

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

中村真帆 高橋靖宏 中川史丸 田淵 良 雨谷 純 土屋 茂 浜 真一

技術試験衛星Ⅷ型（ETS-VIII）は日本で初めて原子時計を搭載した衛星で、宇宙航空研究開発機構（JAXA）、及び情報通信研究機構（NICT）は衛星測位の基盤技術の修得を目的に、衛星測位技術の基礎実験を行った。NICTは、ETS-VIIIに高精度時刻比較装置（TCE）を搭載し、衛星-地上間時刻比較実験を行った。高精度時刻比較のためには電離圏遅延量の推定を行う必要があり、電離圏遅延量絶対値を利用して、高精度時刻比較実験を行ったので報告する。

1 まえがき

JAXAとNICTは衛星測位技術の修得を目的に、2006年12月に打ち上げられた技術試験衛星ETS-VIIIに、日本で初めて原子時計を搭載し、衛星測位技術に関する基礎研究を行うことが計画され、実施された^[1]。NICTでは、日本標準時の生成と供給を行ってきた歴史から、当該原子時計の衛星軌道上での性能評価を主目的として、衛星-地上間高精度時刻比較を行うための高精度時刻比較装置（TCE）^[2]をNICTのミッションとして搭載し、実験を実施してきた。

衛星-地上間高精度時刻比較では、対流圏や電離圏通過時の遅延量は原理的にはアップリンクとダウンリンク間でほぼ相殺されるが、電離圏遅延量については送受信電波の周波数差等からわずかに遅延が残る。しかし、地球局でのSバンド、及びLバンドの受信データを用いて電離圏の全電子数（TEC）の絶対値推定を行い衛星-地上間高精度時刻比較結果の補正が可能である。本稿では、衛星-地上間高精度時刻比較結果、及び電離圏遅延量の補正結果を報告する。高精度時刻比較技術は日本の測位衛星開発における基盤技術の1つであり、準天頂衛星利用高精度測位実験システムへとその技術が引き継がれている^[3]。

2 衛星-地上間での双方向高精度時刻比較

2.1 双方向時刻比較法

搭載原子時計と、地上の基準時計の間の高精度時刻（周波数）比較の構成図を図1に示す。衛星から地上へ、また地上から衛星へと時刻比較信号を伝送し、双方において受信する。送信された信号と、自局の原子時計の時間差を測定し、それぞれで測定された時間差の差分を求めることにより2個の時計の時刻差を求める。この手法は双方向伝送時刻比較法と呼ばれ、衛星-地上

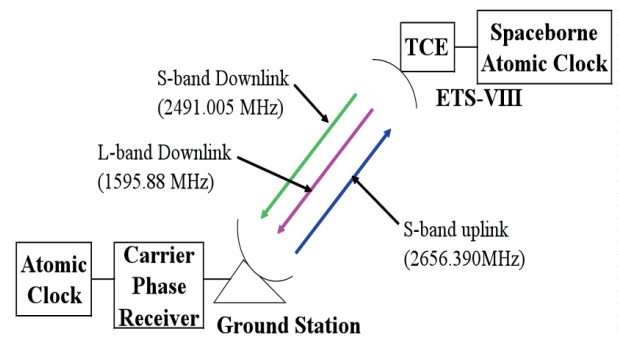


図1 時刻比較の構成図

間の時刻比較では世界で初めての適用となる。双方向時刻比較法は原理的に、伝搬路上の電離圏や対流圏の遅延とその変動、衛星の運動の影響がほぼ相殺でき、高精度の時刻比較が可能である。

また、衛星上及び地球局双方に高安定原子時計が置かれ、搬送波信号、及び変調信号等がすべてGPSと同様にコヒーレントに生成されることから、変調信号のみならず、搬送波信号の位相情報を利用することが可能となり、 10^{-12} 秒台の精度での位相計測が可能となる^[4]。

2.2 ETS-VIII搭載機器、及び地球局

ETS-VIIIの測位関連の搭載機器は、JAXA分担の高精度時刻基準装置（HAC）^[5]が、搭載原子時計、Sバンド送受信機、Lバンド送信機、Sバンド・Lバンド共用の直径1.0 mアンテナ、及びSLR（Satellite Laser Ranging）用機器（LRRRA）が搭載されている。NICTはTCEを分担した。TCEは図2に示す外観で、Sバンドの送受信信号の遅延時間計測機能を持つ。表1にHAC・TCEの諸元を示す。

地球局は、その固定局をNICT本部（東京都小金井市）に設置し、Sバンド送受信信号・Lバンド受信信号の計測機能を持ち、その基準信号として日本標準時

表 1 HAC・TCE の諸元

TX Power	5.7W
S-band TX Frequency	2491.005MHz
RX Frequency	2656.390MHz
L-band TX Frequency	1595.880MHz
PN Code	Same as GPS C/A Code
Size	32cm×32cm×32cm
Mass	12.4kg

UTC (NICT) を用いた。

2.3 双方向時刻比較の原理と主な誤差

衛星及び地球局ではそれぞれ時刻比較信号のコード位相と搬送波位相を計測する。計測される信号には幾何学的遅延量の他に原子時計のずれや電離圏遅延、対流圏遅延、機内遅延などが含まれている。以下に搭載側のコード位相 C^S 、地上側のコード位相 C_e 、搭載側の搬送波位相 Φ^S 、地上側の搬送波位相 Φ_e についてそれぞれの観測方程式を示す^{[6][7]}。

$$C^S = \tau + dt^S - dt_e + I_u + T + d_{eTx}^S + d_{Rx}^S \quad (1)$$

$$C_e = \tau + dt_e - dt^S + I_d + T + d_{Tx}^S + d_{eRx} \quad (2)$$

$$\Phi^S = \tau + dt^S - dt_e - I_u + T + d_{eTx}^S + d_{Rx}^S + \Phi^S(0) \quad (3)$$

$$\Phi_e = \tau + dt_e - dt^S - I_d + T + d_{Tx}^S + d_{eRx} + \Phi_e(0) \quad (4)$$

ここで τ は衛星、地球局間の幾何学的遅延時間、 dt^S, dt_e は衛星搭載原子時計と UTC (NICT) のずれ、 I_u, I_d はアップリンクおよびダウンリンク時の電離圏遅延、 T は対流圏遅延、 d_{Rx}^S, d_{Tx}^S は衛星内受信機、送信機の機内遅延時間、 d_{eRx}, d_{eTx} は地球局受信機、送信機の機内遅延時間をそれぞれ表し、衛星、地球局それぞれで受信される搬送波位相には初期位相 $\Phi^S(0), \Phi_e(0)$ が伴う。

双方向時刻比較ではコード位相、搬送波位相それぞれ

で衛星と地上局の受信信号を差し引きすることで幾何学遅延や対流圏遅延を取り除き時刻のずれを推定する。しかし双方向で差し引きを行っても、送信と受信で周波数が違うために周波数差による電離圏遅延量がどうしても残ってしまう。機内遅延量についても受信と送信の機内遅延量の差分が残る。両遅延量とも差し引きを行う前よりは相当軽減されるものの、高精度時刻比較においてはこれらが主な誤差要因となってしまう。以下にコード位相、搬送波位相それぞれで観測される時刻差の観測方程式を示す。搬送波位相には初期位相の不確定性も残るが、電離圏遅延量がわかればコード位相により初期位相の推定を行う事ができる。また TCE では校正系システムを備えており機内遅延を測定することが可能である。

先に挙げた観測方程式 (1-4) を整理すると、コード位相での時刻差は式 (5)、

$$dt^S - dt_e = \frac{1}{2}(C^S - C_e) - \frac{1}{2}(I_u - I_d) - \frac{1}{2}(d_{Rx}^S - d_{Tx}^S) + \frac{1}{2}(d_{eRx} - d_{eTx}) \quad (5)$$

搬送波位相で観測される時刻差は式 (6) のように表される。

$$dt^S - dt_e + \frac{1}{2}(\Phi^S(0) - \Phi_e(0)) = \frac{1}{2}(\Phi^S - \Phi_e) + \frac{1}{2}(I_u - I_d) - \frac{1}{2}(d_{Rx}^S - d_{Tx}^S) + \frac{1}{2}(d_{eRx} - d_{eTx}) \quad (6)$$

3 衛星-地上間時刻比較結果

衛星搭載原子時計と UTC (NICT) との双方向時刻比較実験は間欠的に行われた。図 3 に TCE 及び地球局でのキャリア位相の計測結果を示す。図 4 に、コード及びキャリア位相の時刻比較結果を示す。一次ドリフト成分は取り除いており、 $t=0$ でのコード及びキャリア位相の時刻差はそれぞれ 0ns と 5ns である。双方



図 2 TCE プロトフライトモデル (PFM) の外観

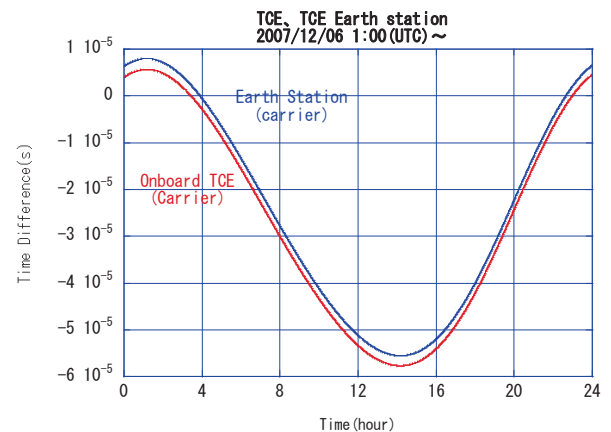


図 3 TCE 及び地球局でのキャリア位相の計測結果

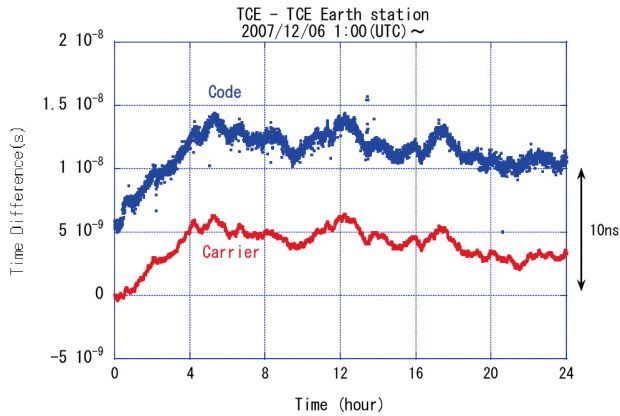


図4 衛星搭載原子時計とUTC (NICT) の時刻比較におけるコード位相及びキャリア位相の計測結果

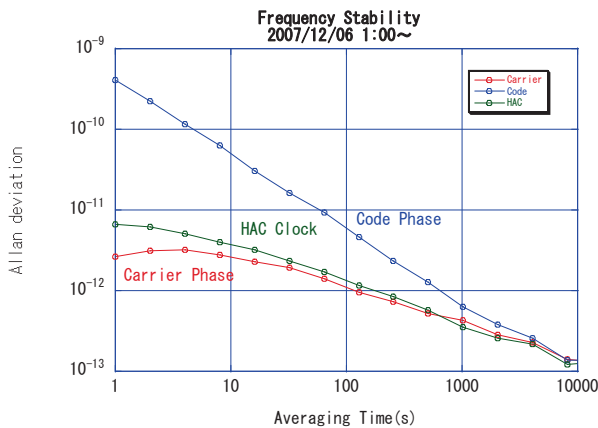


図5 衛星搭載原子時計とUTC (NICT) の時刻比較におけるコード位相及びキャリア位相の周波数安定度

の変動は大変よく一致している。計測精度ではキャリア位相の方がコード位相よりも良いことが見える。

図5に図4と同じデータを用いた周波数安定度 (Code Phase、Carrier Phase) と搭載原子時計の安定度の仕様値 (HAC Click) とともに示す。1秒での周波数安定度は、コード位相を用いた場合で0.7ns、キャリア位相を用いた場合で3psとなった。これらの結果から、キャリア位相を用いた時刻比較では平均化時間1秒でも直接衛星搭載時計の周波数を測れている。

4 電離圏遅延量補正

衛星-地上間高精度時刻比較では、対流圏や電離圏通過時の遅延量は原理的にはアップリンクとダウンリンク間でほぼ相殺されるが、電離圏遅延量については送受信電波の周波数差からわずかに遅延が残る。そこで高精度時刻比較実験においては、搬送波を用いた高精度な電離圏全電子数 (TEC) 観測による電離圏遅延量の補正が必要とされるが、TECの絶対値の推定は衛星と受信機が1機ずつでのシステムでは機内遅延があり

難しかった。

しかし、NICT 宇宙環境インフォマティクス研究室では、国土地理院のGNSS連続観測システム網 (GEONET) を用いた電離圏伝搬遅延量の全電子数マップ^[8]を一般に公開しており、時刻比較実験と同じ観測地点であるNICT本部 (東京都小金井市) での全電子数マップを利用できる。以下では、地球局で受信したSバンド及びLバンドのコード位相及び搬送波位相データを用いてTECの絶対値推定を行い衛星-地上間高精度時刻比較実験に適用の手法、及びその結果を示す。

4.1 2周波観測による電離圏遅延量

ETS-VIIIでは時刻比較用のS帯の送信の他に測位実験用のL帯の送信も行っており、地上局TCEではこの2周波を受信することができる。電波の分散性を利用して、2周波の観測から式(7)のようにTECが推定される。式(7)において C'_{S-L} はS帯とL帯でのコード位相の位相差を表し、 f_s, f_L はそれぞれS帯、L帯の周波数を示す。搬送波位相についても同様に記述することができるが初期位相の不確定性を伴う。推定されたTEC [$1\text{TECU}=10^{16}\text{ el/m}^2$] からさらに各周波数の遅延量 I [s] を式(8)から算出することができる^{[9][10]}。

$$TEC = \frac{C'_{S-L}}{1.345 \times 10^{-7}} \times \frac{f_s^2 f_L^2}{f_s^2 - f_L^2} \quad (7)$$

$$I = \frac{1.345 \times 10^{-7}}{f^2} TEC \quad (8)$$

電離圏遅延量の推定にもコード位相と搬送波位相の両方を用いる。搬送波位相による観測は、精度は高いが初期位相の不確定性が伴う。相対的な変動については搬送波による観測を用いることとし、初期位相推定のためにコード位相も利用する。

まずコード位相の観測開始直後の値を2,500点程度の頻度分布を取りそのピークを実験開始時のTECとして、搬送波位相との差を搬送波初期位相と推定する (サイクルスリップなどは補正済みとする)。図6に一例を示す。図6において横軸は遅延秒 [s] で、縦軸はカウント数である。ただし推定されたTECにはコード位相であっても機内遅延などのバイアスが含まれており、その影響はTECによる遅延量の1日の変動量よりも大きくその3倍程度に及ぶ。そこでなんらかの方法でバイアスを決定する必要がある。ただし装置は恒温室に入れられているため、機内遅延によるバイアスは、時間変動は少なく安定していると考えられる。

4.2 電離圏遅延量の絶対値推定

搬送波位相を用いた電離圏遅延量は、精度はよいが

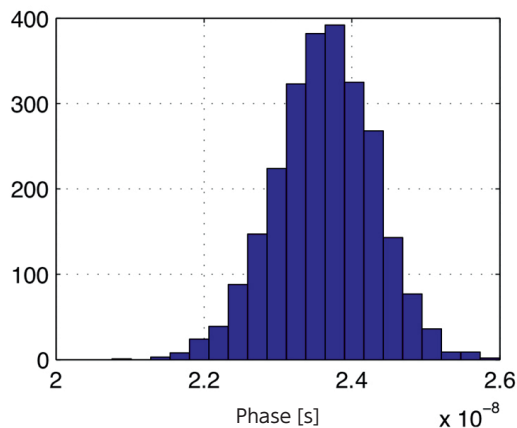


図6 搬送波位相の初期位相推定の一例。縦軸はカウント数。

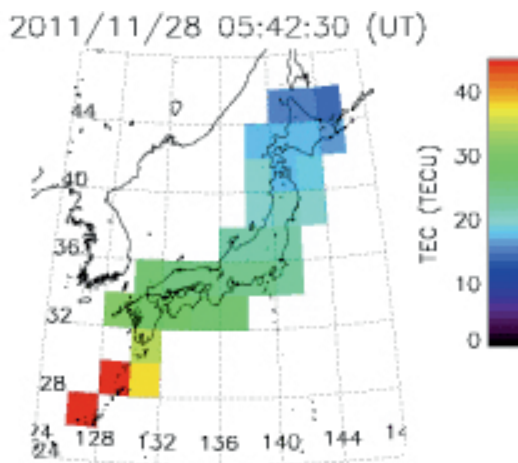


図7 NICTで公開している全電子数マップ

相対的な変動しかわからない。コード位相による算出では、機内遅延などによるバイアスが含まれており、また精度は搬送波位相ほど良くはない^[10]。GPS観測では多数の衛星と多数の受信機観測から最小二乗推定によりバイアスを推定する^[9]ことができるが、ETS-Ⅷでは衛星1機、地上局1機の構成のみでバイアスの推定が難しい。

NICTでは国土地理院が展開している日本のGPS観測網GEONETのデータを用いて最小二乗推定でTECの絶対値を推定し公開している^{[8][9]}(図7)。ETS-Ⅷの観測と同じ観測点での値をNICTで公開されている電離圏遅延量と比較する事でTCEのバイアスを推定し、電離圏遅延量の決定に用いる事にした。図8にNICTによるGPS-TEC絶対値推定値を利用してバイアスを決定、初期位相を推定した搬送波位相による電離圏遅延量絶対値の例を示す。図7において横軸は観測開始からの継続秒を表す。

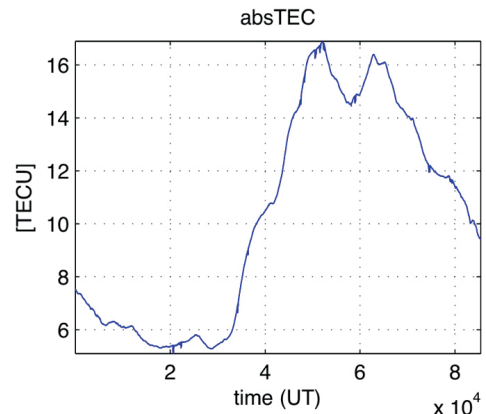


図8 バイアスを推定して求めた2007年12月6日の電離圏全電子数。横軸は観測の経過時間[秒]、縦軸は全電子数[TECU]を表す。

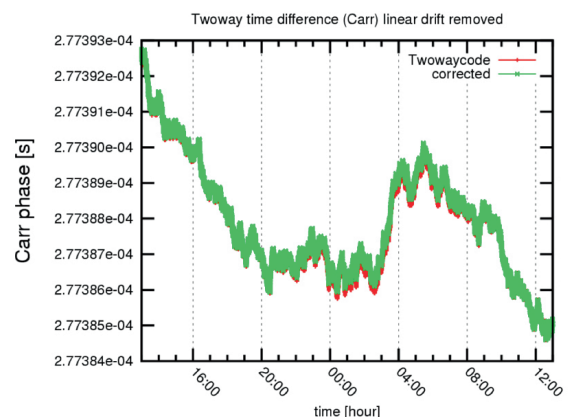


図9 電離圏補正を行った搬送波位相を用いた双方向時刻比較結果の一例。横軸は時刻(UTC)、縦軸は搬送波位相[s]。

4.3 時刻比較実験での電離圏補正結果

図9に本稿で述べた方法で電離圏遅延の補正を行った時刻比較結果を示す。横軸はUTCで時刻を表し、縦軸が衛星と地上の時計間の位相差を表す。プロットでは一次のドリフト成分を取り除いてある。赤線が電離圏遅延補正なしの結果で、緑が補正後の結果となる。最大でその差は1ns程度であったが、昼間TECの増加する時間帯で補正されている様子がわかる。上記実験期間(2008年)は太陽活動の極小期にあたり、電離圏による効果はまだ小さかったが、極大期での電離圏電子密度は10倍程度に増加するため、Sバンドでの電離圏遅延量は地域によっては数十nsに達することから、高精度時刻比較実験において電離圏遅延補正は必要であることを記しておく。

5 まとめ

ETS-Ⅷ搭載TCEを用いた衛星-地上間高精度時刻比較実験において、双方向時刻比較法での搬送波位相により高精度時刻比較が可能であり、搭載原子時計の

軌道上での安定度測定ができることを示した。また、より高精度な時刻比較のための電離圏補正の方法を検討し、一般的に行われている2周波観測による電離圏遅延量の推定で残ってしまうバイアスをNICT宇宙環境インフォマティクス研究室において公開されている電離圏全電子数マップの絶対値推定をもとに推定し、電離圏遅延量の絶対値としての補正を行うことができることを示した。

【参考文献】

- 1 浜本, 他, “技術試験衛星VIII型 (ETS-VIII) 計画の概要,” 情報通信研究機構季報, Vol. 49, Nos. 3/4, 2, 2003.
- 2 高橋, 浜本, 他, “高精度時刻比較装置,” 情報通信研究機構季報, Vol. 49, Nos. 3/4, 3-10, 2003.
- 3 中村, 他, “Time comparison experiments between the QZS-1 and its Time Management Station”, NAVIGATION, Vol. 60, No. 4, Winter 2013.
- 4 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, pp. 61-71, 2005.
- 5 野田, 他, “高精度時刻基準装置 (HAC),” 情報通信研究機構季報, Vol. 49, Nos. 3/4, 3-9, 2003.
- 6 Nakagawa, F., Takahashi, Y., Amagai, J., Tabuchi, R., Hama, S., and Hosokawa, M., “Time Transfer Experiment by TCE on the ETS-VIII Satellite,” PTTI proceedings, Ft. Belvoir, Defense Technical Information Center, [http:// handle.dtic.mil/100.2/ADA485420](http://handle.dtic.mil/100.2/ADA485420), 2007.
- 7 高橋, 他, “ETS-VIII搭載用高精度時刻比較装置による実験計画,” 信学論 (B), Vol. J84-B, No.12, PP. 2101-2107.
- 8 WDC for Ionosphere, Tokyo: <http://wdc.nict.go.jp/>.
- 9 Ma, G, 他, “Derivation of TEC and estimation of instrumental biases from GEONET in Japan,” Ann. Geophysicae, Vol. 21, pp. 2083-2093, 2003.
- 10 B. ホフマン, 他, “GPS 理論と応用,” シュプリンガー・フェアラーク東京, 2005.

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

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

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

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



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