

# GNSS/PPP時間・周波数比較における解析戦略

市川 隆一 (情報通信研究機構)      ホビガー トーマス (チャルマース工科大学、情報通信研究機構)  
後藤忠広 (情報通信研究機構)      瀧口博士 (情報通信研究機構)      雨谷純 (情報通信研究機構)  
宮内結花 (情報通信研究機構)      成田秀樹 (情報通信研究機構)      今村國康 (情報通信研究機構)  
関戸衛 (情報通信研究機構)

## Evaluation of Processing Strategy for Time and Frequency Transfer using

### GNSS Precise Point Positioning Technique

ICHIKAWA Ryuichi (NICT),

HOBIGER Thomas (Chalmers University of Technology, NICT), GOTO Tadahiro (NICT), TAKIGUCHI Hiroshi (NICT),  
AMAGAI Jun (NICT), MIYAUCHI Yuka (NICT), NARITA Hideaki (NICT), IMAMURA Kuniyasu (NICT), and SEKIDO  
Mamoru (NICT)

#### Abstract

Time and frequency (T&F) transfer using the Global Navigation Satellite System (GNSS) code and carrier phase observations is a popular technique for precise clock comparison. GNSS data processing based on precise point positioning (PPP), which is the standard technique for geodetic applications, allows highly precise T&F comparisons between remote clocks. The PPP least-squares solutions showed improved in stability relative to traditional GPS time synchronization methods such as the common view GPS, reaching few parts in  $10^{-15}$  at averaging times of one day [1]. In the PPP processing, the station position, atmospheric propagation delay, and a receiver clock offset are simultaneously estimated. In addition, the PPP time transfer processing requires precise satellite clocks and orbits, which are provided by the International GNSS Service. Thus, to perform the near real-time comparison of UTC(k)'s using GNSS, evaluation of the uncertainties of the unknown parameters and the data quality of satellite clocks and orbits is important. The aim of this study is to investigate the suitable processing strategy to determine the precise differences between remote clocks. We have installed GNSS stations at the Koganei Headquarters of the National Institute of Information and Communications Technology (NICT), the Okinawa Electromagnetic Technology Center, the Kashima Space Technology Center, and two LF standard T&F transmission facilities. Signals from frequency standards, i.e., active hydrogen masers or cesium atomic clocks, are directly supplied to the GNSS receivers at these stations. The GNSS data sets are processed using C5++ software [3]. The International GNSS Service (IGS) provides precise GNSS orbit products and clock solutions via IGS Analysis Centers. We carried out comparisons of T&F processing using each orbit solution. Currently, the IGS final orbit and clock solutions have accuracies better than  $2.5\text{ cm}$  and  $75\text{ ps}$ , respectively and the IGS rapid solutions (IGR) have similar quality [4], [6]. This implies that the T&F stability using final solutions is almost identical to that using the IGR solutions. The near real-time parts of the Ultra-rapids (IGU) have an accuracy of  $\sim 3.0\text{ cm}$ , while the real-time parts have an accuracy of about  $5\text{ cm}$ . Thus, the T&F stability result using the IGU is worse less than the both IGS final and IGR results. We also carried out a comparison of PPP clock estimates based on three modern ocean tide models [7]~[9]. The results of frequency stability analysis are identical for each model. Finally, in order to evaluate the atmospheric correction methods, we compared frequency stabilities based on three different atmospheric correction methods (GMF2 [11], GMF2 with linear gradient estimation [12], VMF1 [13] with linear gradient estimation) and ray-tracing estimation [10]. According to the present result of analyzed GNSS data sets, during summer season of 2013, the stability of the each link using four atmospheric correction methods is almost identical.

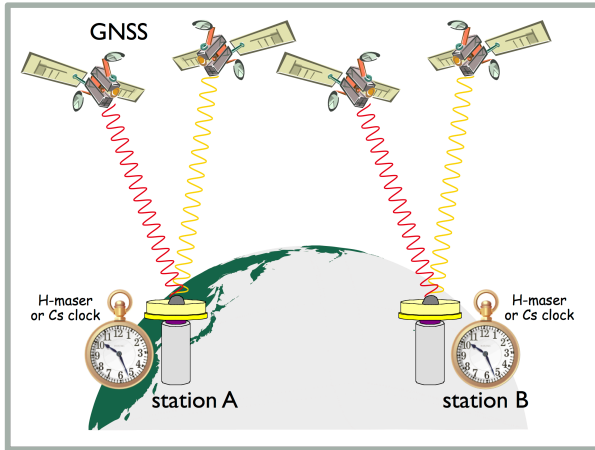


Figure 1 Schematic image of GNSS PPP time transfer.

## 1. はじめに

GNSS 技術を用いた時間・周波数比較は高精度比較手法の一つとして実用段階にある。特に、測地分野で実績のある高精度単独測位解析 (PPP:precise point positioning) を用いた時間・周波数比較は、GNSS 時間・周波数比較技術の中で最も高安定・高精度が期待できる手法であり [1]、国際度量衡委員会 (BIPM) での国際原子時 (TAI) の比較においても、衛星双方向方式と並んで主流となりつつある。将来的には、PPP 法による時間・周波数比較が定常運用されることが想定されるが、それを見越して最適な解析戦略を確立させることは重要である。前回の測地学会においては、特に中性大気遅延の推定法の違いによる時間・周波数比較結果を評価したが、今回は、使用する軌道情報や海洋潮汐モデルの違いによる解析結果の違いについても調べた。

## 2. GNSS 時間・周波数比較

GNSS 時間・周波数比較とは、Figure 1. に示すように、GNSS 衛星 (多くの場合は GPS) を介して距離を隔てた 2 地点間の時計を比較する手法を言う。最近は、通常の測地解析と同様に PPP 解析を用いることが主流となりつつある [6]。従来用いられてきた GPS コモンビュー法と比較して、GNSS/PPP 時間・周波数比較ははるかに高い安定度が期待でき、条件が良ければ 1 日平均で  $10^{-15}$  台に達する (例えば 1 秒の平均化時間で  $10^{-12}$  の安定度とすれば、1 秒間で 1 ピコ秒の不確かさがあることを意味する)。解析処理では、測地解析と同様に、正確な軌道情報と衛星搭載のクロック情報を入力し、大気遅延や受信機クロックを未知パラメータとして推定する。そのため、軌道情報の品質や使用する潮汐や大気等の物理モデルの違いがクロックの推定精度に影響する可能性がある。

## 3. データと解析

本研究で使用した GNSS 観測点の配置を Figure 2. に示す。これらは、いずれも情報通信研究機構 (NICT) の拠点であり、小金井本部、沖縄電磁波技術センター、鹿島宇宙技術センター、及び 2 箇所の標準電波送信所 (おたかどや山、及びはがね山) に観測点が設置されている。いずれの観測点も、2 周波対応の測地用 GNSS 受信機が設置されている。これらには、水素メーザ、あるいは Cs 原子時計から供給される高安定標準信号が入力され、受信機内部のクロックはこれに同期している。観測点の内、小金井設置の KGN2、及び SEPB は、NICT 時空標準研究室が NICT 小金井本部で生成する協定世界時 (UTC(NICT)) に直接同期する。また、小金井の観測点 KGNI は、UTC(NICT) を生成する場所から 200m 離れた位置にあるが、両者の間は NICT で開発した位相補償周波数信号伝送装置 [2] により光ファイバーで結ばれ、共通の標準信号を原振とする。おたかどや山の SEPF、及びはがね山の SEPF と小金井との間では、GPS、及び衛星双方向方式により常時時刻比較がなされ、安定した標準電波の放送を確保している。本研究では、これらの観測点から得られた GNSS データと国際 GNSS 事業 (IGS:International GNSS Service [4], [5]) が提供する軌道情報を用いて通常の GNSS/PPP 測位解析を行い、未知パラメータとして 3 次元局位置、大気遅延、受信機クロックを同時推定した。解析には、NICT、一橋大学、及び宇宙航空研究開発機構 (JAXA) が共同で開発した統合測地解析ソフトウェア *c5++* [3] を用いた。今回は、解析条件として、

- 軌道情報
- 海洋潮汐モデル

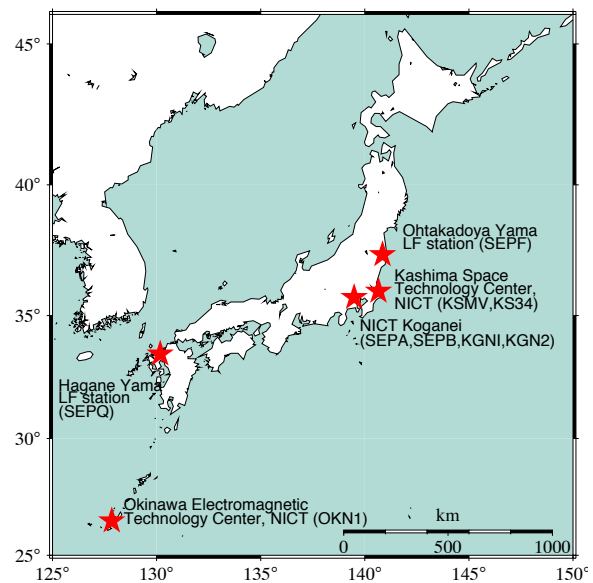


Figure 2 Station location used for this study.

• 大気遅延除去モデル  
の3通りを様々に変えてみて結果を比較した。まず、軌道情報については、IGS が提供する、

- (1) 超高速暦 (IGU: Ultra-Rapid orbit)
- (2) 速報暦 (IGR: Rapid orbit)
- (3) 最終暦 (IGS: Final orbit)

の3種類[6]、

海洋潮汐モデルについては、IERS Conventions 2010 で推奨される FES2004 [7]、比較的最近のモデルである OSU12 [8]、定評のある NAO99 [9] の3種類で比較した。なお、暦の違いの比較では、各軌道情報に対応する衛星時計データを解析に用いている。また、大気遅延除去の条件としては、

(1) 数値気象予報データを用いた波線追跡ツール KARAT [10]

(2) GMF2 マッピング関数 [11]

(3) GMF2 マッピング関数と大気勾配推定マッピング関数 [12]

(4) VMF1 マッピング関数 [13] と大気勾配推定マッピング関数、

の4通りで比較した。なお本研究では、2013年8月~10月に取得されたデータを用いたが、複数回の欠測があるため、連続でデータ取得できた二週間、ないし20日間のデータを使用した。

#### 4. 解析結果

一例として、小金井 SEPB 局と鹿島 KS34 局との間で、軌道情報を変えて解析した結果を Figure 3. に示す。これらは、2地点間の受信機クロック推定値差分の時系列データから計算した周波数安定度を修正アラン分散で表現している。横軸には受信機クロックの推定値の平均化時間を、縦軸にはその平均化時間での安定度を示す。これから、一見して2つの特徴がわかる。一つは IGR 暦を用いた場合の結果が IGS 暦による結果と遜色なく、ほぼ同程度の安定度を示すこと、二つ目は、IGU 暦による結果が IGR 暦、及び IGS 暦による結果に比べてほぼ1桁程度劣ることである。これらの結果は、IGS が公式に示す各軌道情報の精度、特に衛星時計データの精度と調和的である。また、大気遅延除去モデルの違いについて、Figure 4. に小金井 KGNI 局と沖縄 OKN1 局との間での周波数比較結果を示す。この図では、前項で述べた4通りの大気遅延量補正手法の違いによる影響は明瞭ではない。なお、半日から1日程度の平均化時間で安定度が劣化している原因は、沖縄局の受信機が顕著な温度日変化のある環境に設置されていたためと考えられる。その他、図には示さないが、海洋潮汐モデルの違いはそれほど顕著には見られない。

#### 5. まとめ

GNSS 時間・周波数比較における最適な解析戦略の確立

を目的として、NICT が運用する各地の観測局のデータを用いた解析を行った。予備的な解析では、軌道情報による顕著な差が見られる一方で、大気遅延除去モデルや海洋潮汐モデルによる違いは極めて小さい。

**謝辞** 本研究では、国土地理院 GEONET から得られた GPS データを解析に用いた。記して感謝の意とする。

#### 参考文献

- [1] Lahaye F., G. Cerretto, P. Tavella, GNSS geodetic techniques for time and frequency transfer applications, *Advances in Space Research*, 47, 253-264, doi:10.1016/j.asr.2010.05.032, 2011.
- [2] Fujieda M., Kumagai M., and Nagano S., Coherent Microwave Transfer Over a 204-km Telecom Fiber Link by a Cascaded System, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol.57, no. 1, 168-174, doi:10.1109/TUFFC.2010.1394, 2010.
- [3] Hobiger, T., T. Gotoh, T. Otsubo, T. Kubooka, M. Sekido, H. Takiguchi, and H. Takeuchi, c5++ - Multi-technique Analysis Software for Next Generation Geodetic Instruments, *IVS 2010 General Meeting Proceedings - VLBI2010: From Vision to Reality*, no. NASA/CP-2010-215864, pp. 212-216, 2010.
- [4] Dow, John M., R. E. Neilan, and C. Rizos, The International GNSS Service in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems, *J. Geod.*,83:191-198, DOI 10.1007/s00190-008-0300-3, 2009.
- [5] <http://igs.cb.jpl.nasa.gov>
- [6] Griffiths, J., Status of IGS Core Products, 2013 AGU Fall Meeting, Poster #G13B-0933, 2013.
- [7] Letellier, T., Etude des ondes de marée sur les plateaux continentaux. Thèse doctorale, Université de Toulouse III, Ecole Doctorale des Sciences de l'Univers, de l'Environnement et de l'Espace, 237pp, 2004.
- [8] Fok, H.S., C.K. Shum, Y. Yi, H.B. Iz, K. Matsumoto, Improved coastal ocean tide modeling using satellite altimetry, 20 years of Progress in Radar Altimetry, Venice, Italy, 24-29 September 2012.
- [9] Matsumoto, K., Takanezawa, T. and Ooe, M., Ocean Tide Models Developed by Assimilating TOPEX/POSEIDON Altimeter Data into Hydrodynamical Model: A Global Model and a Regional Model Around Japan. *J. of Oceanog.*, 56, 567-581, 2000.
- [10] Hobiger, T., R. Ichikawa, Y. Koyama and T. Kondo, Fast and accurate ray-tracing algorithms for real-time space geodetic applications using numerical weather models, *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2008JD010503, 2008.
- [11] Boehm, J., A. Niell, P. Tregoning, and H. Schuh, Global Mapping Function (GMF): A new empirical mapping function based on numerical weather model data, *Geophys. Res. Lett.*, 33, No.7, DOI: 10.1029/2005GL025546, 2006.
- [12] Chen, G. and T. A. Herring, Effects of atmospheric azimuthal asymmetry on the analysis of space geodetic data, *J. Geophys. Res.*, 102, 20489-20502, 1997.
- [13] Boehm, J. and H. Schuh, Vienna Mapping Functions in VLBI analyses, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L01603, doi:10.1029/2003GL018984, 2004.

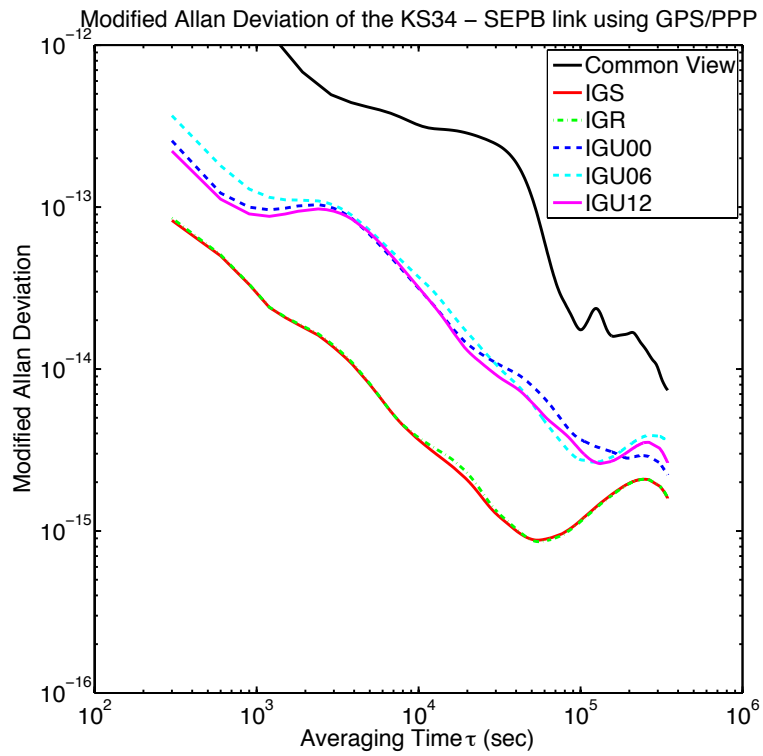


Figure 3 Modified Allan Deviation of the time link between Kashima(KS34) and Koganei(SEPB) based on each orbit and SV clock solution. Data period: Oct. 1st - 14th , 2013

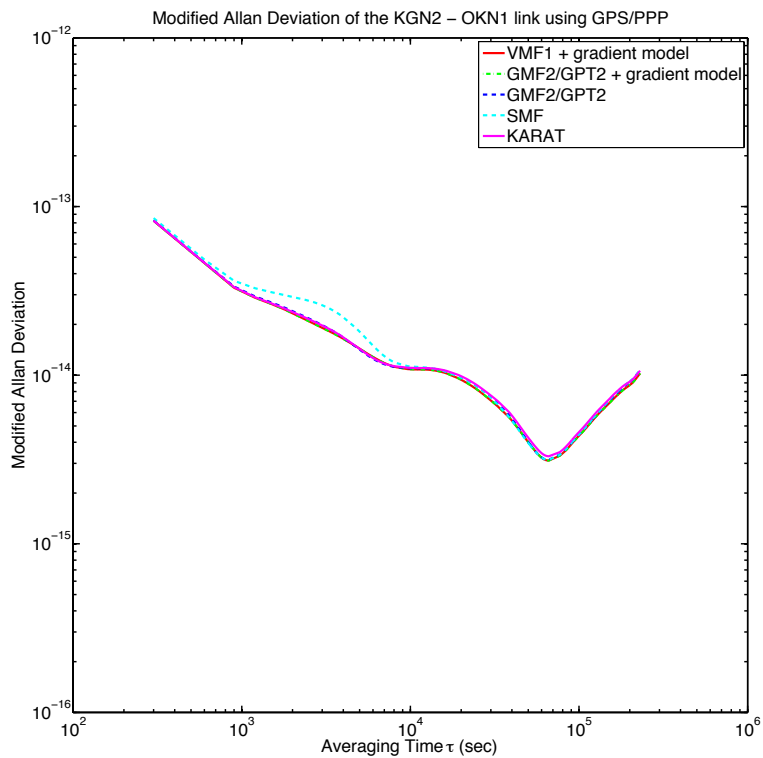


Figure 4 Modified Allan Deviation of the time link between Koganei(KGN2) and Okinawa(OKN1) applied by the modern mapping functions and ray tracing tool. Data period: two weeks Sep. 5th - 12th , 2013