

5-2 TWCP —搬送波位相利用衛星双方向比較—

5-2 TWCP — Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer using Carrier-Phase —

藤枝美穂 田渕 良 相田政則 後藤忠広

Miho FUJIEDA, Ryo TABUCHI, Masanori AIDA, and Tadahiro GOTOH

我々は遠距離間の時刻・周波数比較測定の精度向上を目標として、搬送波位相利用技術 (TWCP) を開発し実験を行ってきた。また TWCP 技術を実現するためモデムを新規開発し、海外機関との実証実験を開始した。新規開発したモデムを広く展開し比較測定の高精度化を進め、協定世界時の精度向上に貢献したいと考えている。

We established Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer using Carrier-Phase (TWCP) techniques aiming at the improvement of time and frequency transfer stability in long baselines. Additionally, a new TWSTFT modem has been developed to realize TWCP techniques. We have just started a demonstration by using the newly developed modem with an overseas institute. Our future goal is contribution to improvement of the Coordinated Universal Time by advance of time-transfer stability through distribution of the new modem.

1 まえがき

離れた場所に設置された原子時計を用いて時系を生成する場合、あるいは周波数標準の値の一致度を検証する場合に必要なのが、時刻・周波数比較測定である。ヨーロッパ大陸では、光ファイバを使った超高精度周波数伝送や時刻伝送の研究が盛んに実施されている [1][2]。NICT においても約 60 km の光ファイバリンクにおいて実験を行っている [3]。しかし残念ながら、日本においては光ファイバの高額なレンタル費用がハードルとなっており、長基線での実験は実現されていないのが現状である。一方、世界に約 300 台存在するセシウム原子時計を用いて生成されている協定世界時には、視野が広く大陸間の測定も可能となる、静止衛星経由及び GNSS など測位衛星経由の比較法が用いられている。前者が本稿で扱う衛星双方向時刻・周波数比較 (衛星双方向と略す) である。後者が衛星からの信号を受信して行う片方向方式であるのに対し、前者は地球局から信号を送受信する双方向方式である。片方向方式では信号の伝播経路上の幾何遅延や大気による遅延変動をモデルによって補正するのに対し、双方向方式では相対する地球局間の伝播経路が等しくなるためそれら遅延変動を相殺することが可能となる。結果として片方向方式より高精度な比較を可能とする。また衛星軌道の影響も相殺される。この衛星双方向方式は 1970 年代に実現され数ナノ秒と

いう高い計測精度を達成した [4]。現在の協定世界時のための比較ネットワークではチップレート 1 MHz のコード位相による衛星双方向測定が行われ、その計測精度は約 0.5 ナノ秒である。

図 1 に典型的な衛星双方向地球局と時刻比較用 GNSS 受信機の構成を示す。衛星双方向では送信を行うことから、誤差要因が少ないことに反してシステムを構成する装置数が多く、システムが高額となる。また商用静止衛星を使用する場合、衛星回線のレンタル費用も必要であり、必要経費のうち衛星回線費が支配的である。このように衛星双方向では GNSS 比較と

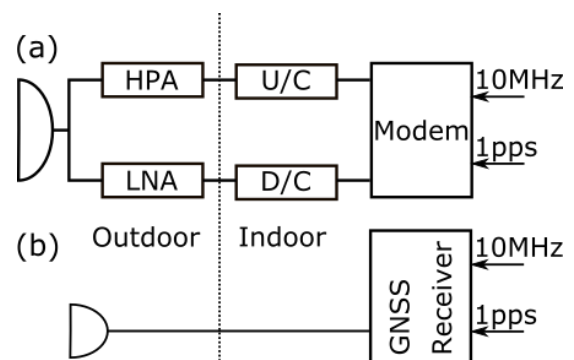


図 1 システム概略図

(a) 衛星双方向地球局 口径 2 m 程度のパラボラアンテナが用いられることが多い。HPA: High Power Amplifier, LNA: Low Noise Amplifier, U/C: Frequency Up Converter, D/C: Frequency Down Converter. (b) 時刻比較用 GNSS 受信機 アンテナ径は数十 cm 程度である。

比べ高額な費用が必要とされる。NICT では 8 つの受信チャンネルをもつモデム（衛星双方向で用いられる信号送受信機を意味する）を開発し、同じ周波数帯域を同時に複数の地球局で使用し周波数の効率化による回線費負担の軽減を進めてきた [5]。GNSS 比較では、受信機がマルチチャンネル化し平均化により計測精度数ナノ秒を達成した後に、搬送波位相利用が時刻比較に取り入れられ計測精度はサブナノ秒へと向上している [6]。一方、衛星双方向方式においても 2004 年にアメリカ海軍天文台 (USNO) が搬送波周波数利用を提案した [7]。USNO は計測精度をピコ秒以下へ向上させることに成功したが、中長期の不安定性を取り除くことができなかった。その後複数の研究機関において搬送波位相または周波数利用の研究が継続されたが、実証にまでは及ばなかった [8]。その原因としては、多くの研究機関で用いられている衛星双方向モデムが搬送波周波数を出力するのみであり、かつその分解能と確度が不足していたためではないかと考えられる。

NICT では、衛星測位の基礎実験を目的として 2006 年に打ち上げられた ETS-VIII 衛星経由の時刻比較実験を L バンド、S バンド周波数の搬送波位相によって実施し、初めて GPS 比較法による結果との一致を実証した [9]。さらに雨谷らは数 100 kHz という狭帯域の信号 2 つを離れた周波数に配置することにより、コード位相チップレートを実効的に上げることに等しい複疑似雑音方式の衛星双方向技術を開発した [10][11]。NICT と台湾の間で行われた実験では、20 MHz 離れた信号による群遅延検出により 30 ピコ秒の計測精度を達成し、GPS 搬送波位相利用と遜色ない結果を得ている [12]。この方式は計測精度の向上と衛星回線費の低減を実現する有望な方式であるが、2 つの信号をどのくらい離して配置できるかは衛星帯域の使用状況に依存してしまう。様々な周波数配置に対応するため、この実験では汎用の任意波形発生器とアナログ-デジタル変換器を用いて実施された。このように搬送波位相利用の理論と位相検出のためのツールの双方を手にした我々は商用静止衛星を用いた搬送波位相利用衛星双方向 (TWCP) の実験を開始した。初めは国内の地球局間で実験を始め、サブピコ秒の計測精度が可能であることを確認した [13]。次いでドイツ物理学研究所 (PTB) との間約 9000 km の基線において衛星経由で初めての光格子時計比較を実施した [14]。また大阪大学との間では光イオン時計から生成されたマイクロ波をリファレンスとし仲介時計不要の計測に成功し、高価な水素メーザー原子時計がなくても光周波数の評価が可能であることを示した [15]。この実験は、可搬型地球局を大阪大学に設置し実施された。海底光ケーブル利用がまだまだ容易でない現在の日本

では、海外の周波数標準と比較するためには視野の広い衛星経由等の比較法を使わざるを得ない状況にあるが、ワイヤレスであるからこそ柔軟に実験場所を選択することが可能である。また最近では韓国物理標準研究所 (KRIS) との間で、僅か 12 時間の計測時間で 10^{-16} 乗台の光格子時計比較に成功している [16]。我々は、TWCP 技術を広く展開し、長らくの間停滞していた衛星双方向技術の計測精度を底上げするために、コード及び搬送波位相双方による測定を実現するモデムを開発したところである。このように NICT では、1970 年代から衛星双方向技術の開発に力を入れ、この分野を牽引してきた。本稿では、2 において TWCP 技術の概略とその計測精度を、3 において新規に開発したモデムについて紹介する。4 にまとめと今後の展望を述べる。

2 TWCP

2.1 TWCP による時刻差計測

地球局 A, B がそれぞれの局のリファレンス信号 (10 MHz 及び 1 pps) を基に同時に信号を送受信する。それぞれの地球局は自分が送信し衛星から折り返された信号及び相手局が送信した信号の 2 種類の信号を受信する。合計 4 種類となる受信信号の搬送波位相を用いて、未知であるパラメーター：衛星のトランスポンダで付加される位相及びそれぞれの地球局と衛星間のドップラ周波数をキャンセルする。最終的に地球局 A, B 間の時刻差 $\tau_A(t) - \tau_B(t)$ は以下のように表すことができる [17]。

$$\begin{aligned} \tau_A(t) - \tau_B(t) = & \left(\frac{\omega_u + \omega_d}{4\omega_u\omega_d} \right) [\varphi_{AB}(t) - \varphi_{BA}(t)] \\ & - \left(\frac{\omega_u - \omega_d}{4\omega_u\omega_d} \right) [\varphi_{AA}(t) - \varphi_{BB}(t)] \\ & + \frac{1}{2} \{ [I_d^A(t) - I_u^A(t)] - [I_d^B(t) - I_u^B(t)] \} \quad (1) \end{aligned}$$

ここで ω_u, ω_d はアップリンク、ダウンリンクの角周波数、 $\varphi_{AB}(t), \varphi_{BA}(t)$ は地球局 A が送信し地球局 B が受信した信号の搬送波位相及びその逆、 $\varphi_{AA}(t), \varphi_{BB}(t)$ は地球局 A の送受信信号の搬送波位相及び地球局 B の送受信信号の搬送波位相を示す。また、 $I_u^A(t), I_d^A(t)$ は地球局 A と衛星間のアップリンク及びダウンリンク周波数における電離層遅延量を表し、 $I_u^B(t), I_d^B(t)$ は地球局 B と衛星間の電離層遅延量である。電離層遅延量は周波数依存性があるため、アップリンク周波数とダウンリンク周波数が異なる衛星双方向方式においてキャンセルされることはない。従来のコード位相による衛星双方向ではその計測精度

と比較し無視できるものとされ、通常では電離層遅延量補正は行われていない。しかしながら計測精度サブピコ秒の TWCP においては、電離層遅延量の補正が必要となる。電離層遅延量はそれぞれの地球局上空の電離層全電子数 (TEC : Total Electron Content) を用いて計算可能であり、TEC は日本のみ、ヨーロッパのみといったローカルなマップや全地球を網羅するマップなどから取得可能である。詳細は [17] を参照いただきたい。

商用静止衛星では通常アップリンク周波数が 13 ~ 14 GHz、ダウンリンクが 11 ~ 12 GHz である。このため、式 (1) の係数 $((\omega_u + \omega_d) / 4\omega_u \omega_d)$ は 10^{-12} 台の数値となる。よって、搬送波位相が 0.1 radian の精度で決定できれば、地球局 A, B の時刻差はサブピコ秒での計測が可能となる。

2.2 TWCP の計測精度

図 2 に TWCP による計測精度を示す。緑線以外が衛星経由の測定により得た結果である。青線は水素メーザー原子時計間の測定結果、黒線は日本とドイツの標準時間の測定結果であり、それぞれリファレンスとした信号そのものの長期安定度により制限されている。赤線は NICT にて行ったゼロベースライン、コモンクロック測定の結果でありリファレンスの安定度による制限は受けていない。緑線は室内機器 (U/C, D/C, モデム) を同軸ケーブルで接続して測定した結果であり、室内に置かれた機器によるシステム雑音を示している。赤線と緑線の結果の比較により、1 秒から 1000 秒平均までの周波数安定度については屋外機器 (HPA, LNA) 以降、アンテナから衛星間の伝搬経路上の何か、若しくは衛星のトランスポンダに用いられている周波数信号の短期的位相雑音など何らかに

よって、緑線で示すシステム雑音が赤線の結果まで劣化しているといえる。また赤線では 1 秒平均で 10^{-14} 台の値となっているが、夏季に入るとこの値が 10^{-13} 台となることがある。また気温の高い日中に値が上昇し、夜間に下降する現象も観測されており [17]、温度に依存する雑音が存在すると考えられる。

3 TWCP のための衛星双方向モデム

1 で紹介した協定世界時のための時刻比較測定では、測定システム内の遅延量を校正し絶対時刻差を導出することが求められる。その典型的な校正誤差は数ナノ秒である。1 で述べたように衛星双方向において従来使われてきたモデムは搬送波位相を観測量として出力しなかったため、2 で紹介した計測結果は汎用測定器を用いて得たものである。それら汎用測定器では誤差数ナノ秒での校正は不可能であった。我々は TWCP 技術を広く展開するためには、搬送波位相による周波数比較もしくは相対時刻比較だけでなくコード位相による絶対時刻比較の双方が必要であると考え、モデムの新規開発を行った。搬送波位相は無変調信号を用いても計測可能であるが、無変調信号はフェージングなどの影響を受けやすいため、実際には疑似雑音 (コード) による位相変調がかけられたスペクトラム拡散信号を使用する。モデム開発のポリシーは、1. コード位相と搬送波位相の双方の検出を可能にする、2. 信号に不要な位相雑音を重畳しない、3. できるだけデジタルデバイスを用いる、である。それらポリシーを実現するため、新規開発したモデムにおいては回路の製造コストがかからず、かつユーザーが柔軟に回路設計・変更可能な FPGA を利用した。これにより従来使われているモデムの約 1/6 の価格での市販化に成功している。

図 3 にモデム構成図を、表 1 に諸元を示す。モデムの入出力周波数は 70 MHz であり、周波数変換せず直接デジタル - アナログ変換 (またはその逆) されている。FPGA と CPU のファームウェアは書き換え可能となっており、バグ修正や必要な機能追加を随時行うことができる。モデムの内部クロック周波数は外部から入力される 10 MHz 信号に位相同期する。モデムのタイミングの基準となる 1 pps 信号は外部から入力される 1 pps 信号に対し一定の遅延となるよう生成される。さらにその一部がモデムから出力され、ユーザーはその出力を用いてモデム内部の遅延量をモニタ可能である。コードのチップレートは協定世界時のための比較ネットワークで使用されている 1 MHz を採用している。送信チャネル数は 2 であり、それぞれ独立に周波数、レベルを設定可能である。また内部遅延校正

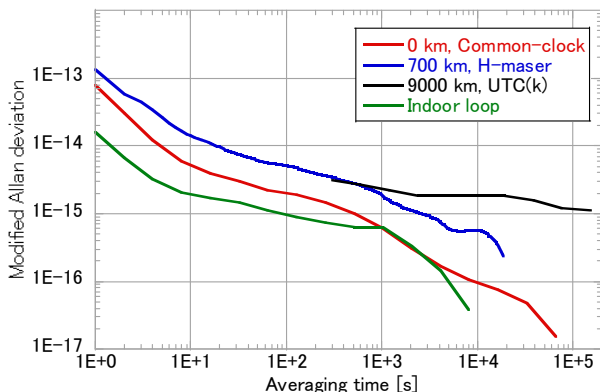


図 2 TWCP による計測精度

赤線はゼロベースライン、コモンクロック計測結果、青線はフランスパリ天文台 (OP) - ドイツ PTB 間で行った水素メーザー原子時計比較結果 [18]、黒線は NICT - ドイツ PTB 間で行った UTC (NICT) と UTC (PTB) の比較結果 [17]、緑線は衛星を使わず室内で周波数変換器をケーブルで接続して測定した結果であり室内機器によるシステム雑音を示す。

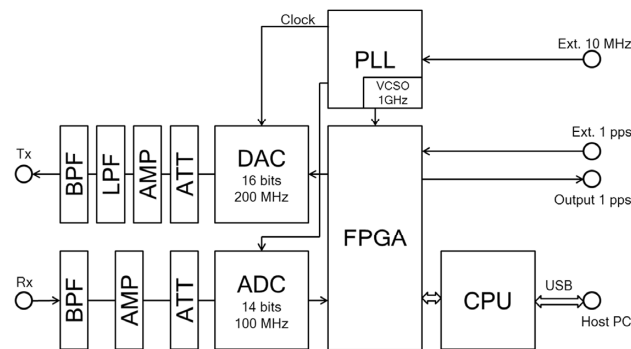


図3 モデム構成図

のために用いることもできる。受信チャンネル数は1だが相関器4つを備えており、同時に4信号の処理が可能となっている。モデムはUSB接続によりPCから制御でき、毎秒のコード位相、搬送波位相等が記録される。

モデムは実験室内にて内部遅延及び測定値の再現性について評価されており、コード位相による校正精度数ナノ秒が得られる見込みである。また衛星回線を使用しコモンクロック測定を実施し、図2の赤線と同等の精度を確認している。さらに KRISS との間で実証実験を開始したところである。今後、更に多くの海外機関と実験を始める予定である。

4 まとめ

搬送波位相を利用する衛星双方向時刻・周波数比較、TWCP について紹介した。その技術を実現するためのモデムは開発が終わり、国内で性能を確認し、海外研究機関との実証実験を開始した段階である。NICT 本部のほか、国内3箇所にある地球局にも順次、新規開発したモデムをインストールしていく予定である。これまでコード位相計測による時刻差のみ得られていたものが、新規開発したモデムを利用することにより、これからは分解能が3桁ほど向上した周波数差あるいは波数不確定性を持つ搬送波位相差が計測できるようになる。それらをどのように組み合わせていくかは新たな研究課題である。しかしながら、GNSS 比較においては既に2種の観測量を用いる PPP (Precise Point Positioning) [19] が確立し、計測精度の向上が果たされている。衛星双方向においても同様の方策が取られていくことは想像に難くない。そのように NICT 発の技術である TWCP によって衛星双方向方式の精度向上を図り、それが日本標準時及び協定世界時そのものの精度向上につながるよう引き続き研究開発を進めていく。

表1 モデム諸元

入出力周波数	70 MHz
コードチップレート	1 MHz
コード長	20,000 chip
コードタイプ	GPS L2C
送信チャンネル数	2
受信チャンネル数	1 (相関器数4)

謝辞

ソフトウェア無線開発の先駆者雨谷純氏に感謝いたします。また実験に協力いただいた PTB, OP, KRISS の関係者に感謝いたします。

【参考文献】

- 1 C. Lisdat et al., "A clock network for geodesy and fundamental science," Nature Communications, 7, 12443, 2016.
- 2 P. Krehlik, L. Sliwczynski, L. Buczek, and J. Kolodziej, "Fiber-Optic UTC(k) Timescale Distribution With Automated Link Delay Cancellation," IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control, vol.66, pp.163-169, 2019.
- 3 A. Yamaguchi et al., "Direct Comparison of Distant Optical Lattice Clocks at the 10-16 Uncertainty," Applied Physics Express, 4, 082203, 2011.
- 4 Y. Saburi, M. Yamamoto, and K. Harada, "High-Precision Time Comparison via Satellite and Observed Discrepancy of Synchronization," IEEE Trans. on Instr. and Meas., IM-25, no.4, pp.473-477, 1976.
- 5 今江理人, 鈴山智也, 後藤忠広, 澁谷泰久, 中川史丸, 清水義行, 栗原敬之, "衛星双方向方式," 通信総合研究所季報, vol.49, nos.1/2, pp.121-128, 2003.
- 6 J. Ray and K. Senior, "Geodetic techniques for time and frequency comparison using GPS phase and code measurements," Metrologia, 42, pp.215-232, 2005.
- 7 B. Forville, D. Matsakis, A. Pawlitzki, and W. Schaefer, "Development of carrier-phase-based two-way satellite time and frequency transfer (TWSTFT)," in Proc. 36th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting, pp.149-164, 2004.
- 8 A. Kanj, J. Achkar, and D. Rovera, "Characterization of OP TWSTFT stations in colocation based on combined use of code and carrier phase data," Proc. of European Frequency and Time Forum, pp.477-482, 2012.
- 9 F. Nakagawa, J. Amagai, R. Tabuchi, Y. Takahashi, M. Nakamura, S. Tsuchiya, and S. Hama, "Carrier-phase TWSTFT experiments using the ETS-VIII satellite," Metrologia, 50, pp.200-207, 2013.
- 10 雨谷純, 後藤忠広, "複疑似雑音方式衛星双方向時刻比較装置の開発," 情報通信研究機構季報, vol.56, nos.3/4, pp.183-192, 2010.
- 11 T. Gotoh, J. Amagai, T. Hobiger, M. Fujieda, and M. Aida, "Development of a GPU-based two-way time transfer modem," IEEE Trans. Instrum. Meas., vol.60, no.7, pp.2495-2499, 2011.
- 12 W. H. Tseng, Y. J. Huang, T. Gotoh, T. Hobiger, M. Fujieda, M. Aida, T. Li, S. Y. Lin, H. T. Lin, and K. M. Feng, "First International Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer Experiment Employing Dual Pseudo-Random Noise Codes," IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control, vol.59, no.3, pp.531-538, 2012.
- 13 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, no.12, pp.2625-2630, 2012.
- 14 H. Hachisu, M. Fujieda, S. Nagano, T. Gotoh, A. Nogami, T. Ido, St. Falke,

- N. Huntemann, C. Grebing, B. Lipphardt, Ch. Lisdat, and D. Piester, "Direct comparison of optical lattice clocks with an intercontinental baseline of 9000 km," Optics Letters, vol.39, no.14, pp.4072–4075, 2014.
- 15 M. Fujieda, T. Ido, H. Hachisu, T. Gotoh, H. Takiguchi, K. Hayasaka, K. Toyoda, K. Yonegaki, U. Tanaka, and S. Urabe, "Frequency Measurement System of Optical Clocks Without a Flywheel Oscillator," IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control, vol.63, no.12, pp.2231–2236, 2016.
 - 16 M. Fujieda, S. H. Yang, T. Gotoh, S. W. Hwang, H. Hachisu, H. Kim, Y. K. Lee, R. Tabuchi, T. Ido, W. K. Lee, M. S. Heo, C. Y. Park, D. H. Yu, and G. Petit, "Advanced Satellite-Based Frequency Transfer at the 10^{-16} Level," IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control, vol.65, no.6, pp.973–978, 2018.
 - 17 M. Fujieda, D. Piester, T. Gotoh, J. Becker, M. Aida, and A. Bauch, "Carrier-phase two-way satellite frequency transfer over a very long baseline," Metrologia, 51, pp.253–262, 2014.
 - 18 M. Fujieda, H. Takiguchi, J. Achkar, M. Abgrall, J. Guéna, F. Riedel, E. Benkler, S. Weyers, and D. Piester, "Carrier-Phase Two-Way Satellite Frequency Transfer between LNE-SYRTE and PTB," Proc. of 2016 European Frequency and Time Forum, pp.255–258, 2016.
 - 19 G. Petit and Z. Jiang, "Precise point positioning for TAI computation," Proc. of IEEE International Frequency Control Symposium Jointly with the 21st European Frequency and Time Forum, pp.395–398, 2007.

藤枝美穂 (ふじえだ みほ)

電磁波研究所
時空標準研究室
主任研究員
博士(理学)
精密時刻比較、光ファイバ周波数伝送

田淵 良 (たぶち りょう)

電磁波研究所
時空標準研究室
有期研究技術員

相田政則 (あいだ まさのり)

電磁波研究所
時空標準研究室
嘱託
時刻・周波数標準

後藤忠広 (ごとう ただひろ)

電磁波研究所
時空標準研究室
主任研究員
博士(工学)
時刻比較、精密軌道決定