

6 時空標準技術の社会実装を目指して

6 *Application of Space-Time Standards towards Society*

6-1 繋がる^{つな}ついでに高精度時刻同期

6-1 *Precise Synchronization with Consumer Wireless Communication Module*

志賀信泰 安田 哲

Nobuyasu SHIGA and Satoshi YASUDA

原子時計は「究極にズレない時計」であるが、「究極に時刻を合わせやすい」時計を開発したらそれも役に立つのではないか、という動機で本研究を開始した。

私たちは離れた場所にある無線デバイスの時刻を正確に合わせる技術を開発し、無線双方向時刻比較技術 (Wireless Two-way interferometry : Wi-Wi、あるいはワイワイ) と名付けた。ワイワイは日本標準時を協定世界時と比較する際に用いられる、衛星双方向時刻同期の手法を民生用通信機に組み込んだ技術であり、ピコ秒精度の時刻同期を驚きの安価で実現できる。

私達はそのようなモジュールを実際に試作し、高精度な時刻同期ができることを示した。また、ワイワイは時刻同期とともにアンテナ間の距離を高精度に計測することができるポテンシャルを有しており、鉄塔の傾斜による距離変動をワイワイとレーザー測距計で計測し、比較した。

ワイワイを手がかりとして、今後離れたデバイスが「一体化」する技術を開発し、新たなサービスを生み出すことを目指している。

We are developing a clock that is “extremely easy to calibrate,” while the atomic clocks aim for “extremely precise frequency.” We developed a technology to synchronize the frequency and time of two remote clocks using wireless communication, and we named it “Wireless two-way interferometry (Wi-Wi). Wi-Wi is a spin-off technology of two-way satellite time and frequency transfer, and we have developed a proto-type wireless communication module. The module demonstrated the pico-second clock synchronization at extremely low cost.

The Wi-Wi has potential to measure the distance between two modules and time variation of it very precisely. We measured the tiny deformation of a tower with Wi-Wi module and compared the result with laser range finder.

We are targeting that many devices are “Unified” via time synchronization and completely new applications are arose with it.

1 まえがき

世界中どこにいても同じ様に時を刻む時計を作りたい、という思想で原子時計が開発されてきた。原子時計の技術の進歩によって、原子が持つ周波数は非常に正確に計測できるようになり、現在最先端の原子時計は19桁の精度を誇る。これは非常に驚くべきことであるが、その紹介は他稿に譲ることにして、本稿では「時計」というものを違った視点で考える。

私たちが提唱するのは「究極的に合わせやすい時計の開発」である。時計は3つの部分で構成されている

(図1)。一定の周波数で時を刻む振り子と、振り子の振れた回数を数えて時刻として表示する部分と、時刻を合わせる仕組み(時刻合わせ)である。原子時計の開発は「究極的にズレない振り子の開発」であり、時



図1 時計の構成要素

計開発の花形であるが、時刻合わせを簡便にする研究はあまりなされていない点に着目して私たちは研究を進めている。ここで言う「簡便」とは「安くて小さくて使いやすい」ことを意味しており、その実現のために無線通信技術を活用した。「安くて小さい」の部分は既存の民生用無線通信機を活用することで実現した。

2 高精度時刻同期の難しさ

私たちが時刻合わせを行うシーンを思い浮かべて欲しい(図2)。複数の人が壁にある時計を見て自分の腕時計の時刻を合わせるとすると、この2者の時計は壁の時計に対してどれくらいの精度で時刻を合わせることができるだろうか？

ここで人の反射神経を無視することにしても、ズレは必ず生じてしまう。なぜなら私たちが離れたところにある時計の時刻を「見る」とき、時計の映像(信号)が空間を伝搬し目に入るまでに有限の時間がかかるからである。光といえども、1mの距離を進むのに3.3ナノ秒(10⁻⁹秒)かかるので、どう頑張っても

時計からの距離[メートル]×3.3[ナノ秒/メートル]
= 伝搬時間[ナノ秒]

の遅れが生じてしまうのである。

この信号の伝搬に伴う遅延(伝搬遅延)は300m離れても1マイクロ秒にしかならないので、人が時計合わせをする際に気になる遅れではないが、パソコン同士、機械同士が高速に連携を取り合う際には、マイクロ秒レベルで時刻を合わせることで効率を上げることができる。また、電波を用いてミリメートル精度の位置計測をするためにはピコ秒(10⁻¹²秒)精度が必要と

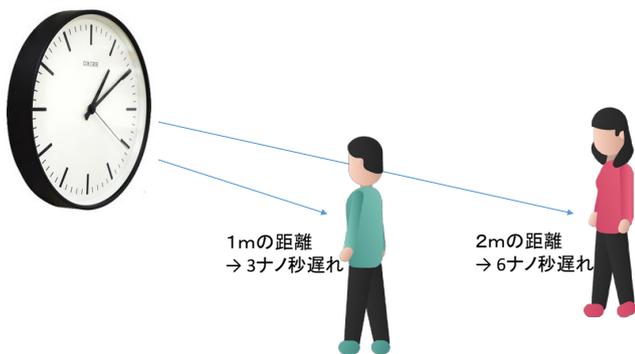


図2 時計合わせの概略図

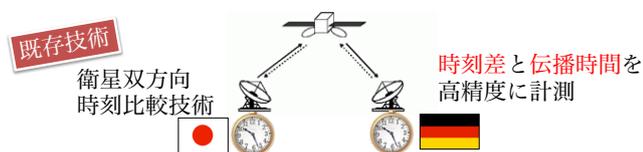


図3 衛星双方向時刻比較の概略図

なる。

この伝搬遅延を修正するために無線双方向時刻比較技術(ワイワイ)が開発された[1]。その原理を次の章で説明する。

3 ワイワイの原理

ワイワイは衛星双方向時刻比較技術をもとに、同じ原理を衛星ではなく無線通信機を用いて実現するという流れで開発された経緯がある。まずは衛星双方向時刻比較技術[1][2]の原理から説明する。

3.1 (衛星) 双方向時刻比較

NICTは日本標準時(JST: Japan Standard Time)を維持し、日本国内に供給する役目を担っているため、JSTが協定世界時(UTC: Coordinated Universal Time)とどれだけ一致しているかをモニターすることも重要な任務である。協定世界時と各国の時計の比較はドイツの研究機関であるPTB(Physikalisch-Technische Bundesanstalt)の時計をハブとして比較することになっているため、私たちもドイツの時計と比較する必要がある(図3)。その際に用いられる手法のひとつが衛星双方向時刻比較である。その手順を説明する。

1. 日本の時刻(T_J)をマイクロ波に乗せて衛星を経由してドイツへ届け、ドイツの時刻(T_G)と比較した際の時刻差を ΔT_G としてドイツ側で記録する。
2. 電波で時刻を届ける際に伝搬遅延が発生するため、 ΔT_G は日本の時刻とドイツの時刻の差 $T_J - T_G$ に伝搬時間 t_b を加えたものとなる。

$$\Delta T_G = (T_J - T_G) + t_b$$

3. t_b を求めるためにドイツからも時刻を日本へ送り、日本の時刻との差を ΔT_J として日本で記録する。
4. ΔT_J はドイツの時刻と日本の時刻の差 $T_G - T_J$ に同じく伝搬時間 t_b を加えたものとなる。

$$\Delta T_J = (T_G - T_J) + t_b$$

5. 日本とドイツで計測した時刻差の差を取ると伝搬時間 t_b がキャンセルして $T_G - T_J$ が計算できる。

$$T_J - T_G = (\Delta T_G - \Delta T_J)/2$$

6. また、日本とドイツで計測した時刻差の和を取ると時刻差 $T_G - T_J$ がキャンセルして t_b が残る。

$$t_b = (\Delta T_G + \Delta T_J)/2$$

以上が双方向時刻比較により正確な時刻差と伝搬時

間を計測する仕組みである。電波を双方向に送り合せて、両側で計測した値を手にする事で時刻差と伝搬時間の両方を計測することができるのである。

3.2 無線双方向時刻比較

ワイワイ [3][4] は前節で説明した双方向時刻比較を民生用無線通信機に実装することにより衛星双方向時刻比較で実績のある時刻同期技術を非常に安く、小さなモジュールへの搭載を可能にした。もちろん同期エリアは電波の届く範囲に限定されるが、衛星双方向時刻比較と遜色ない同期性能を示した。

衛星双方向時刻比較では搬送波位相を双方向に比較して周波数を高精度に比較する手法と時刻を比較する手法の2つがあり、ワイワイでも両方の手法を活用している。ワイワイにおいては、まずマスターモジュールとスレーブモジュールの搬送波位相を比較して、両者の搬送波位相の頭が揃うようにスレーブモジュールの内部時計の周波数を微調整する(位相ロック)。位相ロックが成立すると、離れた2箇所にある時計が電波の往復を介して全く同じ周波数で時を刻むようになる。位相ロックが成立した状態で今度は時刻をやり取りして時刻差を計測、修正する。時刻の差は位相ロックが続く限りずれることはないので、正確な時刻比較が可能となる。この時刻合わせは並走している2台の車(例えばスレーブ車とマスター車とする)の頭を揃える作業に例えることができる。ここでそれぞれの車の位置は時刻、スピードは周波数に対応する。スレーブ車はマスター車の位置を見て、自分が遅れていれば加速し、進みすぎれば減速することで常にマスターの車と同じ位置を走り続けることができるのである。これと同じ仕組みのフィードバック機構をワイワイモジュールは実装している。

4 ワイワイモジュール

ワイワイモジュールの構成について図4を用いて説明する。

ワイワイモジュールのコアとなるのは通信チップ(Tx, Rx)と恒温槽型水晶発振器(OCXO: Oven-Controlled Crystal Oscillator)とマイコン(MPU)である。TxとRxには周波数920 MHz帯でIEEE802.15.4 g規格に準拠した民生用通信チップを改造して用いた。通信チップ、OCXO、スイッチをマイコンで制御し、またそのマイコンで各種データをUART経由でUSB接続したPCに送ることができる。このモジュールをスレーブとしてマスターに位相ロックする際にはワイワイによって得たフィードバック信号をOCXOに帰すように、マイコンが制御を行う。

電波法に基づく無線機の技術基準適合証明を取得し、誰もが自由に使える式号機と、高出力にして簡易無線局の登録が必要な参考機を試作した。ワイワイモジュールの仕様を表1にまとめた。

実際に位相ロックをしながら時刻同期のジッタをワイワイ位相比較計測値から評価すると、20ピコ秒であった[5]。時刻同期精度はモジュールのデジタル回路のバグにより制限されており、今後改善の余地がある。

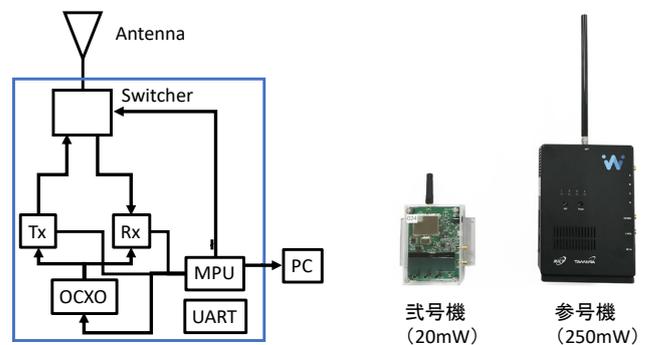


図4 ワイワイモジュール回路ブロック図と式号機及び参考機の写真

表1 ワイワイモジュール仕様まとめ

	式号機	参考機
周波数	922 ~ 928 MHz	
通信規格	IEEE802.15.4 g 準拠(周波数変調)	
出力ワット数	20 mW	250 mW
通信確認距離(見通し有)	100 m(地上 1.5 m)	4 km(塔の上同士)
出力信号	10 MHz と 1 pps	
PCとのインターフェース	USB シリアル通信	
時刻同期精度	1 マイクロ秒	
時刻同期ジッタ (位相ロックジッタ)	20 ピコ秒	
距離変動計測偏差	6 mm/計測(ベストエフォート)	

5 伝搬時間計測の応用例：インフラ変形モニター

私達が第一に目指しているのは「繋がるついでに時刻同期」を実現し、新しい情報通信の基盤を構築し、時空間同期に基づく新しいサービスを生み出すことであるが、その実現には事業開発、標準化、法整備、国際連携を同時に進める必要がある。事業開発のヒントとなる実験を紹介する。

ワイワイの伝搬時間計測は、微小距離の時間変動を計測するポテンシャルを持っている。伝搬時間に光速をかけることで距離が計測できるため、理想条件下では、ワイワイの位相計測により伝搬距離の時間変動を精密に測ることができる。「理想条件下では」と言うのは、

1. 電波の反射・マルチパスなど電波伝搬環境が変わること
2. アンテナの相対的な角度が変わること

により計測される位相が変動するため、精密な測定が

可能となるのはそのような誤差要因が問題とされない実験環境に制限されるからである。

このような理想的な条件を満たす応用例として、文献 [5] では 4.2 km 離れた 2 地点間の大気屈折率変動計測を報告した。本稿では鉄塔頂上の微小変動計測を行った結果を紹介する。

図 5 に 60 m の鉄塔の傾斜を計測した際の実験装置の配置を示す。

この実験は情報通信研究機構 (NICT) 本部にて 2017 年 3 月に行われ、この当時はまだワイワイモジュールを用いず、920 MHz の通信機とソフトウェア無線機の組合せで屋外実験を行っていた。ワイワイモジュールにより距離変動を計測した結果を、建設現場で実績のあるレーザー測距計 (ニコントリプル NST-305 CN) による計測結果と比較した (図 6)。

ワイワイとレーザー測距の結果を見ると、毎日正午ごろに 2 cm ほど距離が短くなっていることが分かる (距離変動は反転軸になっている)。これは、日が昇る

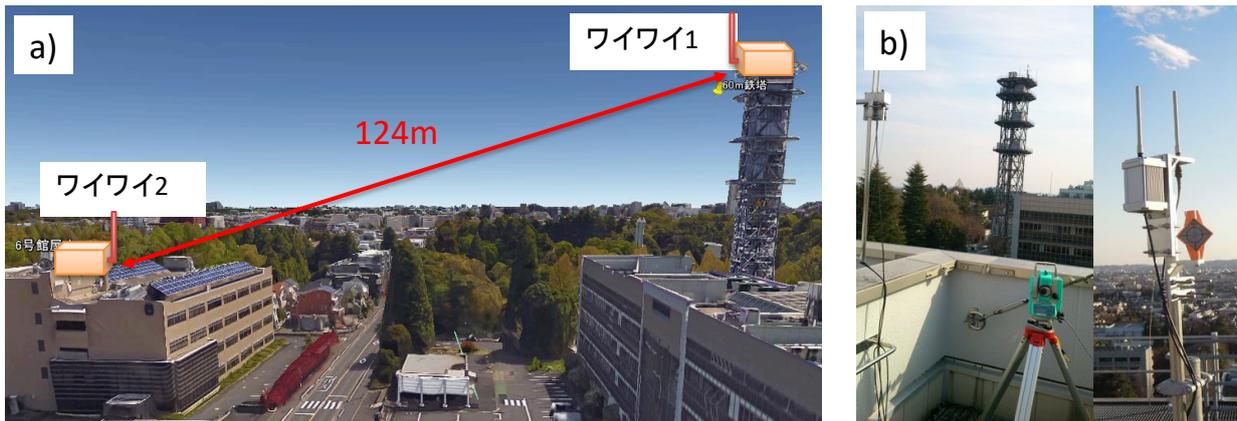


図 5 鉄塔傾斜計測 実験配置図
a) サイドビュー b) 実験装置

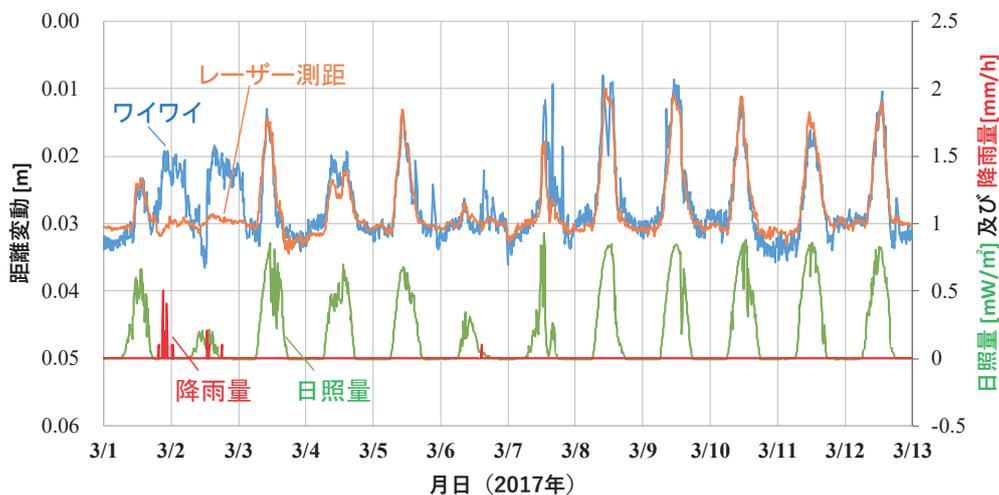


図 6 計測結果

と鉄塔の南側の鉄骨が温められ、陰になっている北側の鉄骨よりも膨張した結果、鉄塔が僅かに2 cm 北側へ傾斜したためであると考えている。日照量をNICTで計測した結果と比較すると、日照量が少ない日は変動も小さいことが見て取れる。ワイワイとレーザー測距計の値はほとんどの場合数ミリメートルで一致しているが、降雨の直後はエラーが最大1 cm 程度まで大きくなる。これは、降雨により反射や遅延等の電波伝搬環境が変わるためであると考えているが現時点で確証はない。

このように、ワイワイを用いてインフラの変形をモニターできる可能性があるが、反射波等電波伝搬環境の変化により影響が出る条件を明らかにしていく必要がある。

6 展望

今まで離れたところにある時計は程度の差こそあれ、ズレているのが当たり前であった。しかし集積回路の進歩等により通信機が精密時刻同期を行えるようになった今、時刻同期を整備することで通信や分散化のオーバーヘッドを極端に減らすことができるようになるかもしれない。本試作モジュールは1台あたり数十万円程度で製作できる。今後事業化されれば単価が大幅に下がることが期待できる。これからも、精密時刻同期を整備した通信基盤へと移行する活動を続け、情報通信インフラを次のレベルへと持ち上げる手助けをしていく。そのためには技術開発だけでなく、情報通信基盤インフラの移行管理のために既述の事業開発、標準化、規制整備、国際連携を異分野の方々と連携して進めていく必要がある。この活動を通して新たなワクワクを生みだすことを目指している。

謝辞

本研究はJST さきがけ(Grant No. JPMJPR14 D5)の支援を受けて開始いたしました。また、NICTの多くの方の多彩なサポートによりこれまで研究を続けられたことにこの場をお借りしてお礼申し上げます。

【参考文献】

- 1 D. W. Hanson, "Fundamentals of two-way time transfers by satellite," Proc. of the 43rd Annual Symposium on Frequency Control, pp.174-178,1989.
- 2 M. Fujieda, T. Gotoh, F. Nakagawa, R. Tabuchi, M. Aida, and J. Amagai, "Carrier-phase-based two-way satellite time and frequency transfer," IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control, vol.59, pp.2625-2630, 2012.
- 3 N. Shiga, K. Kido, S. Yasuda, B. Panta, Y. Hanado, S. Kawamura, H. Hanado, K. Takizawa, and M. Inoue, "Demonstration of wireless two-way interferometry (Wi-Wi)," IEICE Communications Express, vol.6,

no.2, pp.77-82, 2016, <https://doi.org/10.1587/comex.2016XBL0181>.

- 4 B. Panta, K. Kido, S. Yasuda, Y. Hanado, S. Kawamura, H. Hanado, K. Takizawa, M. Inoue, and N. Shiga, "Distance Variation Monitoring with Wireless Two-way Interferometry (Wi-Wi)," Sens. Mater., vol.31, no.7, pp.2313-2321, 2019.
- 5 S. Yasuda, R. Ichikawa, Y. Hanado, S. Kawamura, H. Hanado, H. Iwai, K. Namba, Y. Okamoto, K. Fukunaga, T. Iguchi, and N. Shiga, "Horizontal atmospheric delay measurement using wireless two-way interferometry (Wi-Wi)," Radio Science 54 (2019), <https://doi.org/10.1029/2018RS006770>



志賀信泰 (しが のぶやす)

電磁波研究所
時空標準研究室
主任研究員
博士(物理学)
時空間同期、原子時計、量子情報、
イオン層プラズマ、プラズマ物理



安田 哲 (やすだ さとし)

電磁波研究所
時空標準研究室
研究員
博士(理学)
時空間同期、原子時計、プラズマ物理