

高精度時刻比較装置を用いた地上-地上間時刻比較実験

中川史丸 高橋靖宏 田淵 良 雨谷 純 中村真帆 土屋 茂 浜 真一

ETS-VIII衛星及び高精度時刻比較装置を用い、搬送波位相による地上-地上間時刻周波数比較実験を行った。実験は、衛星搭載原子時計を仲介とする方法と、ETS-VIIIを中継とする方法の2種類について実施し、何れについても従来の比較方式と比べ、精度が向上することを確認した。特に、中継による比較では、搬送波位相による衛星双方向時刻周波数比較の新しい解析方法を開発し、次世代の国際時刻比較へ繋がる技術を開発することができた。

1 はじめに

高精度時刻比較装置(Time Comparison Equipment、以下 TCE)の開発は、ETS-VIII搭載の原子時計と地上の原子時計間の時刻差を求め、衛星搭載原子時計の軌道上性能の把握を行うため、衛星-地上間の高精度時刻比較技術を獲得することが主な目的である^[1]。さらに TCE では、2つの地球局を使用することで、地上-地上間の双方向時刻周波数比較が可能となり、これは現在、国際時刻比較リンクで行われている通信衛星を用いた、衛星双方向時刻周波数比較(Two Way Satellite Time and Frequency Transfer: TWSTFT)と基本的なシステム構成は同じである(従って、以降、地上-地上間の双方向時刻周波数比較を TWSTFT と略す)。

TCE の最大の特徴は、搬送波位相による計測が可能であることで、これにより、従来のコード位相と併せて、より精度の高い TWSTFT が可能となる。そこで、TCE の特徴を生かした、搬送波位相による TWSTFT 実験を行い、その精度の確認及び搬送波位相による TWSTFT で必要となる解析技術の開発を行った。

本章では、最初に TCE による2種類の TWSTFT 実験の概要を説明、それぞれの実験の結果を紹介し、最後に搬送波位相による TWSTFT における精度向上について考察する。

2 TCE による地上-地上時刻周波数比較の概要

2.1 ETS-VIII、TCE による時刻比較実験概要

TCE は、ETS-VIII搭載 TCE と、2つの TCE 地球局(TCE 固定局、TCE 可搬局)から構成される。TCE における基本的な動作は、入力された測距信号のコード及び搬送波に対する原子時計からの基準信号の位相差を計測することである。ETS-VIIIにおける衛星-地上

間時刻比較では、ETS-VIIIと TCE 地球局間で測距信号の送受信を行い、各局で受信したコード及び搬送波の時刻差(位相差)を計測、双方向時刻比較法^[2]により、衛星搭載セシウム原子時計と地上の原子時計間の時刻差を計算により求める。

測距信号の生成及び送受信は、ETS-VIIIでは JAXA が担当している HAC ミッション^[3]により、また地球局側では TCE 地球局で行っている。それぞれの基準信号として、ETS-VIIIでは HAC による衛星搭載セシウム原子時計を、また TCE 地球局では UTC (NICT)^[4]や任意の水素メーザー原子時計、またはセシウム原子時計を使用する。測距信号はアップリンクでは S-band、ダウンリンクでは S-band と L-band を使用している。これは、ダウンリンクの2信号の差を利用することで、電離層遅延による影響を補正するためであるが、今回の TWSTFT 実験でも同様の方法が可能であり、詳細は後述する。

TCE の最も基本的な実験は、衛星搭載 TCE と TCE 固定局間での衛星-地上間時刻比較実験である。この実験の結果、搬送波位相による時刻周波数比較が、従来のコード位相による時刻比較に比べ、格段に高い精度での時刻比較が可能であることを我々は実証している^[5]。

2.2 2つの地上-地上間時刻周波数比較実験

ここでは、ETS-VIII及び TCE による、TWSTFT 実験について概要を述べる。TCE による TWSTFT 実験では、従来のコード位相だけではなく、搬送波位相による TWSTFT を行うことで、計測精度の向上を実証することが目的となる。ただし、搬送波位相による比較のみでは、時刻の絶対値を決められず、それ単体では時刻の相対値(周波数)比較のみとなる。時刻の絶対値比較を行うには、さらにすすめて、コード位相による比較と組み合わせによる絶対値推定などのもう

一段の解析が必要となる。

TCE による TWSTFT 実験には、「仲介による時刻比較」と「中継による時刻比較」の2種類があり、それぞれについて、原理と特徴を述べる。

2.3 仲介による時刻比較

TCE 地球局には、TCE 固定局と TCE 可搬局の2局があり、さらに、衛星搭載 TCE には、機内遅延補正を目的として、複数のコードの信号を同時に計測できる機能を有している。そこで、TCE 固定局(地上時計1)と衛星搭載 TCE (衛星搭載セシウム原子時計)、TCE 可搬局(地上時計2)と衛星搭載 TCE のそれぞれの間について、衛星-地上間双方向時刻周波数比較を同時に行い、それらの結果から、TCE 固定局-TCE 可搬局間の時刻比較を計算により求める。この方法では、すなわち、衛星搭載セシウム原子時計を仲介して時刻周波数比較を行っており、以降、「仲介による時刻比較」と称する。この方法のメリットは、原理が単純であり、すでに実証されている搬送波位相による衛星-地上間の比較技術をそのまま使用できることである。デメリットとしては、衛星搭載 TCE で複数の計測を行う場合、計測間隔が1秒から2秒に開いてしまい、計測頻度が下がることと、衛星搭載セシウム原子時計を仲介することから、最終的な地上-地上間の比較精度が劣化してしまうことである。

2.4 中継による時刻比較 (搬送波位相による TWSTFT)

ETS-VIIIで測距信号の生成、送受信を行う HAC システムには、受信した S-band 測距信号を周波数変換し、S-band 及び L-band で送信する、ベントパイプモードが有る。このモードを使用すると衛星搭載 TCE を使用せずに、測距信号は衛星を中継するのみで、2つの地球局で直接、送受信・計測が可能になる。この方法による時刻比較を「中継による時刻比較」と呼ぶが、これは国際時刻比較で一般に行われている、通信衛星を使用した TWSTFT とシステムは全く同じである。通常の TWSTFT と異なる点は、搬送波位相による計測が可能であることと、衛星上の周波数変換に使用するローカル信号が安定度の高いセシウム原子時計を使用している点である。ただし、後述するとおり、衛星搭載時計の安定度が悪くても計測精度を悪化させない。

コード位相についての時刻比較原理は通常の TWSTFT^[2] と全く同じであることから説明は省略し、ここでは搬送波位相による TWSTFT (搬送波位相での「中継による時刻比較」) について説明する。

搬送波位相による TWSTFT は、コード位相による TWSTFT と同じ解析方法は使用できない。コード位

相の場合、その途中経路の周波数が変化しないことから、両局での計測データの差分により、途中経路の影響をキャンセルしながら、TWSTFT が可能となる。しかし、搬送波位相の場合、通信衛星 (今回の場合は ETS-VIII) でのダウンコンバート時に周波数が変化することから、何らかの工夫が必要となる。

これまでの搬送波位相による衛星双方向時刻比較としては、Fonville^[6] らにより、2つの地球局での自局折り返し信号を利用することで、この問題を解決できることを示している。彼らの方法では、経路上の周波数の変化を追いかけることにより、近似等を用いて、周波数差を導き出しており、その方法は複雑である。

そこで、今回、我々は Fonville の方法と同じく自局折り返し信号を使いながら、周波数ではなく、経路上での位相の変化を追いかけることで、より容易に搬送波位相による TWSTFT が可能になる解析方法を確立した。これらの詳細については、Nakagawa^[7] を参照のこととし、ここでは簡単にその方法を述べる。

今、A 局と B 局間での時刻比較を考える。この時、A 局から送信し、衛星 S で中継し、B 局で受信・計測した位相差 ϕ_{ba} (rad) は以下の式で表される。

$$\frac{\phi_{ba}(t)}{2\pi} = f_{up}\tau_A(t) - f_d\tau_S(t) - f_d\tau_B(t) - f_{up} \cdot \frac{R_A^S(t)}{c} - f_d \cdot \frac{R_B^S(t)}{c} \quad (1)$$

ここで、 f_{up} 、 f_d はそれぞれアップリンク周波数、ダウンリンク周波数、 f_d は2周波数の差 ($f_{up} - f_d$)、 τ_A 、 τ_B 、 τ_S はそれぞれ、A 局、B 局、衛星の各リファレンス時計の時刻差、 $R_A^S(t)$ 、 $R_B^S(t)$ は A 局-衛星、B 局-衛星間の距離、 c は光速を表している。

同様に、B 局の送信信号を A 局で計測した位相差 ϕ_{ab} は以下のようにになる。

$$\frac{\phi_{ab}(t)}{2\pi} = f_{up}\tau_B(t) - f_d\tau_S(t) - f_d\tau_A(t) - f_d \cdot \frac{R_A^S(t)}{c} - f_{up} \cdot \frac{R_B^S(t)}{c} \quad (2)$$

ϕ_{ba} と ϕ_{ab} の差分を計算すると、以下のようにになる。

$$\frac{\phi_{ba}(t) - \phi_{ab}(t)}{2\pi} = (f_{up} + f_d)(\tau_A - \tau_B) - (f_{up} - f_d) \left(\frac{R_A^S(t)}{c} - \frac{R_B^S(t)}{c} \right) \quad (3)$$

この式からわかるように、もしアップリンクとダウンリンクの周波数が同じ場合、一般的なコード位相による衛星双方向時刻比較と同じである。しかしながら、搬送波位相の場合、周波数が異なることから、これだけでは、時刻差を求められない。そこで、自局折り返しの信号を使用する。A 局から A 局への自局折り返し ϕ_{aa} 、B 局から B 局への自局折り返し ϕ_{bb} は以下で表される。

$$\frac{\phi_{aa}(t)}{2\pi} = f_{up}\tau_A(t) - f_d\tau_S(t) - f_d\tau_A(t) - (f_{up} + f_d) \cdot \frac{R_A^S(t)}{c} \quad (4)$$

$$\frac{\phi_{bb}(t)}{2\pi} = f_{up}\tau_B(t) - f_d\tau_S(t) - f_d\tau_B(t) - (f_{up} + f_d) \cdot \frac{R_B^S(t)}{c} \quad (5)$$

ϕ_{aa} と ϕ_{bb} の差分をとると以下になる。

$$\frac{\phi_{aa}(t) - \phi_{bb}(t)}{2\pi} = (f_{up} - f_d)(\tau_A - \tau_B) - (f_{up} + f_d) \left(\frac{R_A^S(t)}{c} - \frac{R_B^S(t)}{c} \right) \quad (6)$$

式 (3) と式 (6) を見ると、我々の求めるべき2局の時刻差 ($\tau_A - \tau_B$) と距離の差 ($R_A^S(t) - R_B^S(t)$) の2つが未知数の連立方程式になり、解析的に時刻差を求めることが可能であることがわかる。

以上が、今回の仲介による時刻比較実験で搬送波位相を用いるのに新たに開発した、時刻差の解析方法である。途中の式を見てわかるように、衛星搭載の時計の項 τ_s は、差分により消えており、これは、今回の ETS-VIII での実験に限らず、この方法は一般の通信衛星でも搬送波位相による TWSTFT が可能であることを示している。

3 時刻比較実験結果

「仲介による時刻比較実験」、及び「中継による時刻比較実験」のそれぞれの結果について述べる。

3.1 実験概要

TCE 固定局、及び TCE 可搬局を用い、「仲介」、及び「中継」の両方について、それぞれに入力した基準信号間の TWSTFT 実験を行った。TCE による時刻比較では、コード位相と搬送波位相の両方で同時計測が可能であるが、この実験期間中、TCE 可搬局によるコード位相計測が不調によりできなかったため、今回は搬送波位相の結果のみを示す。従って、以降の時刻比較の結果は相対値のみ有効となる。

TCE 固定局は、NICT 本部（東京都小金井市）2号館に設置、その基準信号は水素メーザーを原振とした UTC (NICT) を使用した。TCE 可搬局は、NICT 本部の光センター、または茨城県鹿嶋市にある NICT 鹿島宇宙技術センターに設置し、何れの場所でも基準信号として水素メーザーを使用した。それぞれのベースラインは、約 200m、約 110km となっている。それぞれの実験概要については、表 1 を参照のこと。

図 1 に、NICT 本部、NICT 鹿島宇宙技術センター間で実施した、「中継」による TWSTFT 実験（表 1 の No.4 の実験）の結果を示す。TCE による結果と併せて、GPS の搬送波位相による時刻比較結果を描画している。

表 1 TCE による地上-地上間時刻比較実験概要

| No. | 実施日 | TCE 可搬局設置場所 | 実験方法 |
|-----|------------|-----------------|------|
| 1 | 2008/11/5 | NICT 本部 光センター | 仲介 |
| 2 | 2008/11/27 | NICT 鹿島宇宙技術センター | 仲介 |
| 3 | 2010/6/10 | NICT 鹿島宇宙技術センター | 中継 |
| 4 | 2010/8/5 | NICT 鹿島宇宙技術センター | 中継 |

いずれの結果についても、同じ量の時刻差一次ドリフトを除去し、オフセット値を削除している。この結果から、それぞれの傾き、すなわち周波数が一致しており、TCE による比較及び今回開発した解析方法が妥当であることを示している。また、明らかに TCE による計測の安定度が良いこともわかる。

図 2 に、それぞれの比較実験の結果から計算した周波数安定度を示す。「中継」による比較が最も安定度がよく、その次に「仲介」による比較、GPS 搬送波位相による比較が続いている。いずれも、一般的なコード位相による TWSTFT よりも良いことがわかる。「仲介」による比較が「中継」による比較よりも悪いのは、時刻比較のステップが増えることにより、どうしてもその分のノイズが増えることが原因と思われる。「中継」による比較は特に安定度が高く、コード位相による TWSTFT に比べ非常に精度が高いことが本実験で確認できた。また、計測に使用した水素メーザーの仕様を考えると、10,000 秒前後から水素メーザーの安定

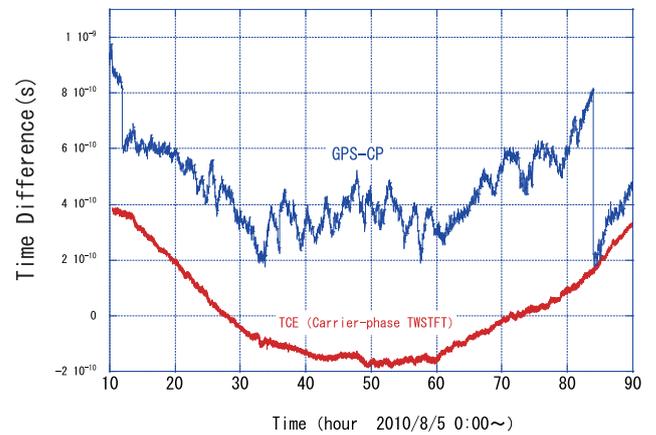


図 1 中継による時刻比較（搬送波位相による TWSTFT）による比較結果。併せて、GPS 搬送波位相による比較結果（GPS-CP）を描いている。それぞれ、同じ量の一次ドリフトを除去している。

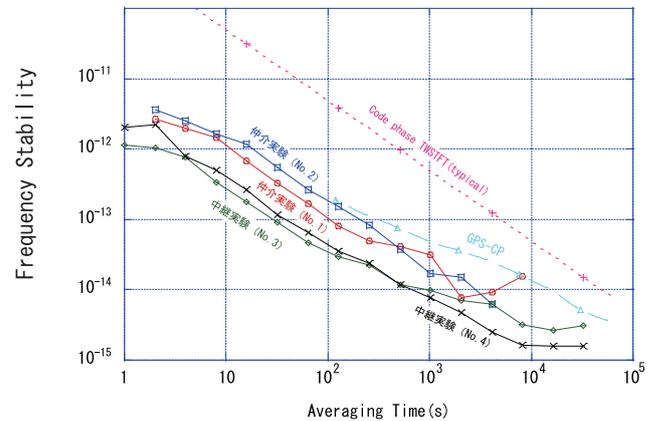


図 2 各時刻比較での計測精度（周波数安定度）

度フロアが計測されていると考えられる。「中継」による計測精度の理論値はもう少し高く^[8]、そこまでの性能は確認できなかったが、比較結果の安定度が地球局で生成する搬送波のローカル信号の安定度に近いことから、その安定度が計測の限界となっていると考えられる。

4 考察

「中継」による時刻比較実験で、搬送波位相による TWSTFT が非常に高い精度で計測可能であることを確認できた。ここでは、その搬送波位相による TWSTFT で精度に影響すると思われる点について考察する。

4.1 電離層遅延

電離層による遅延量は、周波数の 2 乗に反比例する。TWSTFT の場合、アップリンクとダウンリンクの周波数が異なることにより、経路によって電離層遅延量に差が生じ、それが誤差となる。TCE では、ダウンリンクの S-band、及び L-band の 2 周波を計測していることから、これらのデータを使用することで、電離層遅延の補正が可能となる（詳細な原理、解析方法については Nakagawa^[7] を参照のこと）。ここでは、電離層遅延補正前後の結果(No.3の実験)のみを示す。図3は、電離層遅延の補正が無い場合と、有る場合の、それぞれの周波数安定度を示している。補正有りの方がわずかに安定度が向上しているものの、明確な差は見られなかった。電離層遅延の影響は、季節や磁気嵐等で日々変化するため、単純にはいえないが、このときはその補正の効果が十分に示せなかったのでは無いかと考えられる。

搬送波位相による TWSTFT ではこれまでに比べ比較精度が高くなるため、電離層遅延補正の重要性が増

すといえる。しかし、通常の通信衛星では、ETS-VIII でのような補正ができないため、電離層モデル等による補正の検討が必要となる。

4.2 ドップラーシフト

搬送波位相による TWSTFT では、衛星の動きによるドップラーシフトを考慮しなければいけない。ETS-VIII は静止軌道衛星であるものの、僅かに動いていることから、精密計測ではその影響を考慮する必要があるが、ここでは省略する。

今、A 局から衛星 S を経由して B 局に信号を送る場合の周波数の変化を考える。衛星の動きが光速に比べ十分に遅い場合、B 局で受信する周波数は以下の式で表される。

$$f_d - f_{up} \frac{v_a}{c} - f_d \frac{v_b}{c} - f_{up} \frac{v_a v_b}{c^2} \quad (7)$$

ここで、 v_a 、 v_b は A 局、B 局からみたそれぞれの衛星の視線方向の速度である。上式第 2 項は A 局-衛星間のレンジの変化によるドップラーシフト、第 3 項は B 局-衛星間のレンジの変化によるドップラーシフトを表す。第 4 項は、第 2 項で生じたドップラーシフト量についてさらに衛星から B 局に送信される際に発生する 2 次のドップラーシフトを表している。ところで、搬送波位相による衛星双方向時刻比較を位相で考えてきたが、位相を時間で微分すると周波数になることと、レンジを時間で微分した物が速度であることから、 $dR_A^S/dt = v_a$ 、 $dR_B^S/dt = v_b$ であり、上式の第 2 項、第 3 項はすでに位相 ϕ_{ba} の式 (1) で組み込まれていたことが分かる。

第 4 項については、これまでの式には含まれていないため、別途補正が必要になる。

実測値からこの量を見積もると、ETS-VIII の速度から計算される v/c は $\sim 2 \times 10^{-8}$ であり、周波数への影響はその 2 乗である $\sim 4 \times 10^{-16}$ の日変化が現れる。時刻比較の結果から計算された周波数安定度を見ると、今回の実験では $\sim 1 \times 10^{-15}$ の安定度であり、本実験では 2 次のドップラーシフトの影響は現れなかったと考えられる。

使用する通信衛星の軌道変化が大きい場合、また、より高い精度での時刻比較が要求される場合、2 次のドップラーシフトの項を考慮する必要が出てくる。2 次のドップラーシフトは衛星の公転周期で変動することから、軌道の公転周期の成分を取り出し、変化量を計算することで補正は可能であると考えられる。ただし、衛星に応じてどのように補正するか、軌道決定の誤差がどう補正に影響するかを考慮する必要があり、これらは今後の研究課題の 1 つであるといえる。

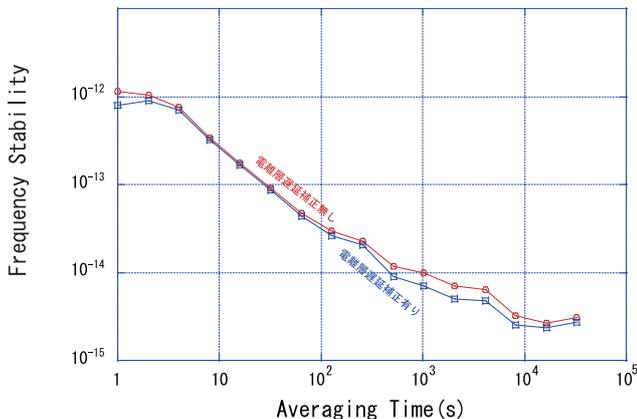


図3 電離層遅延補正前後の、搬送波位相 TWSTFT の周波数安定度。小金井-鹿島間での中継による実験で、2010/6/10 に実施。

5 結論

今回我々は、搬送波位相による地上-地上間時刻周波数比較の実証を目的に、ETS-VIII、及び TCE を用い、2 種類の実験を行った。何れの実験でも、従来のコード位相による時刻比較と比べ、高い精度での比較が可能であることを示せた。特に、「中継」による実験では、新たに解析方法を確立し、その妥当性、及び高精度化を確認できた。

本実験は、通信衛星を用いた搬送波位相による衛星双方向時刻周波数比較の実証実験として成り立ち、次世代の衛星双方向時刻比較技術への道筋をつけることができたといえる。今回、ETS-VIII、及び TCE によって確立した技術は、すでに、一般の通信衛星による搬送波位相 TWSTFT で実験が進められており^[9]、次世代の遠隔地間時刻周波数比較の 1 つとして、期待されている。

【参考文献】

- 1 Y. Takahashi, F. Nakagawa, R. Tabuchi, M. Nakamura, H. Kumimori, J. Amagai, S. Tsuchiya, S. Hama, and H. Noda, "Experimental Results of Time Comparison Using the Time Comparison Equipment on Board ETS-VIII," Journal of the NICT, Vol. 57, Nos. 3/4, pp. 279-288, 2010.
- 2 M. Imae, T. Suzuyama, T. Gotoh, Y. Shibuya, F. Nakagawa, Y. Shimizu, and N. Kurihara, "Two Way Satellite Time and Frequency Transfer" Journal of the NICT, Vol. 49, Nos. 1/2, pp. 125-133, 2003.
- 3 H. Noda, K. Sano, and S. Hama, "High Accuracy Clock (HAC) ," Journal of the NICT, Vol. 49, Nos. 3/4, pp. 101-107, 2003.
- 4 F. Nakagawa, Y. Hanado, H. Itoh, N. Kotake, M. Kumagai, K. Imamura, and Y. Koyama, "Summary and Improvement of Japan Standard Time Generation System," Journal of the NICT, Vol. 56, Nos. 3/4, pp. 17-27, 2003.
- 5 中村真帆, 高橋靖宏, 中川史丸, 田淵良, 雨谷純, 土屋茂, 浜真一, "高精度時刻比較装置を用いた衛星-地上間高精度時刻比較," 情報通信研究機構研究報告, 本特集号, 5-1, 2014.
- 6 B. Fonville, D. Matsakis, A. Pawlitzki, and W. Schaefer, "Development of carrier-phase-based two-way satellite time and frequency transfer (TWSTFT) ," Proceedings of the 36th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Systems and Applications Meeting (Washington), 149, 2005.
- 7 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, Vol. 50, pp. 200-207, 2013.
- 8 F. Nakagawa, Y. Takahashi, T. Gotoh, F. Miho, M. Hosokawa, H. Kikuchi, and M. Imae, "Development of Time Comparison Equipment for ETS-VIII Satellite," Electrical Engineering in Japan, Vol. 158, No. 3, 2005.
- 9 M. Fujieda, T. Gotoh, F. Nakagawa, R. Tabuchi, M. Aida, and J. Amagai, "Carrier-Phase-Based Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer," IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 59, No. 12, pp. 2625-2630, 2012.

中川史丸 (なかがわ ふみまる)

電磁波計測研究所時空標準研究室主任研究員
博士 (理学)
時間周波数標準

高橋靖宏 (たかはし やすひろ)

ワイヤレスネットワーク研究所企画室室長
衛星測位システム、時刻比較、衛星通信

田淵 良 (たぶち りょう)

電磁波計測研究所時空標準研究室技術員



雨谷 純 (あまがい じゅん)

電磁波計測研究所センシングシステム研究室
副室長／沖縄電磁波技術センター長
時刻周波数比較、電波干渉計

中村真帆 (なかむら まほ)

東京学芸大学専門研究員／元電磁波計測研究所時空標準研究室専攻研究員
博士 (工学)
時刻比較、電離圏、ニューラルネットワーク



土屋 茂 (つちや しげる)

電磁波計測研究所時空標準研究室主任研究員
時刻・周波数標準、電波伝搬



浜 真一 (はま しんいち)

財団法人自治体衛星通信機構技術部長／
元電磁波計測研究所時空標準研究室研究
マネージャー
衛星通信