

高精度時刻比較装置を用いた高精度測距実験

高橋靖宏 國森裕生 中川史丸 田淵 良 雨谷 純 土屋 茂 浜 真一

宇宙航空研究開発機構（JAXA）と情報通信研究機構（NICT）は、衛星測位の基盤技術の修得のため、技術試験衛星VIII型（ETS-VIII）を用いて実験を実施した。NICTはETS-VIII搭載高精度時刻比較装置（TCE）を開発し、衛星-地上間高精度時刻比較実験を行ってきた。このデータを用いて高精度測距が可能であり、本稿ではその原理を説明し、結果を報告する。

1 まえがき

ETS-VIII（技術試験衛星VIII型）^[1]は、2006年12月に打ち上げられた今後の宇宙活動に必要となる先端的な共通基盤技術の開発を行うことを目的とした衛星であり、大型展開アンテナを用いた移動体通信実験をはじめ、各種実験が実施されてきた。

ETS-VIIIの技術開発項目の1つとして、我が国の人工衛星では初めて、原子時計が搭載され、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。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]が情報通信研究機構（NICT）のミッションとして搭載され、実験を計画^[3]し、実施してきた。一方、測位衛星としての基礎実験の項目の1つとして宇宙航空研究開発機構（JAXA）が高精度軌道推定を実施している。時刻比較のデータを用いることで高精度測距が可能であり、その原理、及び結果等について報告する。

2 高精度測距実験の概要

2.1 高精度測距の必要性

一般の通信衛星等の軌道決定では数百m～数kmの精度で良かったが、米国のGPS（Global Positioning System）等の衛星測位システムで用いる衛星は、衛星の位置を基準としてユーザの位置を求めるため、衛星の位置決定が重要である。そのため、JAXAではETS-VIIIの軌道決定が実験の重要なテーマであり、Sバンド・Lバンドの電波、及びSLR（Satellite Laser Ranging）を用いて15m（目標100m以下）の精度で軌道決定を達成した^[4]。

一方、NICTはTCEを用いて衛星-地上間高精度時刻比較実験を行い、衛星搭載原子時計の軌道上の振る舞いを観測するのが実験の主目的だが、当該データを用いて、高精度測距が可能であり、どの程度の精度で測距が可能かを見極めるため、測距処理を行った。

用いて、高精度測距が可能であり、どの程度の精度で測距が可能かを見極めるため、測距処理を行った。

2.2 高精度時刻比較実験システム

NICTで実施してきた高精度時刻比較実験の実験システムは、衛星搭載ではJAXAが開発した高精度時刻基準装置（HAC）^[5]、並びにNICTが開発したTCE、及び高精度時刻比較実験用地球局（TCE地球局（固定局、可搬局））からなるが、詳細は文献を参照されたい。

2.3 高精度測距の原理

衛星-地上間高精度時刻比較実験^[6]は、双方向時刻比較法を用い、双方から時刻比較信号を送信し、それぞれで受信し、その受信データから計算により、2個所の時計の時刻差を求める。その原理を以下に示す。本システムでの衛星、及びTCE地球局での測定値を、それぞれ τ_s 、 τ_e とし、衛星の時刻を T_s 、地球局の時刻を T_e 、及び光速を c とすると、 τ_s 、及び τ_e は、

$$\text{Uplink: } \tau_s = \tau_g + T_s - T_e \quad (1)$$

$$\text{Downlink: } \tau_e = \tau_g + T_e - T_s \quad (2)$$

で表され、その差から衛星と地球局の時刻差 ΔT は、以下により求められる。

$$\Delta T = (\tau_s - \tau_e) / 2 \quad (3)$$

一方、その和からは、衛星と地球局間の伝搬時間 τ_g 、及びその距離 R は、以下により求めることができる。

$$\tau_g = (\tau_s + \tau_e) / 2 \quad (4)$$

$$R = c \cdot \tau_g = c \cdot (\tau_s + \tau_e) / 2 \quad (5)$$

これは、アップリンクとダウンリンクの伝搬時間が同じで、機器の遅延時間の変化が無い理想的な場合であるが、実際にはアップリンクとダウンリンクの周波数は相違し、それにより特に電離層遅延の影響を受け、機器の遅延時間も温度等の影響を受け変化することになる。双方向時刻比較では、原理上その影響は殆ど相殺されるが、測距では残ることになるが、測距は双方の時計の時刻差と、その変化は関係しない。

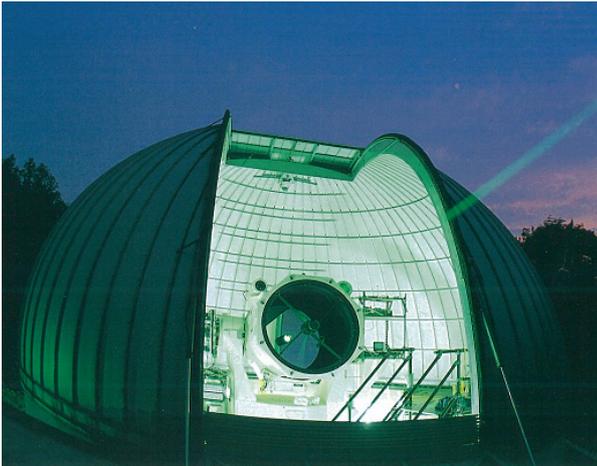


図1 光センタ (直径 1.5m 望遠鏡)

また、搬送波位相で1.2mのアンビギュイティ、及びコード長1msに相当する約300kmのアンビギュイティが有り、更にLRRAと時刻比較で用いるアンテナの位置関係等を押さえていないので絶対値は不明である。

2.4 測距実験

2.3に示したように、衛星-地上間時刻比較のためのTCE、及びTCE地球局での取得データから高精度測距が計算によりできるが、その検証をする必要がある。ETS-VIIIには、レーザ光で測距を行うためのLRRA (Laser Retroreflector Array) が搭載され、TCE地球局(主局)があるNICT本部(東京都小金井市)には、静止衛星とのレーザ測距が可能な1.5mの望遠鏡を持つ光センタ(図1)があり、光センタで取得したレーザレンジングのデータを使用でき、これをリファレンスとして用いた。なお、TCE地球局(固定局)と光センタの間は約200m離れているが、ここでは測距の性能確認だけとして、それを無視した。

3 測距実験結果の一例

TCE地球局固定局で衛星との衛星-地上間時刻比較の測定データから測距計算した結果(コード位相、キャリア位相)と光センタでのSLRによる測距の結果(約5分平均値)の一例を図2に示す。それぞれ、衛星との往復の時間を示しており、上述のように、TCEでの測距は、アンビギュイティを持ち、絶対値は不明であるが、TCEでの測距結果の変化はSLRの結果とよく一致している。また、SLRでの測距結果と時刻比較データでの測距結果の差分(SLR-コード位相、SLR-キャリア位相)を図3に示す。これは、絶対値は意味を持たないことから、それぞれ0ns、10nsを開始点としてプロットした。差の変動は最大で約8.6nsであり、距離

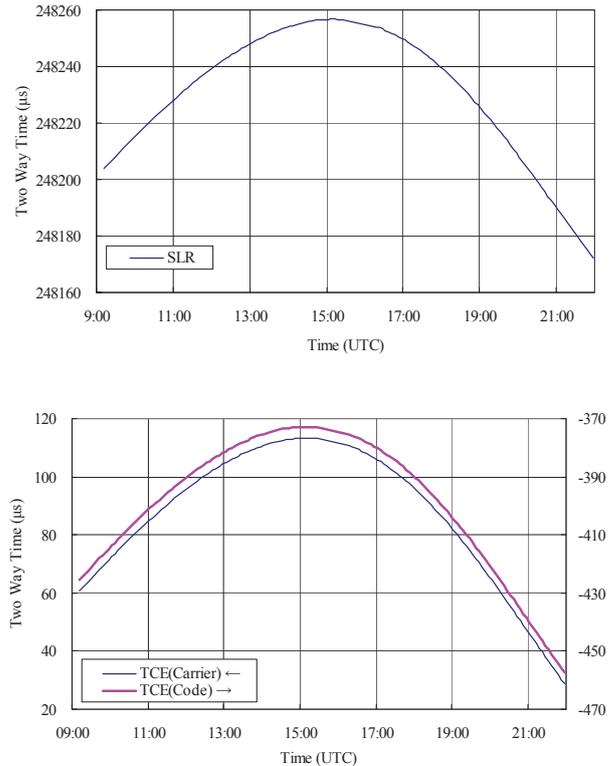


図2 SLRでの測距結果(上)、時刻比較データでの測距結果(下)

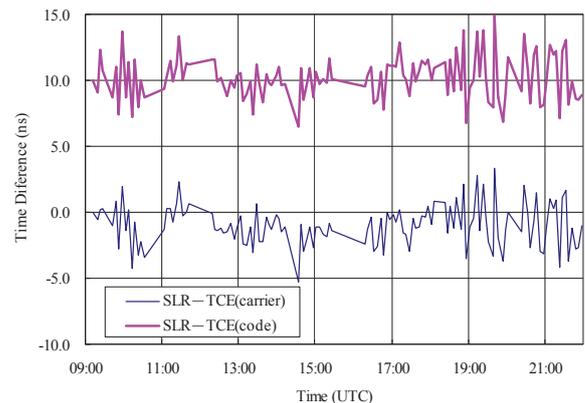


図3 SLRでの測距結果と時刻比較データでの測距結果の差分

にして約2.6mである。これはJAXAでの軌道決定精度の15mを大幅に下回る結果となった。

4 おわりに

双方向時刻比較法による衛星-地上間時刻比較データから、高精度測距ができることを示した。SLRは夜間の晴天時にしか測距できないのに比べ、電波での測距は、昼夜を問わず、また天候を問わず(大雨の際の降雨減衰により回線断にならない限り)高精度測距が可能である有利性がある。測位衛星の軌道決定に、本システムを用いることにより、更に高精度軌道決定が

可能になると考えられる。

謝辞

TCE・TCE 地球局の開発メーカーである日本通信機(株)・コスモリサーチ(株)、並びに ETS-VIII の開発・運用、及び HAC の開発・実験に携われた JAXA・関係企業の関係各位に深謝いたします。また、NICT・その他の機関では、1997 年の TCE 実験の構想期以降、TCE・TCE 地球局の開発・試験・実験等に多くの方が携わってきており、その関係各位に感謝します。

【参考文献】

- 1 Homma M., et. al., "Engineering Test Satellite-8 for Mobile Communication and Navigation Experiment," IAF, No. IAF-00-M.3.01, pp. 256-263, 2000.
- 2 高橋, 他, "ETS-VII 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.
- 3 高橋, 他, "高精度時刻比較装置を用いた実験計画," 通総研季報, Vol. 79, Nos. 3/4, pp. 241-246.
- 4 塚島, "LDR 及び HAC の開発成果," 技術試験衛星 VII 型 (ETS-VII) 「きく8号」成果・利用シンポジウム, Oct. 2009.
- 5 野田, 他, "高精度時刻基準装置 (HAC)," 通総研季報, Vol. 79, Nos. 3/4, pp. 89-94.
- 6 中村, 他, "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.

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

國森裕生 (くにもり ひろお)

ワイヤレスネットワーク研究所宇宙通信システム研究室主任研究員
光通信、レーザ測距

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