地震や火山観測では1kHz（1m秒毎）のサンプリングが必要であることから、各計測ノード間の時刻同期のずれは、2桁オーダの精度、すなわち、10 μ 秒未満であることが必須の要求条件である。

このような高精度時刻同期の実現方法として、例えば、計測ノード毎にGPS受信機をつける、という方式があり、実際に使われてもいる。この方式には以下の難点がある。

- 計測ノード毎に捕捉するGPS衛星（複数個）が異なる場合があり、全ての計測ノードが同一のGPS衛星を使わないため、時刻同期にずれがでる場合がある。
- 一つの計測ノードで捕捉するGPS衛星が時間的に変わる場合、あるいは捕捉できない場合（山陰など）などでは、時刻の瞬間的なシフトが起こることがある。
- 上記のような時刻のずれがあると、データの分析・解析の誤差となる。さらには、時刻のずれが生じていることの判断が難しい。
- 計測ノードにGPS受信機を備えると消費電力が大きくなり、観測可能時間などへの影響が大きい。

以上のように、地震や火山観測で重要なのは、（時刻そのものの精度ではなく）、全ての計測ノードが同一時刻に同期して計測すること、である。すなわち、図1に示すような形態、GPS衛星の時刻をマスター計測ノードが受信し、スレーブの計測ノードに配信する形態、が望ましい。特に、各観測点でGPS受信機が不要になれば消費電力が大幅に低減され、電源確保の難しいフィールドで電池で長時間の観測ができる。ここで、例えば火山観測を例にすると、設計条件としては、スレーブの数は10-20台程度、クロックのスレーブ間タンデム中継ができること、などがあげられる。

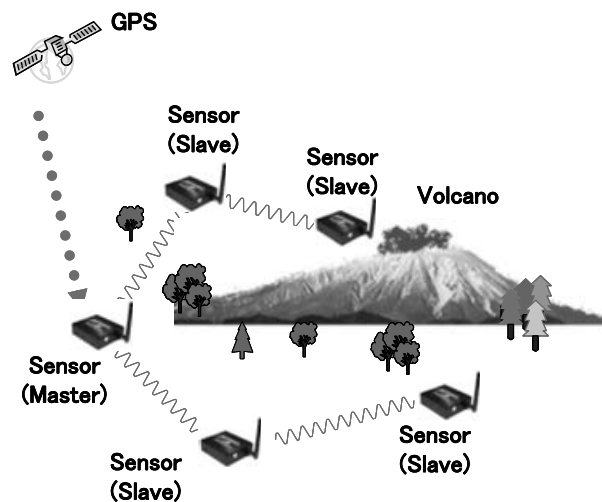


図1 火山観測ネットワークの実現例

2.2. 高精度時刻同期方式の現状

最も広く使われているクロック同期プロトコルはNTP (Network Time Protocol)である^[2]。NTPはアプリケーションレベルでタイムスタンプを作成し、片道伝送遅延を計算した上でクライアントのクロックをサーバに同期させる。NTPでは片道伝送遅延が一定であっても、アプリケーション層から物理層までの処理時間の変動により、クロック同期の精度は10m秒オーダ程度しか得られない。また、ソフトウェアからクロックを設定する場合、ホストインタフェースに起因する処理時間変動（割込処理など）から、同様にクロック同期精度は10m秒オーダ程度しか得られない。なお、本研究の予備実験として、同一システム構成を用いてソフトウェアで時刻同期を行った場合の精度を評価したので、その結果を【参考】に報告する。

このような問題を解決するためIEEE1588として高精度時刻同期方式(PTP)が標準化された^[3]。PTPの特徴のひとつは、タイムスタンプと時刻同期処理をアプリケーションで行うのではなく、ハードウェアで行うことを前提としていることである。ハードウェア処理とすることにより、アプリケーション処理遅延による誤差がクロック同期に影響することがなくなり、また、ハードウェアから直接クロック回路を設定することにより、高精度のクロック同期を可能にする。

PTPは、有線LANを対象にして一部で実用化されており^[4]、その用途としては、航空機内ネットワーク、軍事利用、高精度のNCなどで構成されるオートメーションシステムなどがある。

本研究では、無線LAN^[5]へのPTPの実装を目的とする。時刻同期を行うためのメッセージ（MACのフレーム）の送信と受信、時刻のオフセット値の計算、クロックへの書込みを、無線LANのMACファームウェアで

処理することにより、 10μ 秒未満の精度でマスター・スレーブ間のクロック同期を実現することを目的とする。なお、無線 LAN としては、屋外利用で実用化が進んでいる IEEE802.11b を対象とする。

2.3. IEEE1588 高精度時刻同期方式の概要

IEEE1588 PTP における時刻同期手順の概要を、図 2 を用いて説明する。PTP の手順は、(1)マスターがスレーブに時刻を送信する手順、(2)マスター・スレーブ間の片方向伝送遅延を計測する手順、の 2 つから構成される。

(1) マスターがスレーブに時刻を送信する手順

- ① 同期元であるマスターは、Sync メッセージを同期する側であるスレーブへ送信し、送信した時刻 (t_0) を取得する。
- ② スレーブは Sync メッセージを受信し、受信した時刻 (t_1) を取得する。
- ③ マスターは取得しておいた t_0 を含んだ Follow Up メッセージをスレーブへ送信する。
- ④ スレーブは Follow Up メッセージを受信し t_0 を取得する。

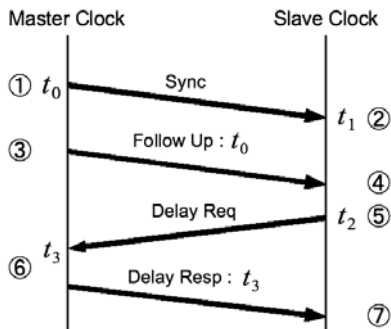


図 2 高精度時刻同期方式 (PTP) のアルゴリズム

(2) 片方向伝送遅延を計測する手順

- ⑤ スレーブは Delay Request メッセージをマスターへ送信し、送信時刻 (t_2) を取得する。
- ⑥ マスターは Delay Request メッセージを受信し、受信した時刻 (t_3) を取得する。 t_3 を含んだ Delay Respond メッセージをスレーブへ送信する。
- ⑦ スレーブは Delay Respond メッセージを受信し、 t_3 を取得する。

スレーブは、式 (1) に従って片方向伝送遅延 (Delay) を、式 (2) でマスターとスレーブの間でのクロック誤差 (Offset) を計算し、Delay と Offset により、自クロックを補正する。

$$Delay = \frac{(t_1 - t_0) + (t_3 - t_2)}{2} \dots (1)$$

$$Offset = (t_1 - t_0) - Delay = \frac{(t_1 - t_0) - (t_3 - t_2)}{2} \dots (2)$$

ここで片方向伝送遅延 (Delay) が時間的に変動しないシステムならば、Delay Request > Delay Respond 手順は初期段階で一度実行するのみであり、時刻同期は Sync > Follow Up 手順によって実現される。

3. 提案方式

3.1. 無線 LAN への IEEE1588 実装方式の提案

今回提案する方式では無線 LAN (IEEE802.11) の MAC ファームウェアに高精度時刻同期方式を実装することで、離れたノード間のクロックをマイクロ秒オーダの精度で同期させることを目的とする。

提案方式のハードウェア構成図を図 2 に記す。ここでは、無線 LAN の MAC ファームウェアは PC カード内に実装されている。無線 LAN カードの上位としては Linuxなどを想定する。IEEE1588 のカウンタは精度確保のためハードウェアとし、MAC ファームウェアが IEEE1588 メッセージの送受を行ってハードウェアカウンタを補正する。なお図 2 はスレーブにおける構成であり、マスターではクロック発信器が GPS 受信機となり、GPS によるクロック同期を行う。

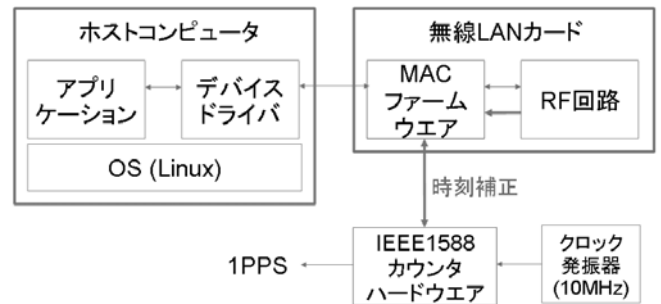


図 2 : IEEE1588 over 無線 LAN の提案方式

3.2. クロック精度評価を主目的とした実装

提案方式でのクロック精度を評価するための実験を行う。このため MAC ファームウェアにおいて IEEE 1588 の Sync, Follow Up メッセージを新規に定義する。さらに、マスターとスレーブに Sync メッセージと Follow Up メッセージの処理、スレーブに同期精度を計算する処理の実装を行う。今回はマスターとスレーブ間の (時刻ではなく) タイミング同期の精度評価を目的とし、Delay Request, Delay Respond メッセージによる片方向伝送遅延計測は実装しない。

本実験にあたって実装した MAC ファームウェア構成

図を図 3 に記す。

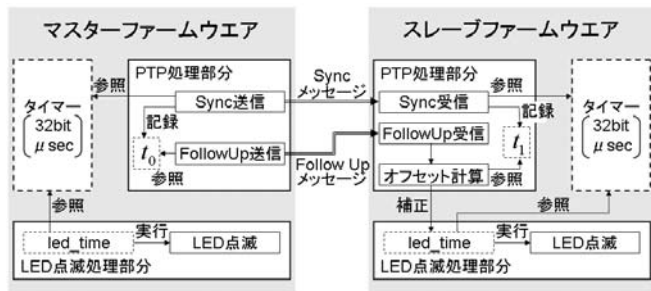


図 3 : 実験用 MAC ファームウェア構成図

今回は評価を目的としたため、タイマとしてハードウェアカウンタを試作することなく、MAC ファームウェア内のタイマを流用した。タイミング精度の計測を行うため、無線 LAN カードに搭載している LED をタイマの値に応じて定期的(0.1 秒間隔)に点滅させ、オシロスコープで観測することとした。

PTP メッセージ処理部分はマスターとスレーブで処理が異なる。マスターでは 1 秒間隔で Sync, Follow Up メッセージを交互にスレーブへ送信する。マスターは Sync メッセージを送信した際に送信時刻を t_0 として記録する。その後、Follow Up メッセージで t_0 を送信する。

スレーブでは Sync メッセージを受信した時刻を t_1 として記録しておき、Follow Up メッセージを受信し t_0 を取得した際に $t_0 - t_1$ を計算する。この値により LED 点滅タイミングを補正する。

今回実装した Sync メッセージと Follow Up メッセージのメッセージフォーマットを図 4 に記す。

(a) Syncメッセージフォーマット

2	2	6						6						4	
フレーム制御	デュレーション	BSSID						送信元アドレス						FCS	
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0

(b) Follow Upメッセージフォーマット

2	2	6				6	2	4	4						
フレーム制御	デュレーション	送信先アドレス	送信元アドレス	BSSID	シーケンス制御	t_0	FCS								
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0

図 4: PTP メッセージフォーマット

Sync メッセージは送信処理の時間変動が時刻同期

精度に関するため、優先的に送信する必要がある。よって設計方針は以下の通りとした。

- MAC フレームタイプとして送信優先順位が一番高い制御フレームとした。
- 送信時の送信レートとバックオフの値は常に一定とした。

Follow Up メッセージは送信処理の時間変動を考慮する必要はない。一方、Sync メッセージ送信時刻である t_0 を格納する必要がある。そのため、設計方針は以下の通りとした。

- MAC フレームタイプは管理フレームとし、フレーム・ボディ部に t_0 の値を格納させた。
- 送信レートやバックオフを固定値に設定しない。

4. 実験と考察

4.1. 実験構成と方法

実験構成を図 5 に記す。実験では、PTP による時刻同期を行わない場合と PTP による時刻同期を行った場合の 2 パターンについて行い、PTP の同期精度について評価した。オシロスコープで各々の LED 点滅を計測し、マスター側の LED 点滅タイミングにトリガーをかけてスレーブ側の LED 点滅タイミングとの差について計測した。

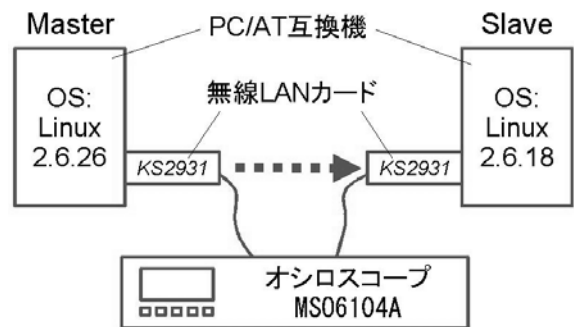


図 5 : 実験構成図

4.2. 実験結果と考察

(1) 同期を行わない場合

PTP による同期を行わない場合での計測結果を図 6 に記す。

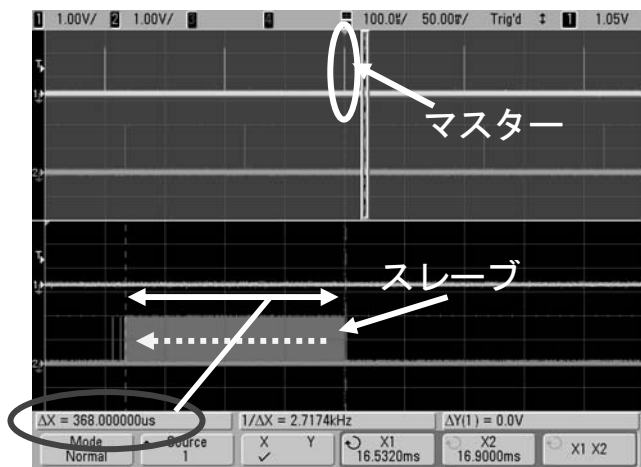


図 6：同期を行わない場合での計測結果

PTP による同期を行わない場合では、スレーブの LED 点滅が中心から徐々に左へ動いて行くこと(図 6 の白い点滅跡が中心から左へと続いている)が観測された。マスターの LED 点滅タイミングに比べてスレーブの点滅タイミングが徐々に早くなっており、マスターのクロックに比べてスレーブのクロックが速いことに起因している。実験では 1 分につき約 9μ 秒早くなって行くことが観測された。

(2) PTP の場合

PTP による同期を行った場合での計測結果を図 7 に、また計測時間軸を拡大して計測した結果を図 8 に記す。



図 7：PTP による同期を行った場合での計測結果

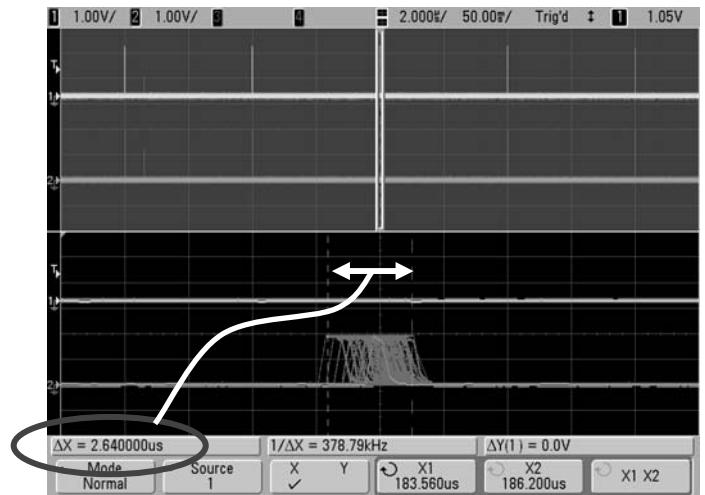


図 8：図 7 の計測時間軸を拡大したもの

PTP によるタイマ同期を行った場合では、マスターの LED 点滅タイミングに対して、スレーブでは 184.88μ 秒ずれた点を中心に、 $\pm 1.32\mu$ 秒の間で点滅することが観測された。スレーブの LED 点滅タイミングの変動は、最大-最小で 2.64μ 秒(図 8 参照)、標準偏差が 0.434μ 秒であった。以上の結果を図 9 と表 1 にまとめる。

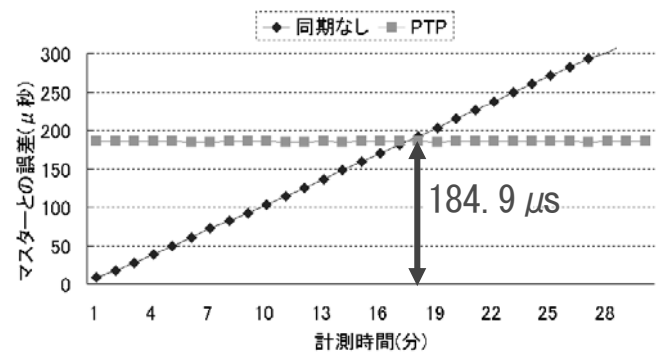


図 9：各同期方法でのタイミング誤差の推移

表 1：タイミング誤差のまとめ

条件	タイミング誤差	
同期なし	1 分に約 9μ 秒のシフト	
PTP による同期	最大-最小	2.64μ 秒
	標準偏差	0.434μ 秒

5. おわりに

本研究では無線によるシステム構築が有効とされる地球環境観測の分野で、観測結果の精度を高めるために必要である各ノード間の高精度時刻同期を実現するため、無線システムのファームウェアに PTP を実装することを目的としている。

本稿では、マスター・スレーブ間のタイミング同期精度の評価を目的に、PTPのSync, Follow Upメッセージの実装方法を提案した。実装したシステムによる実験の結果、マスター・スレーブ間で2.64μ秒の精度でタイミング同期を行うことができた。

今後はDelay Request, Delay Respondメッセージを実装し、片道方向遅延を考慮した同期精度を検討する。また、無線LANカードにハードウェアカウンタを取り付け、ファームウェアからのカウンタ補正の実装、タンデム接続への対応、などの研究を進める予定である。

謝辞 本研究に際し、評価用のMACファームウェアの提供および研究にご協力いただいた(株)ウィビコムに感謝します。

文献

[1] T. Kanazawa, M. Shinohara, O. Sano, S. Sakai, H. Utada, T. Yamada, Y. Morita, T. Yagi and K. Yamazaki, "A New OBSC: Ocean Bottom Cabled Seismometer - IP Goes to the Oceans -", Proc. IEEE OCEANS' 08 (2008-04).

[2] RFC1305, Network Time Protocol (Version 3) Specification

[3] IEEE Standard 1588, "IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems", November 2002.

[4] <http://www.ontimenet.com/>

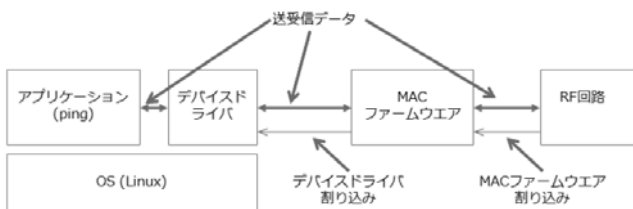
[5] 守倉, 久保田, "802.11 高速無線 LAN 教科書, インプレス R&D", 2008.

参考

アプリケーションレベルで時刻同期を行った場合の精度を評価した実験結果を以下に記す。

(1) 実験概要と構成

実験構成図を図参考-1に記す。



図参考-1：アプリケーション時刻同期実験構成図

Linux で動作しているホストコンピュータで、ソフトウェア (ping) によるデータの送受信を行い、以下の

時点で LED を点滅させることにより時刻を計測した。

- デバイスドライバが MAC ファームウェアへデータを送信した時点
- デバイスドライバが MAC ファームウェアからデータを受信した時点
- MAC ファームウェアが RF 回路へデータを送信した時点
- MAC ファームウェアが RF 回路からデータを受信した時点

(2) 実験結果

実験を行った結果を表参考 1 に記す。

表参考 1：アプリケーション時刻同期実験結果

条件	時刻取得位置	遅延時間(us)		
		最大	最小	精度
送信	デバイスドライバ	472	172	300
送信	MACファームウェア	4.72	4.04	0.68
受信	MACファームウェア	1.24	1.12	0.12
受信	デバイスドライバ	516	484	32

表参考 1 から以下のことが考察される。

- デバイスドライバレベル (アプリケーションレベル) の処理では、送信で 300μ秒、受信で 32μ秒の変動があり、10μ秒未満のタイミング同期は不可能である。
- MAC ファームウェアレベルでの送受信処理の変動は 1μ秒以下である。本稿での実験結果である 2.64μ秒は、PTP メッセージ処理の時間変動、計測のための LED 点滅処理の時間変動が加算されているためと考えられる。