

4 時空標準計測技術

4 Measurements of Space-Time Standards

4-1 定常衛星双方向時刻比較

4-1 The Regular Operation of Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer

前野英生 藤枝美穂 相田政則 李 廷魚 田淵 良 雨谷 純
 MAENO Hideo, FUJIEDA Miho, AIDA Masanori, LI Tingyu, TABUCHI Ryo, and
 AMAGAI Jun

要旨

衛星双方向時刻比較法は通信用静止衛星を使った高精度な時刻比較方式である。情報通信研究機構 (NICT) はアジアの中核となる衛星双方向時刻比較ネットワークを構築し、国際原子時 (TAI) に寄与し、日本標準時 (JST) を安定に維持するため定期的な時刻比較を行ってきた。本稿では国際的な衛星双方向時刻比較ネットワークとそれに必要な校正について紹介する。

Two Way Satellite Time and Frequency Transfer (TWSTFT) is a very precise time transfer method using communication stationary satellite. National Institute of Information and Communications Technology (NICT) constructed TWSTFT network as the core in the Pacific Rim Region, and conducts the regular operation of TWSTFT to keep Japan Standard Time (JST) stable and contributes to International Atomic Time (TAI) construction. In this paper, we introduce the international TWSTFT network and the required calibration for it.

[キーワード]

衛星通信, 衛星双方向時刻比較, GPS, 国際原子時, 協定世界時
 Satellite communication, Two-way satellite time and frequency transfer, GPS,
 International Atomic Time, Coordinated Universal Time

1 はじめに

世界の標準機関は時間・周波数を原子時計により発生している。国際度量衡局 (BIPM: Bureau International des Poids et Mesures) は国際原子時 (TAI: International Atomic Time) や協定世界時 (UTC: Coordinated Universal Time) 構築のため、図 1 に示す様な世界各国 50 ヶ以上の標準機関の約 300 台の原子時計との比較情報を収集している。このためには、世界各国の原子時計間の時刻比較を行う必要がある。国際比較等の遠隔地との比較方法には、可搬型標準器を運搬して

比較する運搬時計法、標準電波などによる通報を主眼とする One way 法、GPS を用いた複数の地点で共通の信号を受信し、共通信号を仲介として沿革地点に置かれた時計間の比較を行う Common-view 法、2 地点から同時に時刻・周波数比較の相手方に対して信号を送信して比較を行う Two way 法がある [1][2]。現在では、図 2 に示す最も比較精度の良い GPS Carrier phase 法 [3]、通信用静止衛星を用いた衛星双方向時刻比較法 (TWSTFT: Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer) が採用されている。ここでは、日本標準時 (JST: Japan Standard Time) を

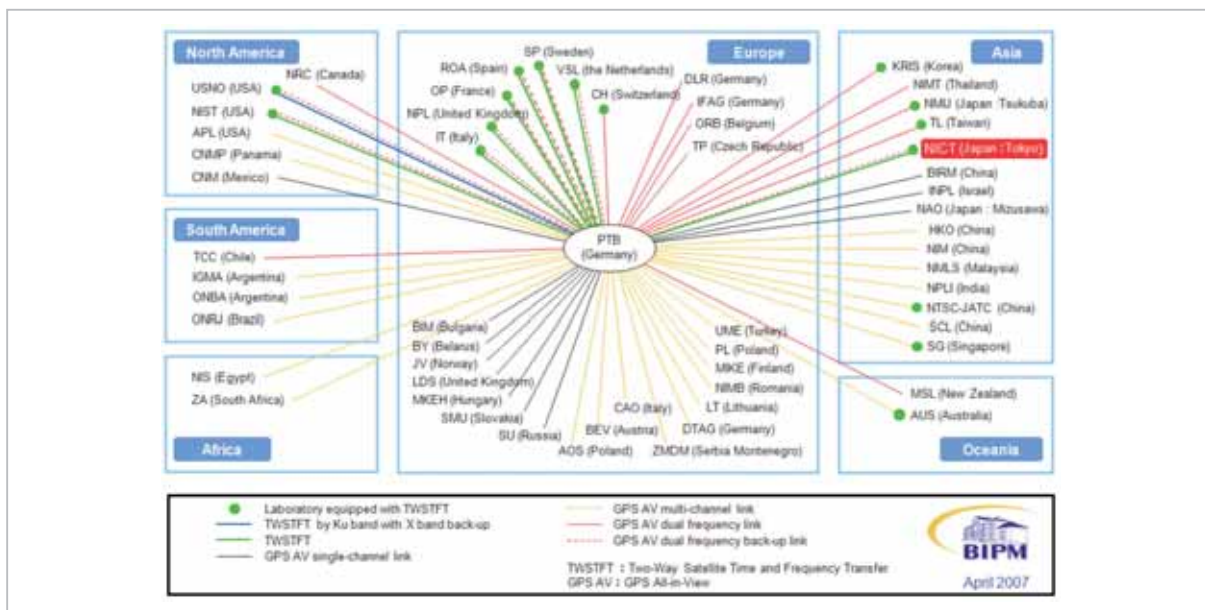


図1 国際時刻比較ネットワーク

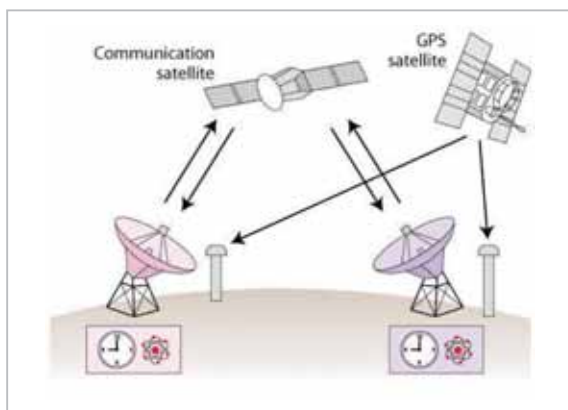


図2 衛星双方向時刻比較法とGPSによる時刻比較方法の概略図

ここでは概要、原理、経緯、運用について述べる。

2.1 概要

装置系は、図3のブロックダイアグラムに示すように、時刻情報を変復調する専用モデム、モデムの信号を静止衛星の周波数帯に変換するアップ・ダウンコンバータ、送信出力を増幅するハイパワーアンプ(SSPA)、受信信号を増幅するローノイズアンプ(LNA)、制御データ収集計算機(図4)、パラボラアンテナ(図5)から構成される。電離層や大気の影響を極力減らすため、Kuバンド帯を使った通信用静止衛星を使用することが多い。

2.2 原理

衛星双方向時刻比較は同一の静止衛星が見える範囲内であれば時刻比較が可能である。図6に原理、図7に誤差要因を示す。地球局A、地球局Bは、同時に静止衛星に向け時刻情報 t^A および t^B を同時刻に同一周波数で情報交換できる変調方式(PRN)で発射する。そのため、A局からB局までの伝搬時間とB局からA局までの伝搬時間は同一であるため伝搬に要する時間は消去され、 t^A および t^B の差分を容易に求めることができる。

図6に示すように衛星双方向時刻比較の原理は

安定に運用するためにGPSを用いた時刻比較と共に定常的な運用を行っている衛星双方向時刻比較について、2004年頃から構築した時刻比較ネットワークと絶対値校正について述べる。

2 衛星双方向時刻比較

衛星双方向時刻比較は、受信機とアンテナのみで構成されるGPSによる時刻比較装置に比べ装置系が複雑になっているが、長期安定度が良く高精度でリアルタイムにデータが得られる[4]。しかし高コストのため、主に先進国が利用をしている。

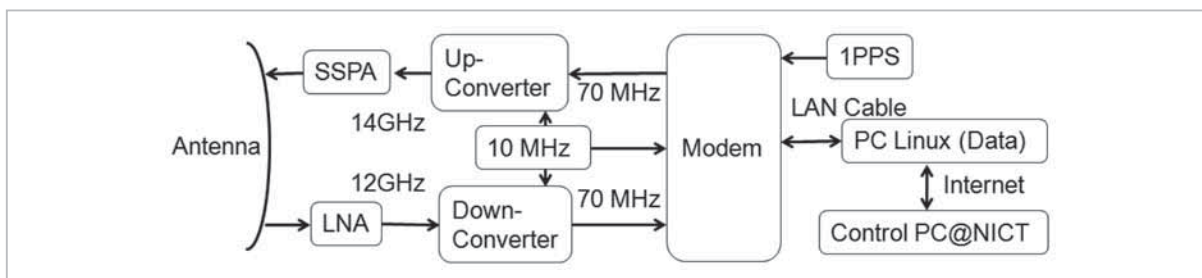


図3 ブロックダイアグラム



図4 装置系

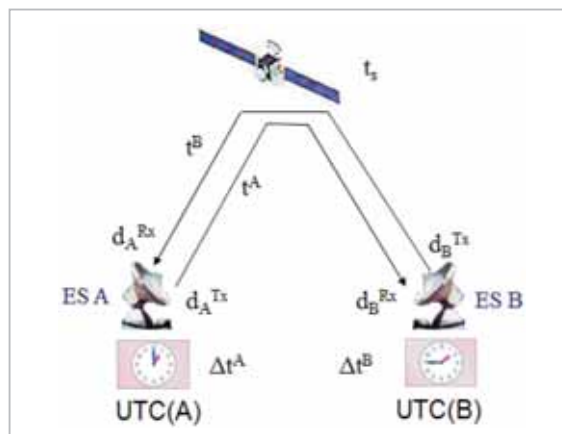


図6 衛星双方向時刻比較の原理



図5 パラボラアンテナ

地球局 A と B の時刻差 $\Delta t^A - \Delta t^B$ として式 (1) に示すことができる。

$$\Delta t^A - \Delta t^B \doteq \frac{1}{2}[(t^A + t^B) + (d_A^{Tx} - d_A^{Rx}) - (d_B^{Tx} - d_B^{Rx}) + t_s] \quad (1)$$

t_s : サニヤック効果による遅延時間

d^{Tx} : A 局 B 局における地球局内のアップリンクの遅延時間 (アップコンバータ、ハイパワーアンプ、ケーブル等)

d^{Rx} : A 局 B 局における地球局内のダウンリンクの遅延時間 (ローノイズアンプ、ダウンコンバータ、ケーブル等)

Δt : A 局 B 局における時刻差

t : A 局 B 局における受信時間

地球局 A、B が同時に送信した Ku バンドの電波を両局が互いに同時刻で受信する。すなわち、同じ経路を通過することになり電離層や大気の影響をほぼ相殺できるため、極めて精度の高い時刻比較を実現することが可能となる。ただし、静止衛星の姿勢や電離層と大気の影響を入れても原理的には誤差約 100 ps とされている [4]。実際には装置系のノイズや温度などの影響で、誤差は数百 ps になる。尚、計算時には地球回転に起因するサニヤック効果を考慮しなくてはならない [1][2]。

2.3 経緯

NICT は、アジアの衛星双方向時刻比較ネットワークの中核的機関として、アジア太平洋地域お

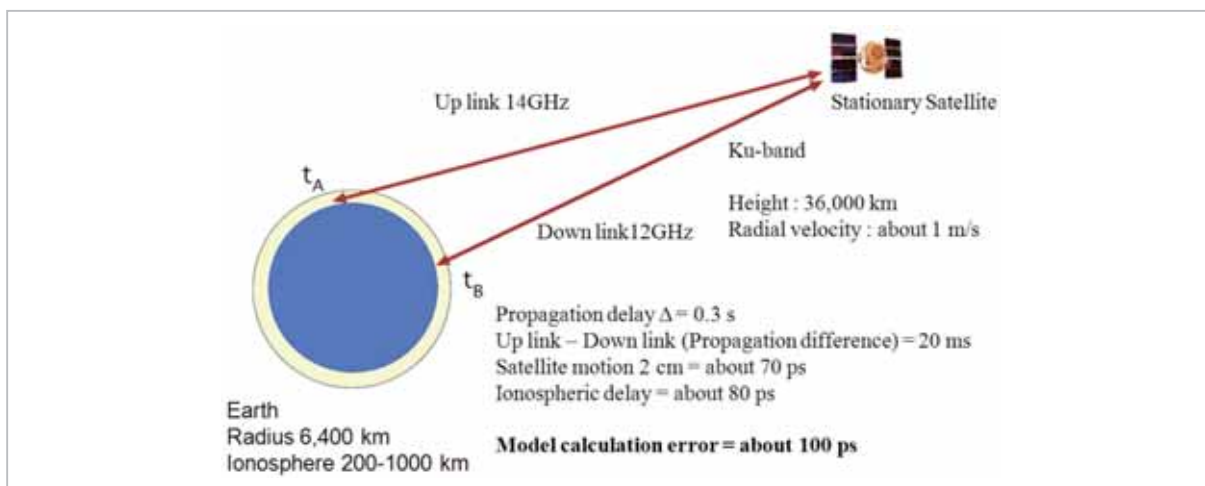


図7 衛星双方向時刻比較の誤差要因



図8 NICT-PTB 間の時刻比較データ

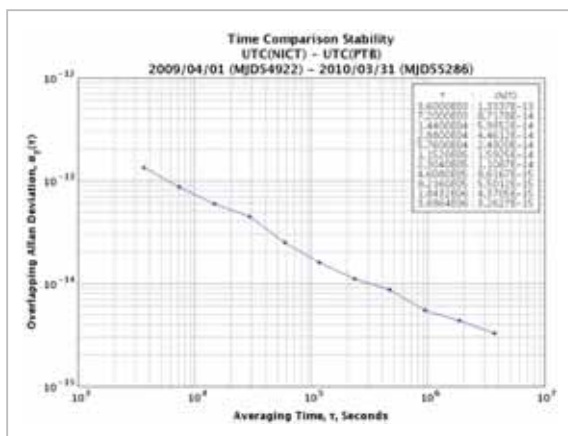


図9 NICT-PTB 間の時刻比較精度

およびアジア・ヨーロッパの標準機関と協力してネットワークを構築してきた。また、準天頂衛星

の時刻比較モニタを目的としてアジア・米国(NICT-Hawaii-USNO)ネットワークを構築した。これらは順調に構築され安定した計測を行っている。実際にNICTとドイツ物理学会研究所(PTB)間で測定された時刻比較結果を図8、比較精度を図9に示す。時刻差の絶対値は、モデムからアンテナまでのそれぞれの装置系の遅延量を相殺しないと求めることができないため4ではその校正方法について述べる。

2.4 運用

衛星双方向時刻比較は、2004年までアトランティスモデムを使った手動運用であったため、1週間に1~2度の割合で時刻比較を実施していた。その後、2005年からはNICTが開発したモデム[5][6]の試験およびアジアの標準機関への配備が行われ、アジア・太平洋地域のネットワークが確立した。NICTモデムはマルチチャンネルで同時刻に最大8局(通常1チャンネルは校正に使用している)まで時刻比較ができ、かつ、自動運用することにより安定した計測が可能となった。2009年頃からはドイツ製のSATREモデムをアジア・ヨーロッパネットワークで利用するようになった。SATREモデムの受信チャンネルは最大3チャンネルである。自動運用は、いずれのモデムにおいてもコンピュータに計測間隔を設定することが可能である。当初NICTモデムの運用は連続運用を行っていたが、装置の校正データの毎回取得や運用の利便性から、現在は1時間に1回5分間の運

用としている。データは毎日 ITU-R フォーマットに変換され NICT の WEB サイトにアップロードされ、かつ、BIPM に報告している。

3 衛星双方向時刻比較ネットワーク

NICT は、GPS Common View 方式が全盛であった 2009 年 10 月まで、アジア・太平洋地域の衛星双方向時刻比較ネットワークの中核となる目的で整備してきた。一方で、直接 PTB と時刻比較できるアジア・ヨーロッパリンクが重要とされたため、当初は NICT と PTB 間のみで時刻比較を実験的に開始した。その後、順次アジア主要国の標準機関が参加し、アジア・ヨーロッパネットワークが確立した(図 10)。2009 年 10 月以降、PTB と離れて直接時刻比較できないオーストラリアなどが GPS Carrier phase で直接時刻比較を行うことになったが、衛星双方向時刻比較は GPS Carrier phase より長期安定度が良いとされているため主要国では今でも GPS Carrier phase と併用している[4]。今後も両方式の長所を採用し観測を継続することとなる。ここでは 3 地域の衛星双方向時刻比較ネットワークについて述べる。

3.1 アジア・太平洋地域ネットワーク

2005 年以降のアジア・太平洋地域の参加機関

は、表 1 に示すとおり、オーストラリア NMIA、中国 NTSC、台湾 TL、韓国 KRIS、シンガポール A*STAR (旧 SPRING)、産業技術総合研究所 NMIJ、NICT である。静止衛星はインテルサット IS-8 衛星 (旧パンナムサット PAS-8) とジェイサット JCSAT-1B 衛星を使用している[7]。国内においては、おおたかどや山標準電波送信所およびはがね山標準電波送信所と NICT 本部間においても時刻比較を行っている。衛星双方向時刻比較装置は、安定に動作し連続した国際間の比較結果を BIPM に報告している。

3.2 アジア・ヨーロッパネットワーク

最初のアジア・ヨーロッパ間の時刻比較は、台湾 TL とオランダ VSL の間で 2002 年から 2003 年

表 1 アジア・太平洋地域の参加機関

Period	Satellite	Institute
Feb. 2005–Mar. 2006	PAS-8, JCSAT-1B	NMIA, NTSC, TL, KRIS, NMIJ, NICT, SPRING
Apr. 2006–Jun. 2007	PAS-8, JCSAT-1B	NMIA, NTSC, TL, KRIS, NMIJ, NICT, SPRING
Jul. 2007–Mar. 2008	JCSAT-1B	NTSC, TL, KRIS, NMIJ, NICT, SPRING
Apr. 2008–Mar. 2009	JCSAT-1B	NTSC, TL, KRIS, NMIJ, NICT, A*STAR (SPRING)
Apr. 2009–	IS-8 (PAS-8)	NTSC, TL, KRIS, NMIJ, NICT

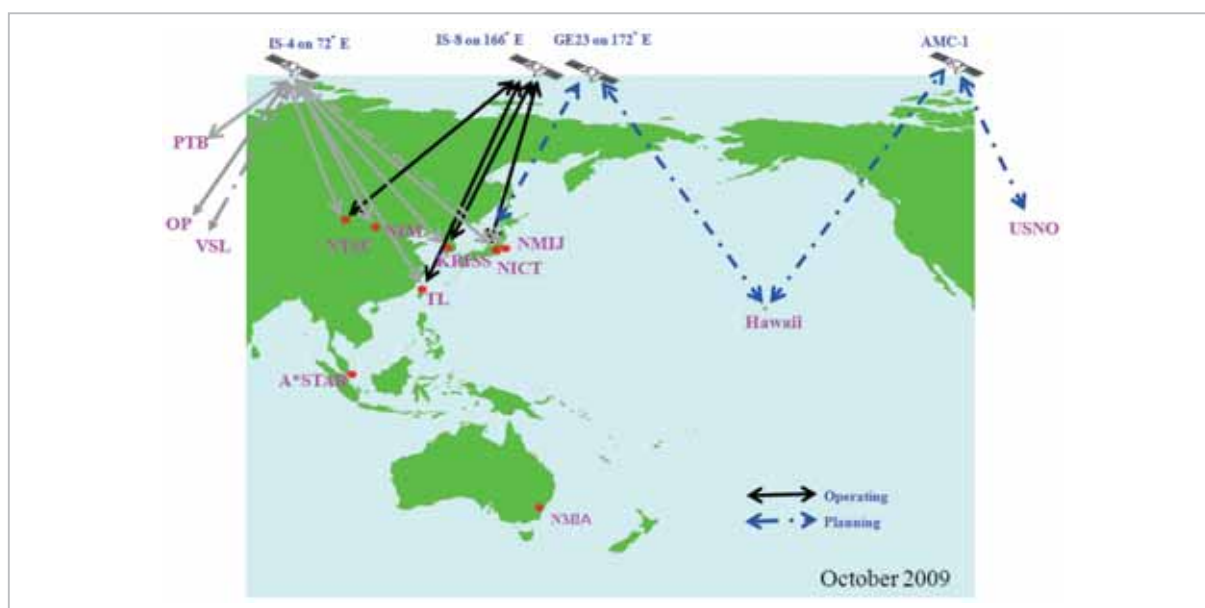


図 10 アジア太平洋地域、アジア・ヨーロッパ、アジア・米国ネットワーク

にかけてPAS-4衛星を使って実験的に行われた[8]。後にNICTは、TAIに貢献するため定常的なネットワークを構築することとなった。アジア・ヨーロッパの衛星双方向時刻比較に関しては2004年までにドイツPTBと協力し地上設備の整備を行い、観測を開始した[4][9][10]。静止衛星はパンナムサットPAS-4(現インテルサットIS-4)を用いた。当初はNICTとPTBで観測を開始し順次表2の機関が参加をしている。参加機関は、NICT、ドイツPTB、韓国KRISS、産業技術総合研究所NMIJ、台湾TL、中国NTSC、中国NIM、フランスOPであった。モデムについてはNICTモデムと2009年頃からヨーロッパで主に使われているSATREモデムの性能が同じであると証明[11]されてから、本ネットワークではSATREモデムのみで運用をしている。IS-4衛星は2010年1月末に早期寿命となったため、Intersputnik社Express AM2(東経80度)衛星に変更する。尚、このネットワークは長基線になるため、大気の影響などの研究がなされている[12]。

3.3 アジア・米国ネットワーク

アジア・米国間の衛星双方向時刻比較は、GE23衛星およびAMC-1衛星を利用して2010年7月からハワイ諸島カウアイ島のKPGO(Kokee park geophysical observatory)中継局を介してNICTとUSNO間で時刻比較を開始した。このリンクは準天頂衛星計画のモニタ局であるが、今後、定常時刻比較の東回り回線(NICT-KPGO-USNO-PTB)として利用も可能である。

4 校正

衛星双方向時刻比較装置の遅延量を求める校正

表2 アジア・ヨーロッパの参加機関(IS-4衛星)

Period	Modem	Institute
Apr. 2005-Mar. 2006	NICT	NICT, PTB, KRISS
Apr. 2006-Mar. 2007	NICT	NICT, PTB, KRISS
Apr. 2007-Mar. 2008	NICT, SATRE	NICT, PTB, KRISS, NMIJ, TL
Apr. 2008-Mar. 2009	NICT, SATRE	NICT, PTB, KRISS, NMIJ, TL, NTSC, NIM, OP
Apr. 2009-Jan. 2010	SATRE	NICT, PTB, KRISS, TL, NTSC, NIM, OP

は、GPSデータを用いて衛星双方向の遅延量を求める方法もあるが、ここでは衛星双方向のみで校正をする可搬局を用いた校正の概要、原理、実施履歴について述べる。

4.1 概要

校正には、可搬型のアンテナおよび装置系を必要とする(図10)。アンテナは1.2mで組み立てが容易な構造となっており、装置系は小型のコンテナに納められ、装置系とアンテナ系の高周波信号はE/O、O/E変換器を通し100mの光ファイバーケーブルで接続している。ヨーロッパなどでは可搬局を車で移動させ絶対値校正をすることが容易で定期的の実施している[13]。一方、アジア地域で各国間の絶対値校正を行うには可搬局を航空機で運搬して実施する必要がある、通関や運送に時間がかかる難点がある。しかし、NICTは積極的に絶対値校正を実施してきた。

4.2 原理

地球局(ES)Aおよび地球局Bのモデムからアンテナまで遅延量は計測が難しくA-B間の時刻比較の遅延量は可搬局(PS)を用いてES Aで同時に計測し、ES BにPSを移動して同時に計測を行

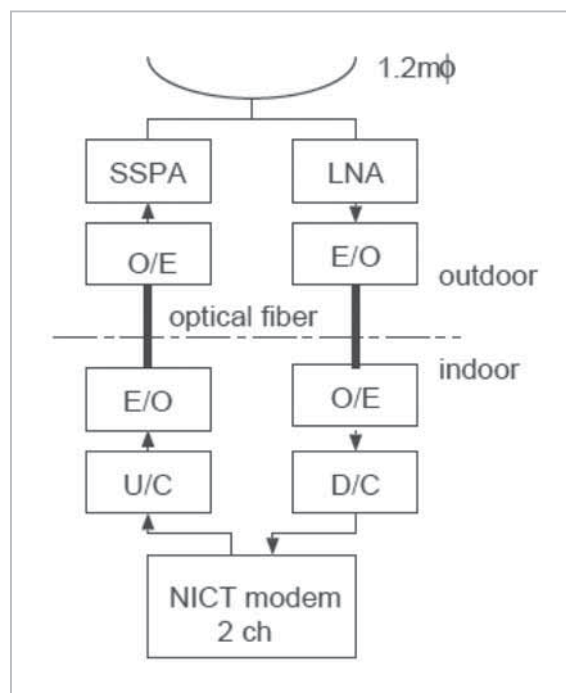


図11 可搬局アンテナおよび装置系

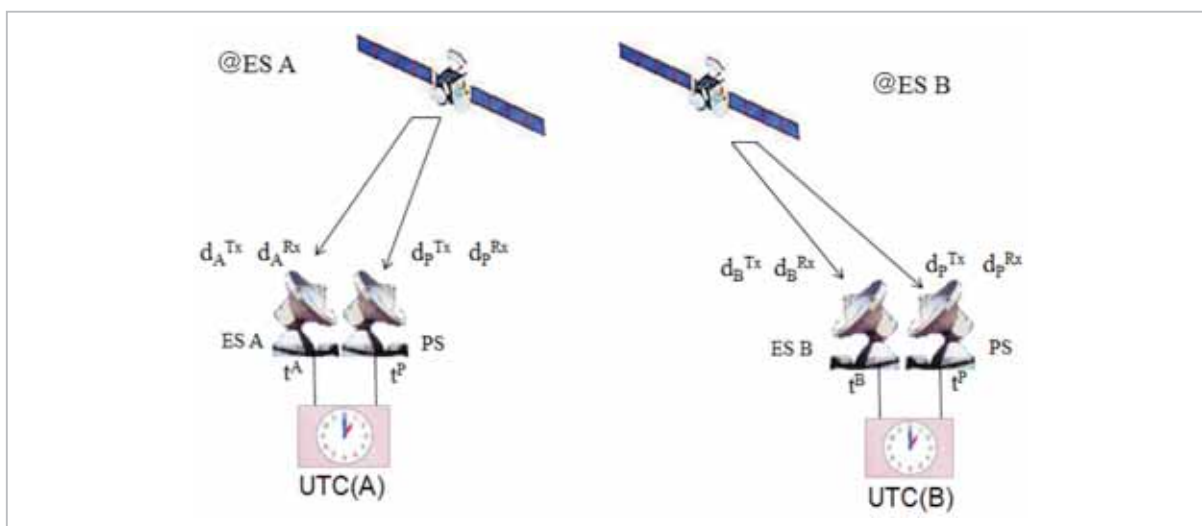


図 12 可搬局を用いた校正方法

う。ES A と ES B、PS の遅延差を求めることにより校正が可能となる。遅延差は次のように求めることができる。

ES A と PS の時刻比較は式(2)、ES B と PS の時刻比較は式(3)で示される。

$$(d_A^{Tx} - d_A^{Rx}) - (d_P^{Tx} - d_P^{Rx})_A = -(t^A - t^P) \quad (2)$$

$$(d_B^{Tx} - d_B^{Rx}) - (d_P^{Tx} - d_P^{Rx})_B = -(t^B - t^P) \quad (3)$$

d^{Tx} : A 局 B 局 P 局における地球局内のアップリンクの遅延時間(アップコンバータ、ハイパワーアンプ、ケーブル等)

d^{Rx} : A 局 B 局 P 局における地球局内のダウンリンクの遅延時間(ローノイズアンプ、ダウンコンバータ、ケーブル等)

t : A 局 B 局 P 局における受信時間

遅延差は(2)-(3)となる。

よって、

$$(d_A^{Tx} - d_A^{Rx}) - (d_B^{Tx} - d_B^{Rx}) = -(t^A - t^P) + (t^B - t^P) \quad (4)$$

となる。

ただし、

$$(d_P^{Tx} - d_P^{Rx})_A = (d_P^{Tx} - d_P^{Rx})_B \quad (5)$$

4.3 実施履歴

NICT は 2005 年から国内およびアジア近隣諸国との間で校正実験を行ってきた。最初の校正実験は国土地理院の鹿児島県始良にある VLBI 局と NICT 本部間で実施し、校正結果は GPS データと比較され校正値は一致した。初の海外校正実験となった台湾での観測は航空機による可搬局の移動となったが、順調に校正データが取得できた。測定後、台湾 TL、韓国 KRISS、産業技術総合研究所 NMIJ の校正データは BIPM に報告 [14]-[16] され、ITU-R データに掲載する校正値とすると共に、キャリブレーションアイディ (CAL ID) を取得し同様に掲載された。全体の校正としては GPS との比較結果から 1~2 nsec 以下で一致する校正値が求められており TAI に貢献できる値となった。今後はアジア・米国間、アジア・ヨーロッパ間の校正を実施したい。

5 まとめ

本稿では、近年展開してきた衛星双方向時刻比較ネットワークを紹介した。NICT がアジアの中核の標準機関としてリーダーシップをとり、広域なアジア太平洋地域、アジア・ヨーロッパ、アジ

ア・米国とのネットワークを構築し安定的かつ継続的に高精度な時刻比較が行われた。しかし、TAIで重要なアジア・ヨーロッパ間の衛星として使用してきたインテルサット IS-4 衛星は突然 2010 年 1 月末を持って運用を停止した。現在、NICT ではロシア Intersputnik 社 Express AM2 衛星を使ったネットワークを構築中である。しかし、今後は復信号方式 (DPRN) 衛星双方向時刻比較^[17]による高精度でかつ狭帯域の方式も開発されており、衛星のトランスポンダの空き周波数の利用が容易になればより継続的な運用が可能になるであろう。また、光ファイバ^[18]または VLBI による時刻比較方式^[19]が定常時刻比較として採用され

ば、より高精度、高安定で継続性のある時刻比較が可能となろう。

謝辞

NICT 製のマルチチャンネルモデム開発にご尽力頂いた現、産業技術総合研究所計量標準総合センターの今江理人氏、前任者の現、産業技術総合研究所計量標準総合センターの鈴木智也氏、本定常業務に携わり尽力して頂いた特別研究員の清水義幸氏、海外との連絡や観測に従事して頂いた Lam Quoc Tung 氏に感謝いたします。

参考文献

- 1 今江理人, "時間・周波数比較法の基礎," 通信総合研究所季報, Vol. 49, Nos. 1/2, pp. 103–109, 2003.
- 2 今江理人, 鈴木智也, 後藤忠広, 澁谷晴久, 中川史丸, 清水義行, 栗原則幸, "衛星双方向方式," 通信総合研究所季報, Vol. 49, Nos. 1/2, pp. 121–128, 2003.
- 3 Thomas Hobiger, 小山泰弘, 関戸衛, 近藤哲朗, "e-VLBI による UT1 の実時間決定," 情報通信研究機構季報, 本特集号, 4-5, 2010.
- 4 Z. Jiang and G. Petit, "BIPM first analysis of NICT-PTB TW link and comparison with GPS CV-AV P3 links," BIPM report TM 144, Jan. 2006.
- 5 M. Imae, T. Gotoh, T. Suzuyama, H. Shibuya, F. Nakagawa, and Y. Shimizu, "Time Transfer Modem for TWSTF Developed by CRL," Proc. of Asia-Pacific Workshop on Time and Frequency 2002 (ATF2002), 2002.
- 6 M. Fujieda, M. Aida, H. Maeno, L. Q. Tung, and J. Amagai, "Delay Difference Calibration of TWSTFT Earth Station Using Multichannel Modem," IEEE Trans. Inst. Meas., Vol. 56, No. 2, pp. 346–350, 2007.
- 7 H. Maeno, M. Fujieda, M. Aida, Y. Shimizu, Q. T. Lam, R. Tabuchi, and M. Hosokawa, "TWSTFT Network Status and Plans in the Pacific-Rim Region," Proc. of Asia-Pacific Workshop on Time and Frequency 2006 (ATF2006), 2006.
- 8 H. T. Lin, W. H. Tseng, S. Y. Lin, H. M. Peng, and C. S. Liao, "The First Two-Way Time Transfer Link Between Asia and Europe," 35th Annual Precise and Time Interval (PTTI) Meeting, pp. 71–79, 2003.
- 9 H. Maeno, M. Fujieda, D. Piester, A. Bauch, M. Aida, Q. T. Lam, T. Gotoh, and Y. Takahashi, "Establishment of a TWSTFT link between Asia and Europe connecting NICT and PTB," Proc. of the 20th EFTF2006, 2006.
- 10 M. Fujieda, T. Gotoh, M. Aida, J. Amagai, H. Maeno, D. Piester, A. Bauch, and S. H. Yang, "Long-Baseline TWSTFT between Asia and Europe," 38th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting, pp. 499–504, 2006.
- 11 M. Fujieda, R. Tabuchi, M. Aida, S. Hama, J. Amagai, H. Maeno, T. Gotoh, M. Hosokawa, and K. Imamura, "Performance evaluation of NICT modem—comparison with SATRE modem—," 15th CCTF TWSTFT working group, Sep. 2007.

- 12 D. Piester, A. Bauch, M. Fujieda, T. Gotoh, M. Aida, H. Maeno, H. Hosokawa, and S. H. Yang, "Studies on Instabilities in Long-baseline Two-way Satellite Time and Frequency Transfer (TWSTFT) Including a Troposphere Delay Model," 39th Annual Precise and Time Interval (PTTI) Meeting, pp. 211–222, 2007.
- 13 D. Piester, R. Hlavac, J. Achkar, G. de Jong, B. Blanzano, H. Ressler, J. Becker, P. Merck, and O. Koudelka, "Calibration of Four European TWSTFT Earth Station with a Portable Station Through INTELSAT 903," Proc. of the 19th EFTF2005, 2005.
- 14 M. Fujieda, M. Aida, H. Maeno, Q. T. Lam, and R. Tabuchi, "Calibration of Two-way time transfer between NICT and TL," Document of reported to BIPM, Mar. 2006.
- 15 M. Fujieda, M. Aida, H. Maeno, Q. T. Lam, and R. Tabuchi, "Calibration of Two-way time transfer between NICT and KRISS," Document of reported to BIPM, Nov. 2006.
- 16 M. Fujieda, M. Aida, H. Maeno, Q. T. Lam, and R. Tabuchi, "Calibration of Two-way time transfer between NICT and NMIJ," Document of reported to BIPM, Feb. 2007.
- 17 雨谷純, 後藤忠広, "複擬似雑音方式衛星双方向時刻比較装置の開発," 情報通信研究機構季報, 本特集号, 4-2, 2010.
- 18 藤枝美穂, 熊谷基弘, 長野重夫, 井戸哲也, "光ファイバ周波数伝送," 情報通信研究機構季報, 本特集号, 4-3, 2010.
- 19 瀧口博士, 小山泰弘, 市川隆一, 後藤忠広, 石井敦利, Thomas Hobiger, "VLBI および GPS による時刻比較," 情報通信研究機構季報, 本特集号, 4-7, 2010.



まえの ひでお
前野英生

新世代ネットワーク研究センター
光・時空標準グループ主任研究員
博士 (工学)
時刻比較



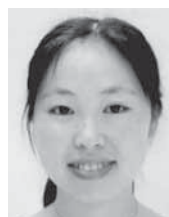
ふじえだ みほ
藤枝美穂

新世代ネットワーク研究センター
光・時空標準グループ主任研究員
博士 (理学)
精密時刻比較、光ファイバ周波数伝送



あいだ まさのり
相田政則

新世代ネットワーク研究センター
光・時空標準グループ主任研究員
周波数時刻標準



李 廷魚 (Tingyu Li)

新世代ネットワーク研究センター
光・時空標準グループ技術員

たぶち じゅん
田渕 良

新世代ネットワーク研究センター
光・時空標準グループ技術員



あまが い じゅん
雨谷 純

新世代ネットワーク研究センター
光・時空標準グループ研究マネージャー
時刻周波数比較、電波干渉計