

4-5 ETS-VIII搭載用時刻比較装置 — その2 精密時刻比較計画 —

4-5 Time Comparison Equipment for ETS-VIII Satellite — Part 2 Plans of Precise Time Transfer Experiment —

後藤忠広 細川瑞彦 中川史丸 高橋靖宏 藤枝美穂 今江理人
木内 等 相田政則 高橋幸雄

GOTOH Tadahiro, HOSOKAWA Mizuhiko, NAKAGAWA Fumimaru,
TAKAHASHI Yasuhiro, FUJIEDA Miho, IMAE Michito, KIUCHI Hitoshi,
AIDA Masanori, and TAKAHASHI Yukio

要旨

2004年打上げ予定の技術試験衛星VIII型には、日本の衛星に初めて原子時計が搭載され、衛星測位技術の基礎研究が行われる予定である。当所では、搭載原子時計の評価を目的に、高精度時刻比較装置の開発を行い同衛星に搭載する。本装置は、衛星と地上局の間で、コード及び搬送波位相を使用した双方向時刻比較を行い、コードによる比較でnsオーダ、搬送波位相による比較でpsオーダの精度を目指すものである。

本装置を使用することで、衛星—地上間での精密時刻比較のほかに、本装置を仲介とした地上—地上間での精密時刻比較、電波と光による測距の比較などの成果が期待できる。

Engineering Test Satellite VIII (ETS-VIII), which is planned to launch in 2004 will carry a highly precise cesium clock system on its mission first time in Japan for fundamental studies. To estimate precision of this clock, CRL has developed highly precise time comparison equipment. This one can measure the clock offsets between satellite and the Earth stations with precision of a few nanoseconds by code observations and of a few picoseconds by carrier phase observations.

Using this equipment via the ETS-VIII not only provides advanced time-transfer technologies between space and the Earth, but also gives highly precise time-transfer between each Earth stations as well as a possibility for comparing ranging technology between radio and laser signals.

[キーワード]

ETS-VIII, 衛星測位, 時刻比較

ETS-VIII, Satellite navigation, Time transfer

1 はじめに

2004年打上げ予定の技術試験衛星VIII型 (Engineering Test Satellite VIII: ETS-VIII)^[1]は、今後の宇宙活動に必要とされる先端的な共通基盤技術の開発を行うことを目的に開発された衛星である。搭載ミッションとしては、移動体通信実験用の大型展開アンテナ、衛星測位技術習得

のための衛星レーザ測距 (Satellite Laser Ranging: SLR) 用コーナキューブとセシウム原子時計 (High Accurate Clock: HAC) などが搭載される。

当所からは、衛星と地上の間で高精度な時刻比較が可能な装置、高精度時刻比較装置 (Time Comparison Equipment: TCE)^[2]を搭載し、衛星軌道上での原子時計の性能評価を行う。衛星搭載時計の性能評価は1980年代に行われたLASSO

実験^{[3][4]}が有名である。LASSOではSLR局を使用して搭載時計の性能評価を行ったのに対して、TCE及びTCE地上局では双方向時刻比較方式^[5]により搭載時計の性能評価を行う。この際、測距信号のほかに搬送波位相も観測量として使用できることから数10psでの比較精度が期待できる。また、衛星-地上局間で相互に信号を送り合うことから、SLRと同様の観測量を電波を使用して観測することも可能である。

TCE地上局は、固定局のほかに可搬局も開発される。これにより、衛星-地上のみでなく、TCEを仲介とした地上-地上の時刻比較も実現可能である。通信衛星を使用した衛星双方向時刻比較では、衛星の発振器が不安定なためコードのみを使用した時刻比較となるが、TCEを仲介した場合は、搬送波位相も使用でき、通信衛星使用による双方向より高精度での時刻比較が期待できる。

2 時刻比較システム

2.1 システム構成

TCEの原理については本誌^[2]に記述されているので、詳細はそちらに譲るとして、ここではTCEを用いた時刻比較原理を簡単に説明する。時刻比較システムは、衛星側にHACシステム及びTCE本体が搭載され、地上側はTCE地上局2局から構成される(図1)。

TCE地上局はUTC(CRL)を基準とした時系を持ち、TCEはHACから供給される1kpps及び10.23MHzを基準信号として動作する。時刻比較のための送受信信号にはS-Bandが使用され、地上局送信周波数が2656.390MHz、衛星送信周波数が2491.005MHzとなっている。両送信信号には、1.023MHzでコード拡散された測距信号が重畳される。使用する拡散符号はGPSのC/Aコードと同様の擬似雑音(Pseudo Random Noise:PRN)符号が使用される。これにより、GPS同様、擬似測距値と搬送波位相の2種類の観測量を使用して時刻比較を行うことが可能である。また、電離層補正を行うため、衛星から地上への片方向のみではあるがL-Band(1595.880MHz)の信号も送信される。

TCEは地上からの信号を受信する以外に、リ

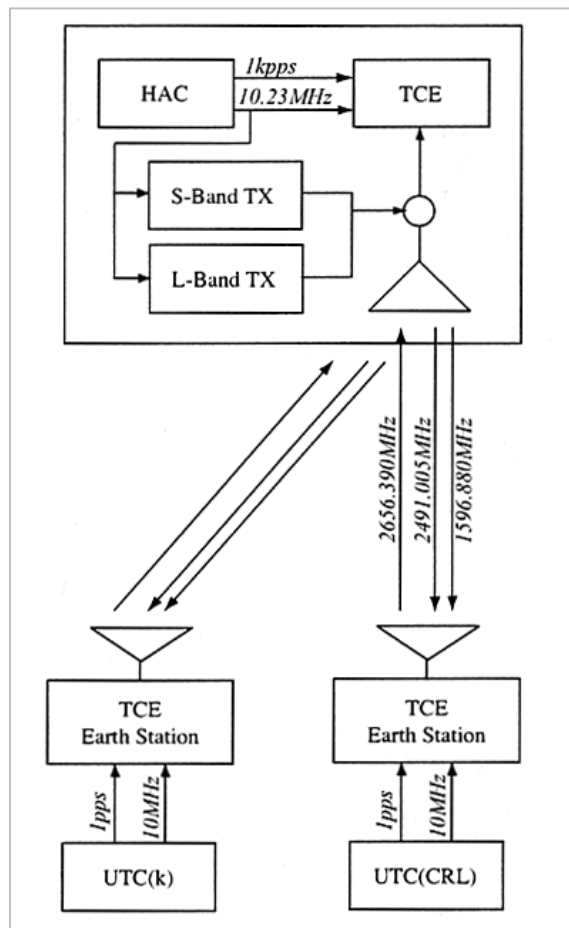


図1 TCE及びTCE地上局を用いた時刻比較システムの構成

アルタイムで局内遅延の変動をモニタするため、衛星の送信信号と校正信号を受信する機能を持つ。3信号を処理するユニットはIFに落とされた周波数を処理するため同一の構成となっている。そこでPRNコードを変更すれば、同時に3局の地上局を受信することが可能である。この機能を使用することで、地上局の間でTCEを仲介とした衛星双方向時刻比較を実現することが可能である。

2.2 観測量

TCE及び地上局が計測するコード及び位相の観測量は、周波数が違う以外はGPSと同様に表すことができる^[6]。コードの観測量は、

$$\begin{aligned}
 C_r(t) &= \|[r^s(t - \tau_r) + dr^s(t - \tau_r)] - [r_r(t) + dr_r(t)]\| \\
 &\quad + I_d + T + c[dt_r(t) - dt^s(t - \tau_r)] \\
 &\quad + c[d_{rr}(t) + d_r^s(t - \tau_r)] + e_r \quad (1) \\
 C^s(t) &= \|[r_r(t - \tau^s) + dr_r(t - \tau^s)] - [r^s(t) + dr^s(t)]\|
 \end{aligned}$$

$$+I_u + T + c[dt^s(t) - dt_r(t - \tau_r)] \\ + c[d_r^s(t) + d_{sr}(t - \tau_r)] + e^s \quad (2)$$

と表される。ここで、

C_r, C^s - 地球局、衛星それぞれで受信されるコード位相。単位は距離 (m)。

τ_r, τ^s - 地上から衛星、衛星から地上への伝搬時間。

r^s, dr^s - 衛星の重心位置とアンテナ位相中心からのずれ。

r_r, dr_r - 地球局の基準座標とアンテナ位相中心からのずれ。

T - 対流圏遅延。

I_u, I_d - UPLINK、DOWNLINK、それぞれの電離層遅延。

dt_r, dt^s - 地球局及び衛星のクロックオフセット。

d_{rr}, d_r^s - 地球局及び衛星の受信機内遅延。

d_{sr}, d_s^s - 地球局及び衛星の送信機内遅延。

である。

TCEとGPS受信機の違いは、GPSが衛星と受信機間の擬似距離を測定可能なのに対して、TCEは1kpps以外の時刻情報がないため、コード位相を測定値として出力する。そのため、搬送波同様波数不確定性を持つこととなる。ただし、周期は1msと非常に大きい。衛星と地上局の時計が1ms以上のオフセットを持つことはほぼないことから、時刻比較を行う場合、コードの波数不確定は無視することができる。

時刻比較を行うには二つの観測値の差を求める。

$$C_r(t) - C^s(t) = \{ \|[r^s(t - \tau_r) + dr^s(t - \tau_r)] - [r_r(t) + dr_r(t)]\| \\ - \|[r_r(t - \tau^s) + dr_r(t - \tau^s)] - [r^s(t) + dr^s(t)]\| \} \\ + \{ I_d - I_u \} \quad (3) \\ + c \{ [dt_r(t) - dt^s(t - \tau_r)] - [dt^s(t) - dt_r(t - \tau_r)] \} \\ + c \{ [d_{rr}(t) + d_{sr}(t - \tau_r)] - [d_r^s(t) + d_{sr}(t - \tau_r)] \} + e_r^s$$

ETS-VIIは静止軌道であること、衛星と地上局が同時に信号を送信することから、この間に動く衛星の距離は小さく $\tau_r \approx \tau^s$ とみなすことができる。また、衛星-地球局間の距離を考えた場合、後から述べる相対論補正を別とすれば、 $r^s(t - \tau_r) \approx r^s(t)$, $r_r(t - \tau^s) \approx r_r(t)$ とおいて計算しても問題ない。 τ_r, τ^s は100ms程度の大きさなので $dt_r(t) \approx dt_r(t - \tau^s)$, $dt^s(t) \approx dt^s(t - \tau_r)$ とする。また、局内遅延は $d_r = d_{rr} - d_{sr}$, $d^s = d_r^s - d_s^s$ とすると、式3は式4のように簡単な式で書き直せる。

$$C_r(t) - C^s(t) = 2c(dt_r - dt^s) + c(d_r - d^s) \\ + (I_d - I_u) + e_r^s \quad (4)$$

式4において、局内遅延及び電離層遅延を別途求めることができれば、衛星と地上の時刻差を求めることができる。

搬送波位相も、コードと同様に以下のように表すことができる。

$$\Phi_r(t) = \|[r^s(t - \tau_r) + dr^s(t - \tau_r)] - [r_r(t) + dr_r(t)]\| \\ - I_d + T + c[dt_r(t) - dt^s(t - \tau_r)] \\ + c[\delta_{rr}(t) + \delta_s^s(t - \tau_r)] \\ + \lambda_d[\phi_r(t_0) - \phi^s(t_0)] + \lambda_d N_r + \varepsilon_r \quad (5)$$

$$\Phi^s(t) = \|[r_r(t - \tau^s) + dr_r(t - \tau^s)] - [r^s(t) + dr^s(t)]\| \\ - I_u + T + c[dt^s(t) - dt_r(t - \tau_r)] \\ + c[\delta_r^s(t) + \delta_{sr}(t - \tau_r)] \\ + \lambda_u[\phi^s(t_0) - \phi_r(t_0)] + \lambda_u N^s + \varepsilon^s \quad (6)$$

搬送波位相の観測量では、電離層の遅延が群遅延から位相遅延になるため、コード位相の観測量と比較すると符合は逆になる。機器内遅延はコードと同一ではないので、 d の代わりに δ で表すことにする。初期位相($\phi_r(t_0)$, $\phi^s(t_0)$)及び波数不確定(N_r , N^s)の項が増える。誤差はコードに比べて小さくなるので ε を使用して別に表す。

搬送波位相においても、コード位相と同様の前提条件を使用し、以下のように時刻差を求めることができる。

$$\Phi_r(t) - \Phi^s(t) = 2c(dt_r - dt^s) + c(\delta_r - \delta^s) - (I_d - I_u) \\ + \lambda_d[\phi_r(t_0) - \phi^s(t_0) + N_r] \\ - \lambda_u[\phi^s(t_0) - \phi_r(t_0) + N^s] \\ + \varepsilon_r^s \quad (7)$$

搬送波の周期は400ps程度と非常に短いため、コードのように波数不確定を無視することはできない。このため、搬送波位相を用いて時刻比較を行う場合は、何らかの手段により波数を確定することが必要となる。

2.3 時刻比較精度

2.3.1 システム雑音

TCEのシステム雑音を調べるために、技術試験モデル(EM2)を使用し、図2に示す特性試験を行った。

図中のHROGは、基準周波数の位相や周波数

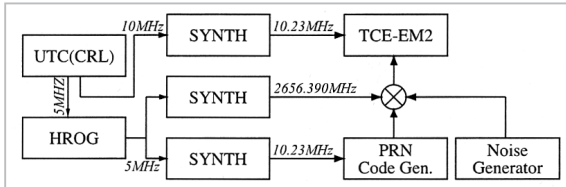


図2 技術試験モデル(EM2)のシステム雑音測定に使用した測定系のシステム構成

を微小にずらすための装置である。今回の実験ではUTC (CRL)の5MHzに対して、 3×10^{-6} Hz周波数をずらして測定した。また、実際の衛星からの信号を模擬するため、雑音発生機により白色雑音を混入して測定している。今回の実験では $C/N_0 \approx 54$ dB程度の雑音を入れた。なお、実環境では65dB以上の回線品質が期待される。

図3に、コードと搬送波の測定結果、図4に最小二乗法で推定した一次フィット後の搬送波の残差を示す。最小二乗法で推定した傾きは0.59ps/sであり、HROGの補正量 3×10^{-6} Hz(≈ 0.6 ps/s)と一致している。この時の標準偏差はコードが5.4ns、搬送波位相が36psとなった。図4の搬送波位相の残差には大きなうねりが表れている。この原因は、送信信号用搬送波(2656.390MHz)を作るためのシンセサイザの安定度が悪かったためと思われる。

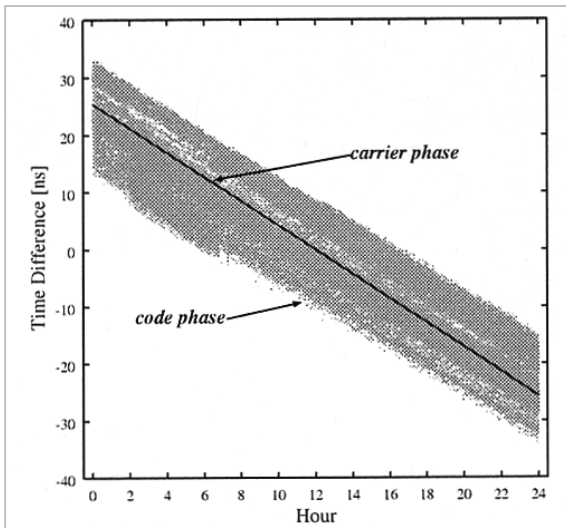


図3 HROGにより 3×10^{-6} Hzずらした周波数をEM2で測定した結果。分散が大きなのがコード位相、中心でほぼ直線に見えるのが搬送波位相による結果

2.3.2 搬送波位相の波数不確定

搬送波位相を用いた時刻比較では、観測精度

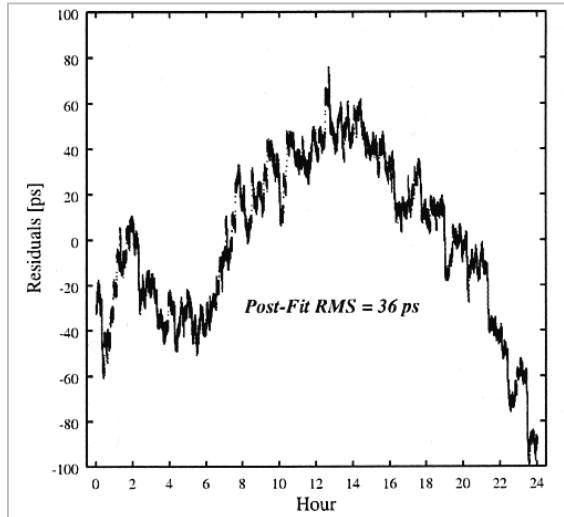


図4 搬送波位相の測定値に、最小二乗法による一次フィットを行った後の残差

のほかに波数確定精度で比較精度が決まる。波数確定では、最小二乗法による実数解の算出と、求めた実数解の整数への確定の2段階の処理がある。実数解を整数に確定することができると、前節で述べた比較精度を得ることができる。GPSでは二重位相差を観測量とすることで実数解を整数へ確定することが可能であるが、TCEでは衛星が1個しか存在しないため実数解までの解しか求めることができない。整数に確定できない場合は、電源の再投入時には波数確定精度に起因する誤差を持つこととなる。1回の観測時間は実験計画により決まることから、長時間での時刻比較では波数確定による精度劣化が問題となる。

実数解を求めるためには、式(4)、(7)の観測方程式を解くことで求める。局内遅延はほぼ一定と考えられることから、比較精度の議論では無視する。よって、電離層の誤差とコードの観測精度で波数の確定精度は決まる。二つの観測量は、電離層の影響を別とすれば同様に変化することから、時間平均により推定精度を稼ぐことができる。コードの観測精度は前節の結果から5ns程度であり、1時間平均を行うことで80ps程度まで観測精度を上げることができる。

なお、平均化の間は搬送波位相にサイクルスリップが発生しないことが条件となるが、ETS-VIIIの場合は静止軌道であり、衛星・地上局ともパラボラアンテナを使用することからサイクルスリップが起きる可能性は低いと思われる。

もう一つの問題点である電離層の影響について

では、二周波観測量から周波数分散性を利用して求めることができる[2]。ただし、コードの観測量から求めた電離層の遅延時間は、コードの観測誤差に依存した高周波成分を持つため、波数確定精度を劣化させることとなる。そこで、最初はコードの観測量から求めた電離層遅延を使用し、ある程度の精度で波数を確定した後、搬送波を使用して電離層遅延を求め、その値を使用して波数を確定するなどの繰り返し処理を行うことで精度を上げる必要がある。

3 時刻比較実験

3.1 搭載原子時計

搭載原子時計の性能評価は、本ミッションの大きな目的の一つである。原子時計のクロックオフセット決定精度は測位精度に影響することから、UTC (CRL) と HAC の時刻差を高精度に求めることは、測位ミッションに対しても大きなインパクトを持つ。また、衛星搭載時計と地上時計の長期的な性能評価は LASSO 以外には例がなく先進的な試みといえる。LASSO では搭載時計は水晶発振器を使用していたため、安定度は $10^{10}/1\text{day}$ 程度となっている。HAC はセシウム時計を使用しているため $10^{11}/\sqrt{\tau}$ と LASSO に比べ、より高精度な時計の振舞を調べることができる。

地心座標時(Geocentric Coordinate Time: TCG) に対する時計の歩度は重力ポテンシャルに依存することがよく知られている[7][8]。HAC もこの影響を考慮して $5.5 \times 10^3 \text{ Hz}$ 周波数を遅らせてある。TCE のような高精度の時刻比較では、これら一般相対論効果の検証にも効果を発揮することが期待される。

3.2 衛星仲介による双方向時刻比較

TCE では固定局と可搬局の間で衛星双方向時刻比較を行うことができる。国際原子時の決定に使用されている通信衛星を用いた衛星双方向時刻比較では、UPLINK/DOWNLINK の周波数変換に衛星搭載の発振器が使用されるため、時刻比較を行う地球局の搬送波位相を使用することはできない。これに対し TCE では、HAC と地球局との間で搬送波位相を用いた時刻比較を行うため、結果として2局間で $\leq 100\text{ps}$ 程度の精度

が実現可能である。

衛星双方向時刻比較は時刻比較を行う2局間で相互に信号を送り合うことにより、衛星の位置や地上局の位置に関係なく高精度な時刻比較を実現するものだが、実際には地球回転の影響により信号の伝搬経路に差が生じる。回転座標系において、時刻 t_0 に衛星 x_{ra} から送信された信号が、時刻 t_1 に地上局 x_{rb} に届くまでの時間に対する補正項 δ は式 (8) のように表される[9]。

$$\begin{aligned} T &= \frac{R_0}{c} + \delta \\ &= \frac{R_0}{c} - \frac{U_g R_0}{c^3} + \frac{\mathbf{R}_0 \cdot \mathbf{v}_b}{c^2} + \frac{R_0}{2c^3} \left[v_b^2 + \mathbf{R}_0 \cdot \mathbf{a}_b + \frac{(\mathbf{R}_0 \cdot \mathbf{v}_b)^2}{R_0^2} \right] \\ &\quad + \frac{2GM_E}{c^3} \ln \left[\frac{x_{rb} + \mathbf{R}_0 \cdot \mathbf{x}_{rb}/R_0}{x_{ra} + \mathbf{R}_0 \cdot \mathbf{x}_{ra}/R_0} \right] \end{aligned} \quad (8)$$

ここで、 U_g はジオイド面上での重力ポテンシャル、 R_0 は回転座標系での衛星から地球局へのベクトル、 v_b は慣性座標系での地球局の速度ベクトル、 a_b は慣性座標系での地球局の加速度ベクトル、 G は重力定数、 M_E は地球質量を表す。

なお、この補正項は ps 以下の量については考慮していない。式 (8) の右辺の2項から4項が座標系の違いに起因する物で Sagnac 効果と呼ばれる。最後の項は重力ポテンシャルに依存する項である。静止衛星を使用した衛星双方向時刻比較では、衛星と地上局の距離 R_0 は一定と考えて計算できるため、衛星から地上、地上から衛星への伝搬で c^{-1} と c^{-3} の項は相殺される。同様に、重力ポテンシャルに依存する項も、衛星から地上、地上から衛星への変位は同じなので相殺される。結果として $(\mathbf{R}_0 \cdot \mathbf{v}_b)/c^2$ が補正項として残る。

CRL が行っているアジア地域の衛星双方向時刻比較ネットワーク[10]では、PAS8を使用したオーストラリア (AUS) とのリンク、JCSAT を使用した台湾 (TL)、中国 (NTSC) とのリンクが組まれており、このリンクにおける Sagnac 補正は表1のようになっている。実際の観測では、Sagnac 効果の影響と2局間の時計の差を分離することができないので、純粋に Sagnac 効果の影響を検証することは一般には困難である。TCE 地上局をこれら既存のネットワークに組み込むことで、2局の時刻差を TCE 仲介による観測結果と通信衛星による観測結果から求めることができる。2種類の結果は、基準信号は共通で衛星

配置が異なることから、両者の差から Sagnac 補正の差が求まり、式 (8) から計算した値と比較することで、実測による Sagnac 補正の検証が期待できる。

表 1 アジア地域における衛星双方向時刻比較ネットワークのための Sagnac 補正量

CRL and	Sagnac 補正	Satellite
AUS	43.86 ns	PAS8
NTSC	-85.29 ns	JCSAT 1B
TL	-63.07 ns	JCSAT 1B

3.3 光と電波による測距の比較

TCE の観測量は、式 (5)、(6) の和をとることで衛星と地球局間の往復距離を求めることができる。衛星と地球局の距離を $\rho_r^s(t, t - \tau_r^s)$ 、局内遅延を $\delta_r^s = \delta_{sr} + \delta_{rr}$ 、 $\delta_s^s = \delta_s^s + \delta_r^s$ とすると式 (9) が求まる。

$$\begin{aligned} \Phi_r(t) + \Phi^s(t) = & 2\rho_r^s(t, t - \tau_r^s) \\ & - \{I_d + I_u\} + 2T + c(\delta_r^s + \delta_s^s) \\ & + \lambda_d[\phi_r(t_0) - \phi^s(t_0) + N_r] \\ & + \lambda_u[\phi^s(t_0) - \phi_r(t_0) + N^s] \\ & + \varepsilon_r^s \end{aligned} \quad (9)$$

ETS-VIII では SLR 観測が行え、当所の SLR 観測局 [11] でも ETS-VIII の追尾が計画されている。可搬局を SLR 局とほぼ同位置に設置し、SLR, TCE の同時観測を行うことで光と電波による測距の違いを観測することが可能である。光と電波の違いは、大気中の伝搬遅延に大きく影響することから、同時観測による結果から、乾燥大気と湿

潤大気の違いや、電離層の影響などを評価できると思われる。

ただし、式 (7) と式 (9) の比較で分かるように未知数が増えるため波数確定が時刻比較に比べて難しくなる。また、SLR との比較では絶対値の比較が重要となるが、TCE では構造上、局内遅延の絶対値を決定できなかったため、比較の際オフセットが生じてしまう。今後、これらをどのように評価していくかが、実際の解析を行っていく上での課題である。

4 おわりに

衛星搭載時刻比較計画は、衛星と地上の原子時計を数 10ps 程度の精度で測定するという世界的にも先駆的な研究である。当所では衛星搭載メーザの開発も行われており、軌道上の原子時計の状態を長期的に観測することは、搭載メーザ開発にとっても重要な基礎データになると思われる。また、国内において、独自の測位衛星技術の確立も望まれていることから、衛星と地上間の高精度時刻同期は今後更に重要性を増すと考えられる。このためにも、今回の計画で基礎データの収集と解析手法の確立を行っていくことの意義は大きいと考えられる。

謝辞

TCE の開発及び試験に際し様々な協力を頂いた、宇宙開発事業団衛星総合システム本部 ETS-VIII プロジェクトチーム及び衛星運用技術部の方々に感謝します。

参考文献

- 1 M.Homma, S.Yoshimoto, N.Natori, and Y.Tsutumi, "Engineering Test Satellite-8 for Mobile Communication and Navigation Experiment", IAF, no. IAF-00-M.3.01, pp.256-263.
- 2 高橋靖宏, 今江理人, 後藤忠広, 中川史丸, 木内等, 細川瑞彦, 相田政則, 高橋幸雄, 野田浩幸, 浜真一, "ETS-VIII 搭載用時刻比較装置 - その 1 搭載機器の開発 -", 本特集.
- 3 P.Fridelance, and C.Veillet, "Operation and data analysis in the LASSO experiment", Metrologia, 32, pp.27-33, 1995.
- 4 E.Samain and P.Fridelance, "Time Transfer by Laser Link (T2L2) experiment on Mir", Metrologia, 35, pp.151-159, 1998.
- 5 今江理人, 鈴山智也, 後藤忠広, 渋谷晴久, 中川史丸, 栗原則幸, 清水義行, "衛星双方向法", 本特集.

- 6 P.J. Teunissen and A. Kleusberg, "GPS for Geodesy", 2nd Edition, Sec. 5, Springer, 1998.
- 7 細川瑞彦, "四次元時空と基準座標系", 通信総合研究所季報, Vol.45, Nos.1/2, pp.3-18, March/June 1999.
- 8 P.Wolf and G. Petit, "Relativistic theory for clock syntonization and the realization of geocentric coordinate times", Astron. Astrophysics, 304, pp.653-661, 1995.
- 9 G.Petit and P.Wolf, "Relativistic theory for picosecond time transfer in the vicinity of the Earth", Astron. Astrophysics, 286, pp.971-977, 1994.
- 10 S.Hongwei, M.Imae, and T.Gotoh, "Performance of Two-way Satellite Time and Frequency Transfer in Asia-Pacific Region", 測地学会誌, Vol.49, No.2, pp.135-142, 2003.
- 11 H.Kunimori, K.Imamura, F.Takahashi, T.Itabe, T.Aruga, and A.Yamamoto, "New Development of Satellite Laser Ranging System for Highly Precise Space and Time Measurements", Journal of the Communications Research Laboratory, Vol.38, No.2, pp.303-317, 1991.



ごとうただひろ
後藤忠広
電磁波計測部門時間周波数計測グループ
ブ研究員
GPS 時刻比較



ほそかわみずひこ
細川瑞彦
電磁波計測部門原子周波数標準グループ
ブリーダー 理学博士
原子周波数標準、時空計測

なかかわふみまる
中川史丸
電磁波計測部門時間周波数計測グループ
ブ専攻研究員 博士(理学)
衛星測位、衛星時刻比較

たかはしやすひろ
高橋靖宏
電磁波計測部門時間周波数計測グループ
ブリーダー主任研究員
衛星通信、衛星測位システム

ふじえだみほ
藤枝美穂
電磁波計測部門時間周波数計測グループ
ブ専攻研究員 博士(理学)
衛星測位、精密時刻比較



いまえみちと
今江理人
電磁波計測部門時間周波数計測グループ
ブリーダー
周波数標準



きこうちひとし
木内 等
無線通信部門光宇宙通信グループ主任
研究員 博士(工学)
電波干渉計、空間光伝送



あいだまさのり
相田政則
企画部企画室主任研究員
周波数時刻標準



たかはしゆきお
高橋幸雄
情報通信部門けいはんな情報通信融合
研究センター研究主管
測位技術、位置天文、VLBI