

V-11. VLBI による時刻同期

佐分利義和*

TIME SYNCHRONIZATION BY VLBI TECHNIQUE

By

Yoshikazu SABURI

1. はじめに

原子周波数標準器（原子時計）の性能向上により、正確さが 10^{-13} 台、あるいは安定度が 10^{-15} 台といったものが実現できるようになった。このことは、各国の標準研究所で保持されている原子時の一様性や一致度が向上するという事に止まらず、今や多くの分野での利用が広まりつつある。全世界的な独立同期の精密化という技術を活用して、科学観測では新しい情報を、技術分野では新しい方式を生み出すことが期待される。

VLBI は科学観測への代表的な応用例であり、技術分野での例としては電波航法、特に、全世界的双曲線航法として知られているオメガ・システムの実用化、更に、最近では原子時計搭載の衛星による航法システムの開発があり、また、通信分野での本格的な応用として世界的な高速デジタル多重通信網の同期に用いることなどが検討されつつある。

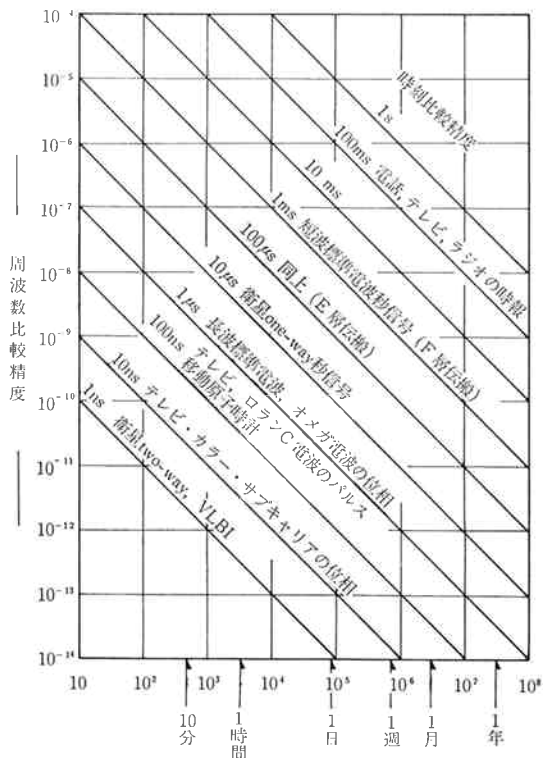
このように、世界的規模での精密同期が多くの分野で使われるようになると、従来に増して遠隔地間、特に、大陸間の時計について、時刻あるいはその周波数比較に高精度化が必要となってくる。ナノ秒 (10^{-9} 秒 = ns) とした高精度な比較方式として、衛星による方法とともに、VLBI による時刻、周波数比較法が期待されているゆえんである。

以下、従来の方式とともに、そのごく概要を記してみたい。

2. 従来の比較法と問題点

二つの地点におかれた時計の時刻比較あるいは周波数比較には、従来から多くの方法が用いられてきており、必要とする精度、地点間の距離、更に、他の諸条件によって最適と考えられる方法を選択する必要がある。

これらの方法としては、ラジオ、テレビの時報信号という簡便なものから、短波や長波の標準電波信号、ロランCやオメガのような電波源の安定化された航法電波、最近ではテレビ電波の同期パルスあるいは副搬送波など、共通な電波を仲介とする多くの比較法が一般的なものとして使われてきた。このほかに、運搬時計による直接比較法、各種衛星による方法が専門の分野では、使用あるいは開発されつつある。更に、特殊なものとしては、月レーダによるもの、流星を利用するものなどが報告されている。これらの総合的報告は文献(1)、(2)及び(3)に概要がまとめられているが、主なものの時刻及び周波数比較精度の概略値を、第1図に示す。



第1図 各種比較法による精度

* 周波数標準部

高精度な方法として、近距離の場合には、III-2. 本特集号の国内基礎実験での例のように、共通なテレビ電波の同期パルスを用いた 0.1 μ s 程度の時刻比較や、そのカラー副搬送波の位相比較による 1×10^{-11} 程度の周波数比較が可能(10分程度の測定時間による)であり、簡易、かつ信頼度の高いものが使用できる。ロランC電波も地表波の受信できる地域については 0.5 μ s 程度の測定に適している。

しかしながら、遠距離、特に大陸間といったことになると、原子時計の運搬による方法と衛星利用の方法に限定されてしまい、特殊なものとして、月レーダによる実験結果がある。以下、これらの現状とその問題点について述べる。

2.1 運搬時計法

この方法は信頼度、すなわち精度の比較的高い方法として、また、他の比較システムの較正用に多く使用されており、使用する時計の安定度、特に環境に対する安定度によってその精度が決まる。セシウムあるいはルビジウムの小形原子時計を用いた場合、比較のためのラウンド・トリップの日数にもよるが、ほぼ 0.1~0.2 μ s が現在の限度である。これを高精度にするには時計の安定度改善が必要なのは当然であり、最近の衛星搭載用原子時計の開発成果などに期待するところが多い。

このほか、ns 台を問題とするようになると、運搬時計への相対論効果の補正が必要である。ジェット機によって大陸間を飛行する場合、運動する時計は地上に静止している時計に対して3種の補正が必要となる。その第1は、飛行速度による2次ドップラ効果による遅れ、第2に飛行高度による地球の重力ポテンシャルの違いによる進み、第3に、地球の回転運動によって生ずる効果(東向き飛行では遅れ、西向きでは進み)である。例えば、アメリカ東岸より日本まで、ハワイを経由して飛行するとした場合、上記各項の推定量はそれぞれ 60 ns, 19 ns 及び 46 ns となり、総合して 87 ns というかなりの量となることがわかる。将来、ns 程度の精度を必要とする場合には、飛行経路、高度及び速度などのデータを必要としよう。

2.2 月レーダ法⁽⁴⁾

これは、特殊なものではあるが興味深い方法であり、1972年ごろに、米国の深宇宙開発プロジェクトに関連して実験がなされている。8.4 GHz のXバンド・レーダは Pseudo Noise (PNコード) で変調されて、米国西岸より送信され、月面で反射された信号が米国東岸で受信されて2地点の時計が比較された。同時に実施された

運搬時計との比較結果から 20 μ s の精度が得られたが、約3か月のデータから、これには月の秤動により、28日周期で月面の反射点が、直径約 180 km の範囲で動くための地形の影響が、振幅約 12 μ s で含まれていることが明らかにされた。このような補正を行えば、5 μ s の精度を得られることがわかったが、やはり施設も大きくなり、また、月の運動による補正も、現状では時刻比較精度 1 μ s 以上には明らかでないなど、高精度法としては問題が多い。しかしながら、現在進行中のレーザによる月の測距網が進展すれば、将来これに類似した比較法も開発されるかもしれない。

2.3 衛星による方法

高精度、広域性及び信頼性のある方法として最も期待されている方法であり、その研究及び実用化が電波科学連合(URSI)の勧告、国際無線諮問委員会(CCIIR)の第7研究委員会でのIWP7/5の設立による推進、また、秒の定義諮問委員会(CCCDS)や、国際天文連合(IAU)の第31委員会での国際原子時の精度改善のための議論などで、国際的な課題として取り上げられている。

衛星による方法には、(1)使用する衛星の軌道の種類(大別すれば移動又は静止衛星)、(2)受信のみによる(one-way)方式か、双方向の送受信を行う(two-way)方式、(3)使用する搬送波の周波数帯、(4)秒パルスの変調方式、といったパラメータの組合わせで多くの方式が考えられる。

one-way方式で、VHF又はUHF帯の周波数を用いたものは、装置も簡単で利用しやすく、広域の一般利用者に、現在の標準電波より安定、かつ、精度の高い時刻信号を供給しうる。one-wayであるから、伝搬時間を計算により補正することが必要であり、このためには、精密な衛星軌道の情報及び電離層内の伝搬時間遅れを考慮しなければならない。後者については、二つの搬送波による測定から補正する方法がとられている。

移動衛星によるものとしては、現在、既に実用となっているNNSS(Navy Navigation Satellite System)でのTransit衛星からの時刻信号を利用することで、最低20 μ sの精度が得られることが示されている。この種の衛星で、時刻信号の検出精度を上げるために、PNコード(ビット・レート1.67 MHz)を用いることも既に実験されており、更に、航法技術衛星の一連の実験では、既にルビジウム原子時計搭載のNTS-1、また、セシウム原子時計搭載のNTS-2も打ち上げられていて同期実験が種々行われている。NTS-1及び2では、最高6.4 MHzのside tone方式で時刻を測定する方法

がとられ、NTS-1の実験結果では、軌道データを用いると200 nsより、良い比較精度が得られている⁽⁶⁾。米国のNASA及びNBSでも、1967年より数回にわたって同様な実験を行っており、最近、NBSは気象用静止衛星SMS/GOESの468 MHzを用いて時刻コードを送信し、軌道データによる伝搬時間の補正により10 μsの精度が得られることを示している⁽⁶⁾。

高精度な比較法としては、静止衛星、マイクロ波帯周波数によるtwo-way方式が最も良く、この場合更に時刻信号の検出S/N比の良い変調方式を採用することが望ましい。変調方式としてPNコード変調を用いたものはNASAの実験⁽⁷⁾、米国防衛通信網での通信信号との重量による時刻伝送⁽⁸⁾及び当所が1975年に実施したATS-1衛星による日米時刻比較実験の例がある。このような方式で、現在までに最高精度及び精度を示し得たのは、この日米時刻比較によるものであり、時刻秒信号の約4分間での比較精度は約1 nsであり⁽⁶⁾、また、比較精度としても、地球自転による相対論効果の補正⁽⁹⁾を行うことにより、約10 nsという値を達成できた⁽¹⁰⁾。

このような方式での今後の問題点は、局内遅れ時間の安定性と測定、マイクロ波といえど、電離層内遅れ時間の補正精度などにあり、一方で、国際時刻同期といった定常的測定に結び付けるには、どうすればよいかという点を考えねばならない。例えば、精度はあまり高くないが、毎日容易に測定できる前述のようなone-way方式のデータをとりながら、ある頻度で、高精度なtwo-way方式の測定を実施して校正していくという併用方式、あるいは、常時運用されている衛星通信回線に重畳した方式などが必要であろう。

衛星による標準供給サービス業務として、400.1±0.025 MHz、4202±2 MHz及び6427±2 MHzの周波数が割り当てられているが、この程度のバンド幅では50~10 nsの精度が限度である。今後10~20年での時刻比較に要求される精度は50~10 psというものであろうし、一方、他業務との共用のためにPNコードの使用を考えると、バンド10(3~30 GHz)及び11(30~300 GHz)での周波数帯では、250 MHz及び1.2 GHzのバンド幅が必要であると考えられている⁽¹¹⁾。

このほか、最近ではレーザー・パルス信号による時計比較の高精度(ns台)な実験も行なわれつつあり^{(12),(13)}、やがては衛星にも使用され、電波との優劣が比較されよう。

3. VLBIによる比較法

原子周波数標準器の位相安定度の良いこと、また、原

子時計として高精度の独立同期が可能なこと、更に、磁気記録データの電算機による相関処理といった技術を用いたVLBIが、電波天文、測地などの分野に精密な情報を与えるということは、本特集号各章に述べられているとおりである。

VLBIによる時計比較ということになると、原理的には、これらの応用とは逆の利用ということになる。すなわち、この場合には電波源あるいは基線ベクトルに関する量が既知量となり、時計間の時刻差が未知量として取り扱われる原理であり、その精度は既知量として取り扱う変数の精度に依存することになる。実際には、多くの未知量を少しずつ変えて、相関の最大値を見つける過程から、一つの推定量として得られる場合が多い。

このようにして、行路差による遅延時間の観測値から、局の時計間の時刻同期誤差(τ_e)を求めることができ、一方、フリンジ・レート⁽¹⁴⁾の観測値から時計間の歩度差、すなわち、2局の原子周波数標準器の周波数差を求め得ることになる。

3.1 遅延時間測定による時刻比較

観測データ処理によって得られる相関最大値のためのビット・シフト量、すなわち全遅延時間(τ)は、

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

である。ここで右辺各項は、それぞれ幾何学的遅延時間、時刻同期誤差、局内遅延時間差及び伝搬遅延時間差(電離層及び大気)である。

時刻比較では、 τ_i 及び τ_p の補正值及び τ_g の計算値を用いて τ_e を求める。幾何学的遅延量 τ_g はある時刻($t=0$)において、次のように表される。

$$\tau_g = \frac{D}{C} [\sin \delta_B \cdot \sin \delta_S + \cos \delta_B \cdot \cos \delta_S \cdot \cos (\alpha_S - \alpha_B)]. \quad \dots(1)$$

ここでは、地心を原点とする天球赤道座標系を用い、2局間を結ぶ基線ベクトル D 及び用いる電波星の赤緯及び赤経を、それぞれ α_B 、 δ_B 及び α_S 、 δ_S としてある。これらの量の中で、電波星に関する量はもちろんのこと、基線ベクトルの赤緯 δ_B は、時間に無関係に一定値であるが、基線ベクトルの赤経 α_B は、地球の自転とともに変化する。今、その初期値を α_B 、自転角速度 ω_e をとすると、

$$\alpha_B(t) = \alpha_B + \omega_e t$$

となり、これを(1)式に代入して整理すると、次式となる。

$$\tau_g(t) = K_0 + K_1 \cdot \cos \omega_e t + K_2 \cdot \sin \omega_e t. \dots\dots(2)$$

$$\begin{aligned} \text{ここで, } K_0 &= (D/C) \cdot \sin \delta_B \cdot \sin \delta_S \\ K_1 &= (D/C) \cdot \cos \delta_B \cdot \cos \delta_S \cdot \cos(\alpha_S - \alpha_B) \\ K_2 &= (D/C) \cdot \cos \delta_B \cdot \cos \delta_S \cdot \sin(\alpha_S - \alpha_B). \end{aligned}$$

一方、両局の時計間の時刻同期誤差の時間的変化 $\tau_e(t)$ は、 $t=0$ での初期時刻差を τ_e 、時計の歩度差(周波数差)の相対率を δ_f 、また、周波数エージング・レート(周波数差)の差を a_f とすると、次式のようになる。

$$\tau_e(t) = \tau_e + \delta_f \cdot t + (a_f/2) \cdot t^2. \dots\dots(3)$$

観測される $\tau(t)$ には、これら $\tau_g(t)$ と $\tau_e(t)$ の時間的に一定の項と、時間的変化をする項が含まれる。したがって、ある程度長時間のデータと、 α_S 、 δ_S の異なる電波星のデータをとれば、測定精度が高ければ、これらの各項を分離決定できることになり、理論的には、各項の推定値をもとにして天文的な変数値とともに、時刻差の値も確定できるといえる。しかし、実際には観測時間が短いと(2)式の \cos 項で生ずる一定値と τ_e とが分離できなかつたり、(2)式の \sin 項が(3)式の第2項と区別し得なかつたり、また、 δ_B や δ_S の値によっては、誤差が大きくなり得ることもあるので、具体的な工夫を要することは明らかである。

測定精度としては、今後 100 MHz 以上のバンド幅合成技術が確立されてくれば、遅延時間 1 ns 以下を得ることも可能となろう(本特集号、V-3. バンド幅合成法による高精度 VLBI 方式参照)。比較精度としては、1 m 程度の精密なアンテナ位置、電波星の座標及び大気中での伝搬時間の変動の補正などが確立されれば、大陸間といった距離でも、10 ns よりよい値が得られよう。

1972年に米国 JPL では Goldstone での 10 数 km の基線による時計比較の基礎実験及び解析を行い、システム・バンド幅 250 kHz で測定精度 100 ns を示している⁽¹⁴⁾。1973年には同様な測定が Goldstone と Madrid の基線長 8400 km について行われ 200~400 ns の精度を得ている⁽¹⁵⁾。最近のものとしては、1976年にカナダの Lake Traverse と Green Bank の間で約 70 ns の度精の報告⁽¹⁶⁾、また、1977年に Westford と Green Bank 間の実験では、約 25 ns で原子時計運搬による測定値と一致したという報告⁽¹⁷⁾がある。

3.2 フリンジ周波数の測定による周波数比較

広帯域システムでは遅延量測定を精密に決定できて、上述の時刻の精密比較に利用できるが、狭帯域システムではその精度が低下する。しかし、狭帯域システムでもフリンジ周波数の観測値より、両局の時計の歩度差、す

なわち、周波数差を精密に決定できて有用である。フリンジ周波数 (ν_F) は、2局の間のドップラ・シフトに相当するような量であり、時計同期誤差及び幾何学的遅延量のみを考え、受信角周波数を ω_0 とすると、(2)及び(3)式より、次のように表すことができる。

$$\begin{aligned} \nu_F &= \omega_0 \cdot \frac{d\tau/dt}{2\pi} = \frac{\omega_0}{2\pi} (d\tau_e/dt + d\tau_g/dt) \\ &= \frac{\omega_0}{2\pi} \left\{ \delta_f + a_f \cdot t + \omega_e (K_2 \cos \omega_e t \right. \\ &\quad \left. - K_1 \sin \omega_e t) \right\}. \dots\dots(4) \end{aligned}$$

上式でわかるように、周波数差 (δ_f) を分離して求め得ることになる。このような実験例として、Goldstone での短い基線では 2×10^{-14} の精度を示し⁽¹⁹⁾、また、1973年に行われたカナダの Aigonquin 電波天文台の 46mφ アンテナと、イギリスの Chilbolton 天文台の 25 mφ アンテナによる基線長 5265 km の実験では、システム帯域幅が 5 MHz であったが、フリンジ周波数の観測データの解析により、両局で使用した水素メーザの周波数差を 5×10^{-13} で決定できたと報告⁽²⁰⁾されている。

4. 終わりに

時間及び周波数の大陸間といった国際精密比較法の早期確立と定常化が国際的にも強く要望されており、特に、日本は定常的精密比較という点では、現在のところ欧米とは孤立の状態にあるともいえる。このような面から、従来の方法と、VLBI による方法とを概観したが、ns オーダの比較法としては、衛星によるマイクロ波 two-way 方式と、VLBI による方法とに限定されるといえる。

比較の精度を 1 ns あるいはそれ以上にするには、これら二つの方式とも解決すべき問題点も多いが、将来は相互に測定値を比較検討する必要があるろうし、また、この2方式を折衷したような方式が考えられるかもしれない。

定常的測定となると比較網の確立が必要となるが、VLBI では電波天文、地球自転に関する諸量あるいは測地などの観測データが、そのまま時刻にも使用できるという特徴があり、比較網の実現可能性も高い。

表題の、VLBI による時刻同期という内容は、VLBI 技術そのものであり、観測方程式での変数のとり方による別名とも言うるので、この分野の今後の発展に期待したい。一方、局部発振器及び時計の振る舞いが、観測データの解析、得られる精度の上でいかに重要な役割を果たしているかの認識を深めつつ、この技術に有用な原子発振器の性能向上に努力したい。

参 考 文 献

- (1) B. Blair(Editor); "Time and Frequency: Theory and Fundamentals", NBS Monograph 140, Chap 10, pp.233-313, 1974.
- (2) CCIR, SG. 7, Proposed revision of draft report 363-3 (Rev. 76), "Comparison of methods for the transfer and dissemination of time and standard frequencies", (Doc. 7/176, Feb. 1978).
- (3) CCIR, SG. 7, Proposed revision of draft report 518-1 (Rev.76), "Standard-frequency and time-signal dissemination via Satellite", (Doc. 7/155, Jan. 1978).
- (4) W. Higa.; "Time synchronization via lunar radar", Proc. IEEE, **60**, No. 5, p. 552, May 1972.
- (5) R. Easton, L. Fischer, W. Hanson, H. Hellwig and L. Rueger.; "Dissemination of Time and Frequency by Satellite", Proc. IEEE, **64**, No. 10, p. 1482, Oct. 1976.
- (6) J. Cateora, D. Davis and W. Hanson.; "A Satellite-controlled Digitalclock", NBS Tech. Note 681, June 1976.
- (7) A. Chi and E. Byvon.; "Two-way time transfer experiment using a synchronous satellite", Proc. 7th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Planning Meeting, p. 357, December 1975.
- (8) M. Yamamoto, K. Harada and Y. Saburi.; "A time comparison experiment performed by SSRA system via ATS-1", J. Radio Research Labs., **23**, No. 110, March, 1976.
- (9) Y. Saburi.; "Observed time discontinuity of clock synchronization in rotating frame of the earth", *ibid*, **23**, No. 112, p. 255, Nov, 1976.
- (10) Y. Saburi, M. Yamamoto and K. Harada.; "High-precision time comparison via satellite and observed discrepancy of synchronization", IEEE Trans., IM-25, 4, p. 473, Dec. 1976.
- (11) CCIR, SG. 7, Draft Recommendation, Doc. 7/147 (Jan. 1978).
- (12) J. Besson.; "Synchronisation d'horloges à quelques nanosecondes par l'ONERA", C.R. Acad Sc., **279 B**, p. 147, 1974.
- (13) C.O. Alley, L. Cutler, R. Reisse, R. Williams, C.A. Steggerda, J. Rayner, J. Mullendore and S. Davis.; Report for joint meeting, IAU General Assembly, 1976.
- (14) W. Hurd.; "An analysis and demonstration of clock synchronization by VLBI", IEEE Trans. IM-23. 1. March, 1974.
- (15) W. Hurd.; "Demonstration of intercontinental DSN clock synchronizatin by VLBI", The deep space network progress report, Tech. Report 32-1526. **XVII**. p. 39. Jet Propulsion Lab., Oct. 1973.
- (16) S. Knowles, N. Waltman, N. Broten, D. Fort, K.I. Kellermann, B. Rayhrer, G. Swenson and J. Yen.; "Real-time accurate time transfer and frequency standards evaluation via satellite link long baseline interferometer", to be published in Proc. 9th PTTI Application and Planning Meeting, 1977.
- (17) T. Clark, C. Counselman, L. Hanson, H. Hinteregger, W. Klepeczynski, C. Knight, A. Rogers, I. Shapiro and A. Whitney.; "Precise clock synchronization via very long baseline interferometer", *ibid*.
- (18) J. Franselow, P.F. MacDoran, J. Thomas, J. Williams, C. J. Finnie, T. Sato, L. Skjerve.; "The Goldstone interferometer for earth physics", Jet Propulsion Lab., Tech. Rep. 32-1526, **V**, p. 45. Oct., 1971.
- (19) W. Cannon, W. Petrachenco and R. Langley.; "Clock rate comparison by long baseline interferometry", to be published in Proc. 9th PTTI Applications and Planning Meeting, 1977.

