

資料

4. VLBI と時刻同期

今江 理人*

* (昭和54年9月21日受理)

VLBI AND CLOCK SYNCHRONIZATION

By

Michito IMAE

For VLBI (Very Long Baseline Interferometry) experiments, precise synchronization between local oscillators used at both sites is necessary.

So this paper presents a review of several clock synchronization techniques. Main part of it is about clock synchronization by artificial satellites, including the RRL's present condition.

And a principle of time comparison by VLBI is also described.

1. ま え が き

VLBI 実験では、両局のローカル発振器が高安定であるとともに、理想的には、この両者が完全に同期していることが望ましい。

一方、VLBI での観測量である相対遅延時間 τ は、幾何学的遅延時間 τ_0 、電離層・大気圏など伝搬路における伝搬遅延誤差 τ_p 、両局における局内遅延時間差 τ_i 及び時刻同期誤差 τ_e の和として与えられる。そこで、 τ_i 及び τ_p について十分高精度に推定できれば、複数個の電波星について VLBI 観測を行うことによって τ_e を推定パラメータとして求めることが可能である。

しかし、 τ_e が他の方法で正確に決定できれば、他の未知パラメータ推定の初期値として用いることができる。

本報告では、従来行われている時刻同期法についてその精度・問題点など、現在当所で実施あるいは計画中の、衛星を用いた時刻同期法などについて概説する。

2. 時刻同期法の種類と精度

時刻同期法として従来より用いられているものには、直接的な方法として移動時計によるものと、間接的方法として、短波・長波標準電波、オメガ・ロランCなど航

行用電波、テレビ信号⁽¹⁾など2地点で同一の電波を受信し両局の時刻比較を行うものがあり、最近では、各種の人工衛星を利用した時刻比較が行われている。

また、このほかの方法として、月レーダによるもの⁽²⁾、VLBI によるものなどが挙げられる。

以上のように、時刻同期法として種々の方法があり、2地点間の距離や必要とする精度により適当な方法を選択する必要がある。

第1表に上述の時刻同期法の主なものにつき、その同期精度や、適用可能な2地点間の距離などを示す。

3. 衛星による時刻同期

人工衛星利用の時刻同期法には、用いる衛星が静止衛星か、移動衛星かという点、信号の伝送が一方 (one way) か、双方向 (two way) か、などにより種々の方法に分けられるが、主なものとしては次の3種類の方式が考えられる⁽³⁾。

- (1) 時計搭載移動衛星 one way 方式
- (2) 静止衛星 one way 方式
- (3) 静止衛星 two way 方式

以下では、この3種の方式について、主に現在当所で実施中あるいは計画中の衛星利用の時刻同期法を中心に紹介する。

3.1 時計搭載移動衛星 one way 方式

* 周波数標準部 周波数標準値研究室

第1表 時刻同期法とその精度

時刻同期法	2点間の距離	比較精度	備考
移動時計法	任意	20~100 ns	直接的, 比較上時間がかかる。ns orderの比較では, 相対論効果の補正必要。
短波標準電波 F層伝搬 E層伝搬	~1000 km ~1000 km	~ 1 ms ~100 μs	
長波標準電波	~1000 km	1 μs	位相比較
オメガ	任意	~1 μs	位相比較
Loran-C	1000~2000 km	100 ns	位相比較
TV信号 垂直同期信号 カラーサブキャリア	100~200 km "	~100 ns ~ 10 ns	簡便で比較的高精度, 受信機の改良により, より高精度化可能。位相比較(カラーサブキャリア)
移動衛星 one-way NNSS NTS	任意	10~ 20 μs 10~700 ns	将来 10 ns 以下
静止衛星 one-way ATS-3, GOES	広範囲	1~10 μs	
静止衛星 two-way		2~10 ns	高精度 将来 10~50 ps
VLBI		10~50 ns	高精度。測定, データ処理時間が長い。

これは航行用衛星である NNSS (Navy Navigation Satellite System) 系衛星^{(4), (5)}や, NTS (Navigation Technology Satellite)^{(6), (7), (8)}など時計(周波数標準器)を搭載した移動衛星を用いるもので, 第1図に NTS による時刻比較の原理を示す。

これらの衛星は, 移動衛星であり, real time での時刻比較はできないが, 地球上の任意の地点との比較が可能である。

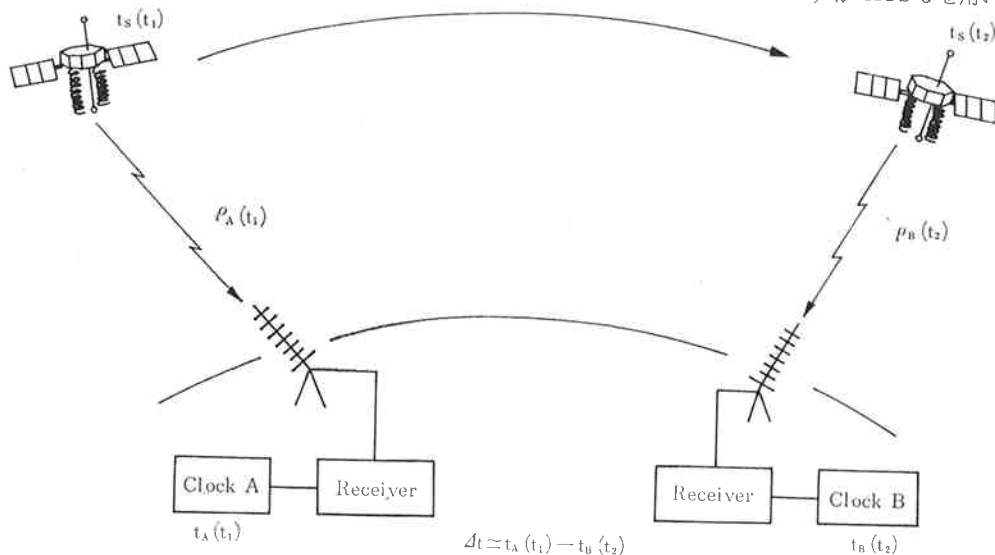
現在, 周波数標準器では, NTS-1 を用いて USNO (米海軍天文台) との間の時刻比較実験を実施中であり, 第2図にその比較結果を示す。また, 第3図(a)は, 同じく NTS-1 仲介による電波研と計量研(板橋区)間の時刻比較結果を, また, 同図(b)は, 比較のため同期間における TV 波仲介による結果を表している。

今後, 搭載用周波数標準器の高安定化(1981~1982年打上げの NTS-3 には, 水素メーザ標準器が搭載される予定), レーザ測距などによる軌道推定の高精度化などにより, 全世界的に, 10 ns 程度の精度での時刻比較が期待される。

3.2 静止衛星 one-way 方式

この方式は, 第4図のように, 広範囲の地域に衛星中継で標準を供給するという目的で行われるもので, 現在の短波・長波標準電波の代わりに務めるものと思われるものである。

このような例としては, 1971年ごろから NBS (National Bureau of Standards) が ATS-3 を用い, 短波



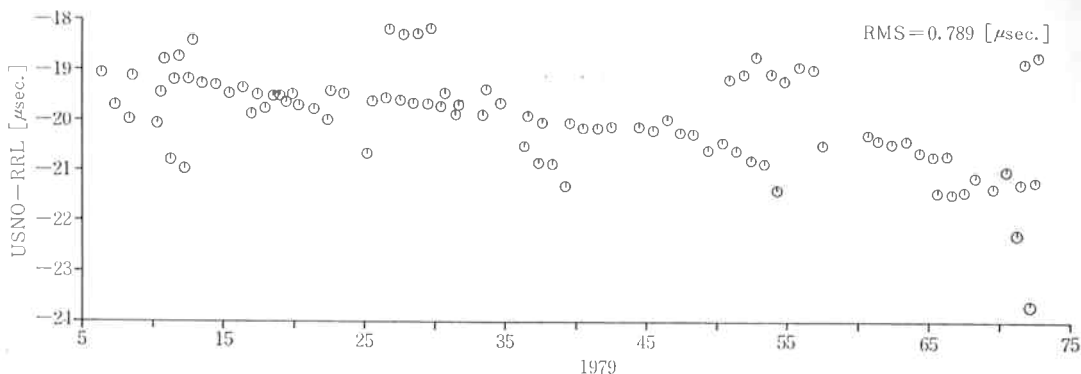
$$\text{観測値 } O_A(t_1) = \frac{\rho_A(t_1)}{c} + [t_s(t_1) - t_A(t_1)] + \frac{\Delta\rho_A(t_1)}{c} \quad O_B(t_2) = \frac{\rho_B(t_2)}{c} + [t_s(t_2) - t_B(t_2)] + \frac{\Delta\rho_B(t_2)}{c}$$

$$\text{理論値 } T_A(t_1) = \frac{\rho_A(t_1)}{c} + \frac{\delta\rho_A(t_1)}{c}; T_B(t_2) = \frac{\rho_B(t_2)}{c} + \frac{\delta\rho_B(t_2)}{c}$$

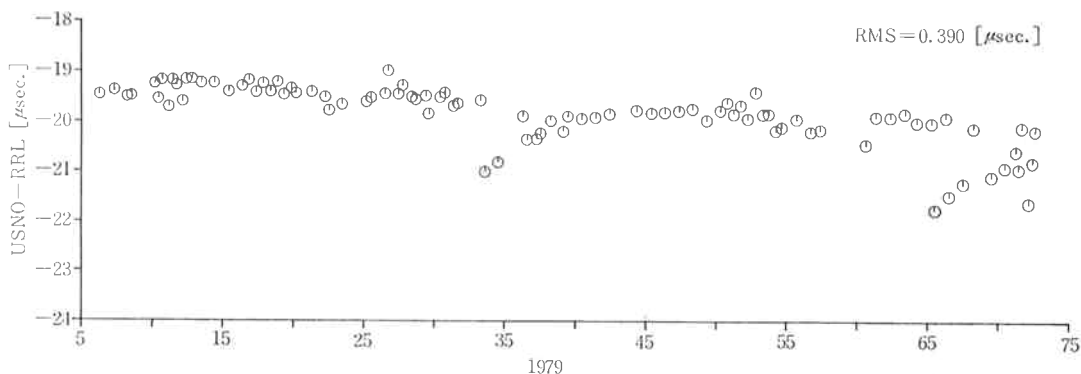
$$\Delta t \approx (T-O)_A - (T-O)_B - [t_s(t_1) - t_s(t_2)] - \frac{1}{c} [\Delta\rho_A(t_1) - \Delta\rho_B(t_2)] + \frac{1}{c} [\delta\rho_A(t_1) - \delta\rho_B(t_2)]$$

搭載時計の変動 伝搬路の影響 軌道推定誤差

第1図 NTS による時刻同期の原理



(a) UTC(USNO) - UTC(RRL) (電離層補正前)



(b) UTC(USNO) - UTC(RRL) (電離層補正後)

第2図 NTS-1 による時刻比較結果 (日米間)

標準電波 WWV と同様の信号形式で、135 MHz 帯で供給実験を行っており⁽⁹⁾、これは GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite) 系衛星に引き継がれ、現在 GOES-1, SMS-2 という衛星から NBS の標準を供給している^{(10), (11)}。この信号には、衛星の軌導予測値が挿入されており、受信側で衛星の漂動による衛星-受信点間の距離の変化を補正し、時刻比較精度 $1 \mu\text{s}$ 程度、周波数比較精度 1×10^{-11} 程度で比較可能とされている。

当所におけるこの種の計画としては、実験用中型放送衛星 (BS) 実験において、TV 放送の同期信号に、周波数標準部の国家標準からの信号を用い、標準時及び周波数を日本全土に供給するというものがある⁽¹²⁾。

現在基礎実験の段階であるが、今後衛星へ送る信号を伝搬遅延及び衛星の漂動による Doppler Shift 分を補正するようにシフトさせ、受信点でこれらの影響が打ち消されるように制御する予定である。

試算によれば、上述のように制御することにより、日本国内全域で周波数比較精度 2×10^{-10} 、時刻比較精度 $5 \mu\text{s}$ 程度で比較が行えるようであり⁽¹³⁾、また、軌道推定

による衛星の位置の補正を行えば、 $0.5 \mu\text{s}$ 程度の時刻比較を行うことができる。

3.3 静止衛星 two-way 方式

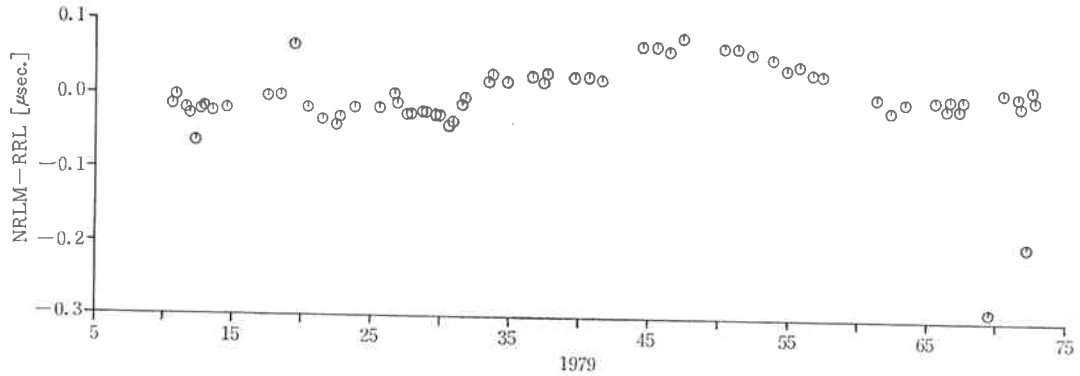
この方式の原理は、第5図に示すとおりで、この方式の利点としては、双方向伝送であるため、両局からの信号が同一の伝搬路を通り、途中の伝搬路の影響がほぼ打ち消され、高精度の時刻比較が可能なことである。また、この方式により現在のところ最も高精度の比較結果が報告されている。第2表にこの方式の主な結果を示す。

静止衛星 two-way 方式による当所の計画としては、ECS 及び CS を用いた鹿島-平磯間の高精度時刻比較実験があり、数十 ps 程度の比較精度を目指している⁽²⁰⁾。

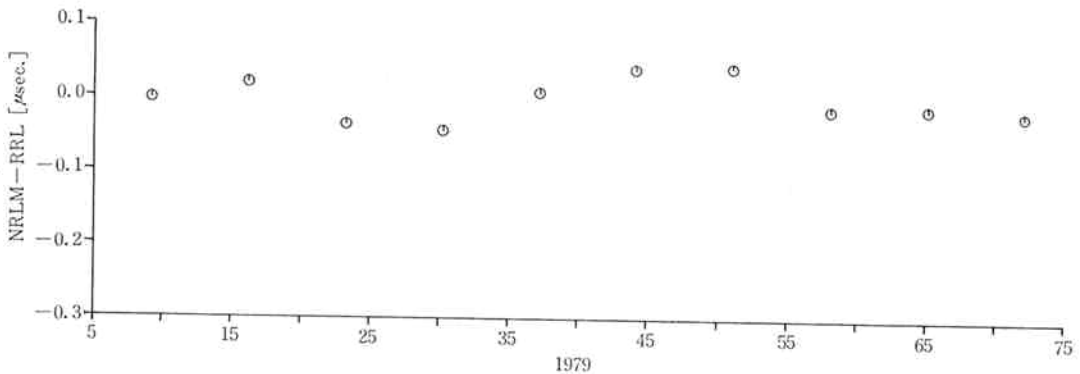
4. 静止衛星 two-way 方式の問題点

前述のように、この方式では現在数 ns 程度の比較精度が得られているが、今後 1 ns 以下の高精度比較を行うためには、解決すべき点がいくつかある。

まず、この程度のオーダとなると、両局における局内遅延量は一定とは考えられず、特に温度変化による遅延

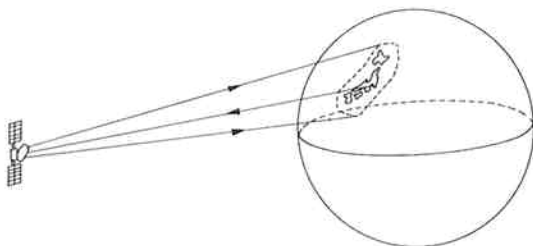


(a) UTC(NRLM) - UTC(RRL) by NTS-1 (1次のレートは除去)



(b) UTC(NRLM) - UTC(RRL) by TV (1次のレートは除去)

第3図 NTS-1, TV 信号による時刻比較結果 (日本国内)

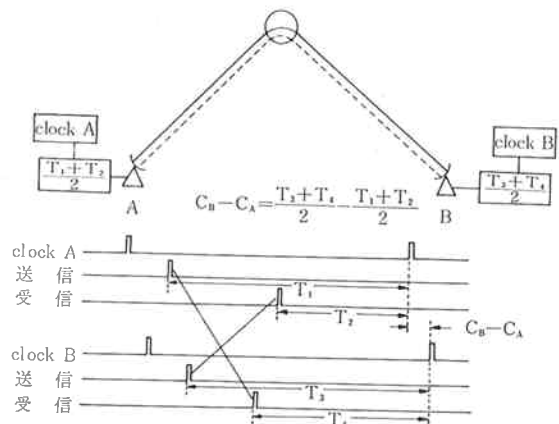


第4図 静止衛星 one-way 方式

時間の変動を、例えば 0.1 ns 以下の精度で把握しておく必要がある。

次に、このような高精度比較のためにには、高 S/N で信号を伝送する必要があり、このため PN code を用いて行う場合、10~50 ps の精度を得るためには、250 MHz 以上の帯域が必要であると考えられている。しかし、現在のところ誤り率との関係で、Clock rate が 50 MHz 程度が限界といわれており、安定な高速拡散技術の開発が必要である。

また、two-way の場合、途中の伝搬路の影響はほとんどないと考えられるが、大陸間などで両局間のローカ



第5図 静止衛星 two-way 方式の原理

ルタイムが極端に異なる場合、例えば、6 GHz up, 4 GHz down のとき、この周波数差により最大数 ns の電離層による影響が考えられる。そのため、電離層の影響を受けにくい、より高い周波数の準ミリ波、ミリ波の周波数帯を用いるか、電離層のモニタを行う必要がある。

第2表 衛星 two-way 方式の主な結果

年	報告者	衛星	2点間距離	精度
1964	Markowitz <i>et al.</i>	RELAY II	Kashima—Mojave	0.1 μ s
1970	Murray, <i>et al.</i> ⁽¹⁴⁾	DSCS X-band		0.16 μ s
1971	Mazur, <i>et al.</i> ⁽¹⁵⁾	ATS-1 ATS-3	6 GHz up 4 GHz down Mojave—Rosman 3000 km	50 ns
1974	Chi, Mazur, <i>et al.</i> ⁽¹⁶⁾	ATS-1	6 GHz up 4 GHz down Mojave—Rosman 3000 km	10 ns
1976	Saburi, Yamamoto <i>et al.</i> ^{(17), (18)}	ATS-1	6 GHz up 4 GHz down Kashima—Rosman	2 ns
1976	Brunet, <i>et al.</i> ⁽¹⁹⁾	SYMPHONIE	6 GHz up 4 GHz down Raisting—Pleumeur Boudou	5 ns

そのほかに、地球の自転による相対論効果が考えられる^{(21), (22)}。これは、回転する系内で互いに逆方向に伝搬する電磁波は、その系を1周したときに、系の回転速度と、回転軸と電磁波が囲む面積の積に比例した位相差を生ずるという効果である。これを静止衛星 two-way 方式の時刻比較に当てはめてみると、2地点の配置によっては、数百 ns のバイアスの誤差を生じ、また衛星の漂動により日周の変動を生じる。このため、高精度比較のためには、衛星の軌道推定による補正が必要である⁽¹⁸⁾。

5. VLBI による時刻同期

VLBI 実験により、逆に両ローカル発振器の時刻同期を行うという報告が幾つかされており^{(23), (24)}、かなり高精度の結果が得られているようである。今後より高精度化が期待でき、時刻同期のためにも有力な手段と考えられる。

この原理を以下に簡単に述べる⁽²⁵⁾。

1. でも述べたように、VLBI での観測量である相対遅延時間 τ は次式で表される。

$$\tau = \tau_g + \tau_i + \tau_p + \tau_e$$

ただし τ_g : 幾何学的遅延時間

τ_i : 局内遅延時間差

τ_p : 電離層及び大気圏による伝搬遅延時間差

τ_e : 両ローカルの時刻同期誤差

また、 τ_g は次式のように表される。

$$\tau_g = \frac{D}{c} \{ \sin \delta_B \sin \delta_s + \cos \delta_B \cos \delta_s \cos h \}$$

ただし D : 基線長

δ_B, δ_s : 基線及び電波源の赤緯

$h = \alpha_B - \alpha_s$: 基線と電波源の時角

ここで、両ローカルの時刻同期誤差 τ_e が

$$\tau_e = \tau_{e0} + R t$$

のように、 $t=0$ における時刻同期誤差 τ_{e0} と、両者の周波数同期誤差 R であるような1次式で表せるものとし、 τ_i, τ_p については、 τ の決定精度以上の精度で測定あるいは推定されているものとし無視すると、 τ は、次式のように表される。

$$\tau = \left\{ \frac{D}{c} \sin \delta_B \sin \delta_s + \tau_{e0} \right\} + R t + \frac{D}{c} \cos \delta_B \cos \delta_s \cos \{ \alpha_{B0} - \alpha_s + \omega_e t \}$$

ただし ω_e : 地球の回転速度

上式を

$$\tau = O_1 + O_2 t + O_3 \cos \{ O_4 + \omega_e t \}$$

と表すと、一つの電波源について連続観測することにより、 $O_1 \sim O_4$ が決定でき、これらから未知パラメータが推定できるわけである。

未知パラメータの数によっては、一つの電波源の観測だけではすべての未知パラメータの決定はできないが、複数個の電波源を連続観測することにより決定できる。

例えば、 τ の決定精度が 0.1 ns 程度で、 $\pm 0.1''$ の精度で位置が既知の電波星を5個観測したとき、両ローカルの時刻同期精度及び、周波数差の決定精度は、それぞれ 0.1 ns、 4×10^{-14} 程度のシミュレーション結果が得られている⁽²⁵⁾。

以上のように、 τ の決定精度と同程度の精度で時刻比較が可能であるが、このような高精度測定のためには、VLBI システム自体の高精度化、 τ_i, τ_p の決定精度の向上等の問題を解決する必要がある。

6. ま と め

今後、VLBI 実験における両局のローカル発振器の同期精度としては、0.1 ns あるいは、それ以上が必要となるであろう。このような高精度比較のための方式としては、ほぼ、静止衛星 two-way 方式に限られるものと考

えられる。一方、VLBIにおいても、システムの高精度化により、上記程度の精度で時刻比較が可能になるものと考えられる。

最後に、本稿をまとめる機会を与えていただいた川尻第三宇宙通信研究室長に感謝いたします。また、有益な資料を提供していただいた安田周波数標準値研究室長に感謝いたします。

参 考 文 献

- (1) 佐分利, 安田, 小林, 佐藤; “TV信号を用いた時刻と周波数の精密比較”, 電波研季報, 18, No. 99, p. 433, Nov., 1972.
- (2) Higa, W.; “Time synchronization via lunar radar”, Proc. of IEEE, 60, No. 5, p. 552, May 1972.
- (3) Easton, R., Fisher, L., Hanson, W., Hellwig, H. and Rueger, L.; “Dissemination of Time and Frequency by Satellite”, Proc. of IEEE, 64, No. 10, p. 1482, Oct., 1976.
- (4) 木村小一, 航行衛星, 海文堂, 1976.
- (5) Hara, T. and Sato, H.; “Time synchronization via the TRANSITE satellite at Mizusawa”, Proc. of the 10th PTTI Application and Planning Meeting, 1978.
- (6) Buisson, J. and McCaskill, T.; “Precise worldwide station synchronization via the NAVSTAR GPS, Navigation Technology Satellite (NTS-1)”, Proc. of the 8th PTTI Application and Planning Meeting, 1976.
- (7) Buisson, J., McCaskill, T., Oaks, J., Lynch, D., Wardrip, C. and Whitworth, G.; “Submicrosecond Comparisons of Time Standards Via the NTS”, Proc. of 10th PTTI Applications and Planning Meeting, 1978.
- (8) Raymond, L., Oaks, J., Osborne, J., Whitworth, G., Buisson, J., Landis, P., Wardrip, C., and Perry, J.; “NAVIGATIONAL TECHNOLOGY SATELLITE LOW COST TIMING RECEIVER”, GSFC Document, X-814-77-205, Aug., 1977.
- (9) Hanson, D., and Hamilton, W.; “Satellite broadcasting of WWV signals”, IEEE Trans. on Aerospace and Electronics Systems, AES-10, No. 5, p. 562, 1974.
- (10) Hanson, D., Cateora, J. and Davis, D.; “A time code from NOAA’s Geostationary Operational Environmental Satellites”, Proc. of 8th PTTI Application and Planning Meeting, 1976.
- (11) Cateora, J., Davis, D. and Hanson, D.; “A Satellite Controlled Digital Clock”, NBS Tech. Note 681, June, 1976.
- (12) 高橋富士信; “放送衛星を利用した精密時刻供給法の提案”, 電波研季報, 22, No. 118, p. 135, June, 1976.
- (13) 小林, 佐藤, 高橋; “静止衛星による周波数供給実験”, 信学総合全国大会, 2169, 昭54.
- (14) Murray, J., Pritt, D., *et al.*; “Time Transfer By Defence Communications Satellite”, Proc. of 25th AFC Symposium, p. 186, 1971.
- (15) Mazur, W., Barriere, D.; “Submicrosecond Time Synchronization of Ground Stations Via ATS”, GSFC Document X-573-71-115, 1971.
- (16) Chi, A. and Byron, E.; “A Two-way Time Transfer Experiment Using a Synchronous Satellite”, Proc. of the 7th PTTI Applications and Planning Meeting, p. 357, 1975.
- (17) Yamamoto, M., Harada, K. and Saburi, Y.; “A time comparison experiment performed by SSRA system via ATS-1”, Journal of the RRL, 23, 1976.
- (18) Saburi, Y.; “Observed time discontinuity of clock synchronization in rotating frame of the earth”, Journal of the RRL, 23, No. 112, p. 255, 1976.
- (19) Brunet, M., Freon, G. and Parcelier, P.; “Comparaison d’horloges atomiques distantes a l’aide du Satellite Symphonie”, URSI, 1977.
- (20) 標準時刻伝送に関する基礎実験, ECS 実験実施手順書.
- (21) Reinhardt, V.; “Relativistic effects of the rotation of the earth on remote clock synchronization”, Proc. of the 6th PTTI Applications and Planning Meeting, 1974.
- (22) Janossy, L., 物理的相対性理論, 講談社, 昭49.
- (23) Hurd, W.; “An Analysis and Demonstration of Clock Synchronization by VLBI”, IEEE trans. IM-23, No. 1, March, 1974.
- (24) Connon, W., Petrachenko, W., Langley, R.; “Clock Rate Comparison by Long Base Line Interferometry”, Proc. of the 9th PTTI Applications and Planning Meeting, 1978.
- (25) 河野, 高橋, 小池; “日本列島内の VLBI による基線及び時刻同期誤差の推定” 第216回電波研研究談話会, April, 1979.