キーワード

周波数, 時刻, Two-way time transfer, 周波数伝送

正員 今江 理人

郵政省通信総合研究所

正員 木原 雅己

NTT 未来ねっと研究所

1. はじめに

周波数・時間標準は、各種標準量の中で最も正確さの高いものであり、現在その不確かさは最高のもので 1.5×10^{-15} に達している⁽¹⁾。さらに、周波数・時間標準は、その正確さを、電波や通信回線等を用いて伝送することが可能であり、遠隔地点に置かれた標準器間で、周波数・時間比較を行うことができる。すなわち、標準器そのものを運搬して比較する必要はなく、正確さを維持する理想的な環境に標準器を設置しながら比較を行うことができる、という他の標準には無い特徴を有している。

各国の時間・周波数標準関連研究機関は、周波数・時刻比較を定期的実施し、国際原子時 (TAI) や協定世界時 (UTC) の構築に貢献している。この高精度周波数・時刻比較に利用されているのは、主に衛星等の宇宙技術である。全世界的なネットワークをシンプルに構成できる衛星のもつ特長を活かして、世界的な周波数・時刻の相互比較が行われている。地球の裏側の周波数・時間標準と、直接リアルタイムに周波数・時刻比較を行うには、現在衛星を利用する以外に方法はない。周波数・時間標準の高い正確さは、標準器そのものの研究開発による特性向上によるところが大きいが、その正確さの検証や維持には、衛星による周波数・時刻比較技術は欠くことができない。

このような周波数・時間標準の恩恵を一番受けているのは、電気通信分野であろう。無線通信では、周波数の高精度維持・タイミング同期、有線通信では、ネットワークのタイミング同期など、幅広い分野で周波数・時間標準は利用されている。通信はアナログシス

テムの時代から基準となる周波数を必要としているが、デジタルシステムの導入とともに基準周波数 (クロック) の重要性が増している。ネットワークのタイミング同期の必要性から、ネットワーク自身も周波数の伝送能力が要求されている。このネットワークでの基準信号伝送に重要な役割を果たしているのが、光ファイバを用いる光伝送技術である。大容量長距離伝送システムの実用化は、通信そのものに重要なだけでなく、基準信号伝送にも大きなインパクトを与える重要な技術である。さらに光伝送技術は、電気通信分野の中だけでなく、周波数・時間標準の世界でも、利用されるようになってきている。

本稿では、GPS 衛星や通信衛星等の宇宙技術を用いた精密時刻比較の現状や動向、および光ファイバを用いた最近の周波数・時刻伝送、比較技術などに関して紹介する。

2. 衛星を利用した周波数・時刻比較

2.1 GPS による比較技術

GPS 衛星⁽²⁾は、言うまでもなく米国が開発した全世界的な衛星測位システムであり、カーナビをはじめとした一般的な測位から精密測量などの様々な分野において用いられている。

周波数・時刻面における GPS 衛星の利用の歴史は古く、特に遠隔地点間の時刻比較における利用は、GPS システム構築の初期の段階から行われており、これは測位面とは異なり、時刻比較においては、衛星個数が僅少でも受信点位置が既知であれば利用することができることによる。

GPS を利用した時刻比較法としては、図 1 に記す様な 4 つの方式が古くから提案されている⁽³⁻⁴⁾。同図 a は比較というより GPS による周波数・時刻の供給にあたるもの、b は時刻比較を行う地点の上空を GPS 衛星が通過した際に地上の時計と GPS 衛星搭載時計間の時刻比較を行う。衛星の移動により、遠隔地点間の時刻比

Ultra-Stable Oscillation Circuits and Applications.
Frequency and Time Comparison and Transmission Technologies.
By Michito Imae, Member (CRL, Ministry of Posts and Telecommunications), and Masami Kihara, Member (NTT Network Innovation Laboratories)

図1 GPSによる時刻比較方法

較を衛星搭載時計を仲介として行うものであるが、種々の誤差要因のため、100～200 ns程度の精度である。cは時刻比較を行う遠隔地点で同時に同一のGPS衛星を観測する方式でCommon-view法と呼ばれる方式で2.1.1項で解説する。dは複数のGPS衛星を遠隔地点で同時に観測し、かつ干渉系的にデータ処理を行うもので、比較的近距离に限定される。

2.1.1 GPS Common-view法

GPS Common-view法は、図1c.に示したように遠隔地点で同一のGPS衛星を同時に観測し、おのおの受信点の基準時計とGPS timeとの差の測定を行い、

その相互の測定結果の差から遠隔地点の基準時計間の時刻差を求めるものである。

手法としては、GPSの測地目的におけるディファレンシャル方式と同様の考え方であり、同時に観測することにより

- (1) 衛星位置誤差（軌道情報の精度）
- (2) 搭載時計に起因する誤差
- (3) 伝搬路

が相殺され、近距离において数ns、数千kmの長距離においても10ns程度の比較精度が実現されている⁽⁴⁾。

同方式は、国際度量衡局(BIPM)が実施しているTAIやUTC決定のための国際時刻比較の主力として用いられているもので、図2にそのネットワークを示す。

2.1.2 GPS搬送波位相法

GPSを利用した精密時刻比較法として最近注目を集めている方式として搬送波位相を利用した方式が挙げられる。

同方式は、原理的には前項のCommon view法と全く同様であるが、搬送波（L1,L2のキャリア信号）の位相を用いるため10 ps 或いはそれを凌ぐ精度が期待できる。

GPSの搬送波利用は高精度精密相対測位法としては、既に実用化されており、地殻変動の精密観測や土木・建築などにおける精密測量に利用されている。精密時刻比較と精密測地・測量との基本的な違いとしては、後者では、複数の衛星信号を同時受信することにより、アンテナ受信後の局内遅延時間の変動やその絶対値が基本的にキャンセルできるが、時刻比較では、これらの変動や絶対値が時刻比較においては、分離不可能な量であることから、搬送波位相の利用が従来は困難であるとされてきた。

図2 GPSによる国際時刻比較ネットワーク

図3 衛星双方向時刻比較法

しかしながら最近時刻・周波数比較面でも搬送波位相利用の試みが欧米を中心として開始されつつある。これは、従来一般利用が困難とされていたL2波の利用が精密相対測地用受信機で可能になりつつあること、同用途の解析ソフトにより大気遅延補正が高精度に行うことが可能になりつつあること、衛星軌道要素の精密暦がやはり精密測地応用関係から入手可能になっていること等の技術的進歩によりGPS搬送波位相利用時刻比較法が見直されつつあることによる。さらに、BIPMとGPSの精密測地への応用に関する国際組織であるIGS (International GPS Service) との共同プロジェクトとして、GPS搬送波方式の精密時刻比較への応用研究が1998年より開始されている。

実際、欧米の研究機関では、短距離のGPS搬送波利用時刻比較結果においては10ps以内、長距離においても数10ps程度の高精度比較が実証されつつある。

しかしながら、前述の受信機内遅延変動の補正や精密測地に見られる系統的な誤差、さらに、2000年前後に極大期を迎える太陽活動度による電離層遅延の影響など、まだ解明すべき問題や課題がいくつかある。

2. 2 衛星双方向周波数・時刻比較法

通信衛星を用いた双方向伝送精密時刻比較は、1970年代より研究開発が始められており、方式としては長い歴史を持つ⁽⁹⁾。

実際当該方面における我が国の実績は古く、1970年代半ばには、ATS-1衛星を用いたnsオーダの高精度日米間時刻比較が行われ、サニヤック効果の実証などその高精度性が注目されていた⁽¹⁰⁾。

図4 アジア・太平洋地域衛星双方向時刻比較ネットワーク

衛星双方向時刻比較法は、図3に示すように、時刻比較を行う双方の局から自局の基準時計を基準とした信号を送信しあい、相手局からの信号と自局の基準時計との時間間隔を計測する。この際、両局からの信号が同一空間経路、同一衛星中継器の帯域等を通過するため、

- (1)伝搬媒質による影響
- (2)衛星中継器内における遅延変動
- (3)衛星の運動の影響

などが相殺されるため、超高精度の時刻比較を行うことができる。

一方、同方式の課題としては、

- (1)衛星地球局内における遅延変動の補償
- (2)衛星回線利用のための回線経費
- (3)送信を行うため、無人運用が困難

などが挙げられる。

同方式の実用化に向け国際度量衡委員会(CIPM)の諮問委員会である時間・周波数諮問委員会 (CCTF) 傘下に衛星双方向時刻比較に関するワーキンググループが設けられ、次世代の精密時刻比較法としての同方式の検討がなされており、欧米のT&F機関間では、現在1週間に3回の頻度で継続的に時刻比較を実施している⁽¹¹⁻¹²⁾。アジア・太平洋地域においても、通信総合研究所が中心となり、同地域のオーストラリア、中国、台湾、韓国などの主要T&F機関と共同で衛星双方向時刻比較ネットワークを構築しつつあり図4はそのネットワークを示したものである⁽¹³⁾。

図5 光ファイバを使用した周波数/時刻伝送

図6 通信網における基準周波数分配

3. 光ファイバを利用した周波数・時刻伝送

光ファイバを使用した周波数・時刻伝送には、図5に示すように受動型(a)と能動型(b)システムがある。受動型は、信号源から片方向で、信号到達点まで基準信号を送送する。能動型は、双方向の伝送路を使用する。

ある程度の距離を送送する場合の問題点は、伝送遅延変動である。遅延量が変動するので、信号到達点での位相が変動することになる。光ファイバケーブルの場合は、数10ps/℃/kmの伝送遅延変動を考慮する必要がある。

受動型システムでは、光ファイバの伝送遅延変動はそのまま信号到達点で位相変動となるが、システムをシンプルに構成できる。能動型システムでは、往復の信号伝送路を利用して、基準信号を信号到達点で折り返すことで、基準周波数の発生元で送受信信号の位相比較を行うことができる。この位相比較結果から、補正情報を得ることができるが、比較結果は基準信号が実際に受ける伝送遅延変動の2倍を表している。この補正情報をもとにした伝送遅延変動の補正は、基準周波数・時刻を発生側で行う場合と、基準周波数・時刻を利用する側で行う場合がある。

3. 1 通信網での周波数同期

通信網における周波数同期、いわゆる網同期が議論されはじめたのは、1960年代後半である。デジタル化と同期化により通信網の高機能化が進み、その後のSynchronous Digital Hierarchy (SDH)をベースにした通信網でも、網内周波数は同期化されている。

現在は、受動型システムに分類される従属同期方式で、通信網全体の周波数同期が実現されている。従属同期方式は、マスタノードから順番に他のスレーブノードに基準周波数を分配する方式である。周波数精度 10^{-11} 以内に維持されているマスタノードの基準周波

数は、長距離伝送装置を介して、地理的に離れたスレーブノードへ伝送され、位相同期回路により再生される。この基準周波数分配網の構成を図6に示す⁽¹⁴⁾。マスタノード(PRC)⁽¹⁵⁾とスレーブノード(Node Clock⁽¹⁶⁾、SEC⁽¹⁷⁾)が従属接続されて、基準周波数が伝送される。

単に周波数を伝送するという意味では、数1000km離れた場所に基準周波数を送ることはさほど難しいことではない。長距離伝送システムでは、送信側のクロック(周波数)を送信し受信側でそれを再生することで、基本的な通信を確立している。平均的な周波数精度を伝送するだけでなく、周波数の短期的な安定度を維持しながら、長距離を安定に伝送しようとする、いろいろな技術的な問題が発生し、ネットワークに制限が生まれる。SDHシステムでのクロックの短期的な安定度は、ジッタ・ワンダとよばれ、位相変動量や位相一時間変動量として規定されている。当然クロックのジッタ・ワンダは、伝送距離が長くなるほど、そしてスレーブノードの数が増えるほど劣化する。通信に必要な伝送品質を満足するために、このクロックのジッタ・ワンダの最大値が規定され、通信網内の従属同期網構成についても、PRC、SEC、Node Clockそれぞれの特性と、最大接続個数が規定されている⁽¹⁴⁾。

3. 2 高純度周波数伝送

通信網ほど広範囲ではなく、限られたエリアで、基準周波数を忠実に分配するための方式が提案されている。電波天文学とくに超長基線干渉計(VLBI)などのアプリケーションでは、非常に純度の高い基準信号が必要とされるが、基準周波数を発生する場所と利用する側のアンテナなどの場所が一致していることは少ない。高純度に周波数を伝送するには、伝送媒体として光ファイバを使用することが有利である。広帯域であること、アンプを使用しなくても信号を長距離伝送でき

ること、そして誘導などの環境が悪い場所へも設置できることなどが、光ファイバの有利な点である。

光ファイバを使用した受動型システムでは、遅延変動を低減するために、温度係数が $1/10$ 程度のファイバを使用することもできる。この場合、 1km 程度の伝送なら、平均時間 1000s で 10^{-16} 台の周波数伝送が可能である⁽¹⁸⁾。

通常の光ファイバを使用しても、能動型システムの構成であれば、 10^{-17} 台の周波数伝送も可能である。文献(19)では、遅延変動補正精度を上げるために、往復の伝送路を1本の光ファイバで構成している。光ファイバを共有するために、波長多重(Wavelength Division Multiplex:WDM)技術が使用されている。

3. 3 通信システムによる時刻同期

時刻をネットワークを介して伝送することは、いろいろなシステムで行われている。NTTの117の時報サービス、電話回線による標準時刻分配(テレホンJJY)⁽²⁰⁾、インターネットに接続されるコンピュータ間でやり取りされるNTP(Network Time Protocol)⁽²¹⁾などが、もっとも利用されている時刻伝送方法である。

これらは、いわばネットワークの表側で送られている時刻情報である。これに対して、ネットワークのバックグラウンドで基準時刻を送る方法がある⁽²²⁾。現在の伝送システムで主流であるSDH系システムを使用する伝送方式である⁽²³⁾⁻⁽²⁶⁾。

SDHシステムの伝送速度系列(155Mb/s を基本として、その4倍、16倍、64倍の速度)は、標準化されている。SDHシステムの情報構造は、図7に示すように、一般の情報を伝送するPayloadと呼ばれる主信号領域の他に、Administrative Unit Pointer、Section Overhead (SOH)と呼ばれる情報がひとつのフレームに収められている。この構造がSDHシステムの特長のひとつである。SOHは、Payloadと呼ばれる主信号領域とは分離されているので、高速サービスに影響を与えずに、システムの同期、誤り監視、警報など保守・管理情報の転送に使用することができる。

このSOHを使用して、バックグラウンドで高速の通信サービスを行いながら、時刻を伝送することができる⁽²²⁾。SOHをどのように使用して時刻を伝送するかは、まだ標準化されていない。しかし、時刻の基準を示すタグと時刻情報そのものを、SOHの中のDCCとよばれる領域で伝送することは、SDHシステムの標準仕様に影響を与えない有望な方法のひとつである⁽²⁵⁾。

文献(23)-(26)では、図5(b)に示した能動型のシステム構成で、周波数・時刻伝送を行っている。双方向伝送路を用いるシステムでは、伝送遅延が補正されると

図7 SDHシステムの情報構造

同時に伝送遅延変動も補正される。このとき、実は信号のパルス間隔として、周波数も正確に伝送されている。 155Mb/s の速度で、ナノ秒オーダの時刻伝送と 10^{-13} から 10^{-15} の精度の周波数伝送が期待できる。これらの周波数・時刻伝送能力は、SDHシステムの構成に依存し、とくに位相-時間安定度は伝送速度に大きく左右される。文献(26)では、 2.5Gb/s の伝送速度が使用され、その安定度は数 10ps に達している。

時刻の誤差は、双方向伝送路の上りと下り回線の伝送遅延差に依存する。伝送システム内のアンバランスや、光ファイバケーブル長の差が、時刻の誤差を発生する。数 10km 以下の短距離であれば 1ns 程度の時刻精度が得られるが、数 1000km におよぶ伝送では、 100ns 程度の誤差が発生することが予想される。光ファイバケーブル長の差による誤差を低減するために、WDM技術を使用する方式が提案されており、時刻誤差として数 10ps が実現されている⁽²⁴⁾。

4. 最後 に

衛星を利用しても、光ファイバを利用しても時刻比較能力は、その分解能においてはナノ秒からピコ秒の領域に入ってきている。現在得られている周波数・時間標準の周波数確度 10^{-15} 台を1日以内で比較することは、十分に可能である。計量標準の分野での利用を考慮すれば、さらに短時間での周波数比較能力が要求される。

時刻誤差に関しては、数 10ps という値も少しずつ報告されているが、さらなる特性向上や長期安定度の確保には、システムを構成するハードウェアの遅延パルスや温度安定度などが問題となるであろう。

周波数・時間標準は、近年その特性向上の速度が低下したものの、依然として10年で1桁程度の改善が行われている。学術的な分野への貢献という意味では、周波数・時間標準は、計量標準としての役割を十分に果たしている。一方、計量標準自身は、産業界で利用される、という役割も担っている。この点に関しては、現在の産業界は先をゆく周波数・時間標準に追いつい

ておらず、10年以上前の状態に留まっている。通信網における周波数精度の要求は 10^{-11} のままであり、周波数・時間標準とは4桁の隔たりがある。この差は当分縮まりそうにない。一般的な時刻の利用についても、ミリ秒程度の要求が多く、ナノ、ピコなどの世界に進むことはかなり難しい。しかし現在インターネット上に展開されている各種のサービスやこれから出てくるであろう新しいアプリケーションは、高精度な周波数や時刻を前提とすることで、その特性/品質の向上やさらに新しいアプリケーションを生む可能性がある。たとえば、高品質な画像伝送や電子商取引に関連する認証などのアプリケーションでは、確実に周波数や時刻に対する要求が厳しくなるであろう。高品質な周波数・時間標準を、各国の時間・周波数標準関連研究機関の中に閉じられたものではなく、一般利用者が簡単に利用できるようにすることは、この分野における今後の研究テーマのひとつである。

(平成 11 年 5 月 18 日受付)

文 献

- (1) S. Ghezali, Ph. Laurent, E. Simon, et. al.: "The accuracy evaluation of the LPTF cesium fountain frequency standard at 10^{-15} level and future prospects," Proc. 12th EFTF, p.54, 1998.
- (2) B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, and J. Collins: "GPS," Springer-Verlag Wien New York, 3rd Ed., 1994.
- (3) D. W. Allan: "Accurate time and frequency transfer during common-view of a GPS satellite," Proc. 34th FCS, pp.334-346, 1980.
- (4) W. Levandowski and C. Thomas: "GPS time transfer," Proc. IEEE Special Issue on Time, vol. 79, pp.991-1000, 1991.
- (5) J. Ray and C. Thomas: "The IGS/BIPM pilot project to study accurate time and frequency comparisons using GPS phase and code measurements," Proc. 30th PTTI, 1999 (in press).
- (6) J. Zumberge, D. Jefferson, D. Stowers, R. Tjoelker, L. Young: "Precise clock solutions using carrier phase from GPS receivers in the international GPS service," Proc. 30th PTTI, 1999 (in press).
- (7) R. Beard, J. Brad, J. White, and O. Oaks: "Calibration considerations for IGS/BIPM pilot time transfer project using carrier phase," Proc. 30th PTTI, 1999 (in press).
- (8) G. Petit, C. Thomas, and Z. Jiang: "Accurate frequency and time comparisons using GPS carrier phase: recent results," Proc. 30th PTTI, 1999 (in press).
- (9) R. Easton, L. Fisher, W. Hanson, H. Hellwig, and L. Rieger: "Dissemination of time and frequency by satellite," Proc. Of IEEE, vol. 64, no. 10, p.1482, 1976.
- (10) Y. Saburi: "Observed time discontinuity of clock synchronization in rotating frame of the earth," Journal of RRL, vol. 23, no. 112, pp.255-265, 1976.
- (11) D. Kirchner, H. Ressler, P. Hetzel, A. Soering, and W. Lewandowski: "Calibration of three European TWSTFT stations using a portable station and comparison of TWSTFT and GPS common-view measurement result," Proc. 30th PTTI, 1999 (in press).
- (12) J. Azoubib, W. Lewandowski, D. Kirchner, P. Hetzel, W. Klepczynski, D. Matsakis, T. Parker, H. Ressler, A. Soering, G. De Jong, F. Baumont, and J. Davis: "Two-way satellite time transfer using INTELSAT 706 on a regular basis: status and evaluation," Proc. 30th PTTI, 1999 (in press).

- (13) M. Imae, M. Hosokawa, K. Imamura, H. Yukawa, Y. Shibuya, P. Fisk, S. Quigg, M. Lawn, J. Thorn, M. Wouters, C. Coles, L. Zhigang, K. Nadadan: "Two-way satellite time transfer activities in the Asian-Pacific region," Proc. 30th PTTI, 1999 (in press).
- (14) ITU-T Recommendation: "Architecture of transport networks based on the synchronous digital hierarchy (SDH)," G.803
- (15) ITU-T Recommendation: "Timing characteristics of primary reference clocks," G.811
- (16) ITU-T Recommendation: "Timing requirements of slave clocks suitable for use as node clocks in synchronization networks," G.812
- (17) ITU-T Recommendation: "Timing characteristics of SDH equipment slave clocks (SEC)," G.813
- (18) M. Calhoun and P. Kuhnle: "Ultrastable reference frequency distribution utilizing a fiber optic link," 24th PTTI Meeting, pp.357-363, 1992
- (19) D. Johnson, M. Calhoun, R. Sydnor and G. Lutes: "A wide-band fiber optic frequency distribution system employing thermally controlled phase compensation," 24th PTTI Meeting, pp.365-374, 1992
- (20) 森谷中宣、赤塚正、佐藤得男、相田政則: "公衆通信回線による標準時供給システム," 日本時計学会誌, no. 142, pp.1-16, 1992
- (21) D. L. Mills: "Internet time synchronization: the network time protocol," IEEE Trans. Comm., vol.39, no.10, pp.1482-1493, 1991
- (22) 木原: "SDHシステムを用いた周波数/時刻伝送," 信学誌, vol.80, no.9, pp.992-995, 1997
- (23) S.R. Jefferts, M.A. Weiss, J. Levine, S. Dilla and T.E. Parker: "Two-way time transfer through SDH and SONET systems," 11th EFTF, pp.461-464, 1996
- (24) T.P. Celano, S.R. Stein and G.A. Gifford, E.A. Swanson, B.R. Hemenway and J.C. Carney: "Results from proof-of-concept time-based communications testing," 29th PTTI Meeting, pp.423-433, 1997
- (25) Y. Serizawa, K. Kitamura, M. Myoujin, T. Matsushima, O. Masui and R. Takada: "Additive time synchronous system in existing SDH networks," 12th EFTF, pp.263-268, 1998
- (26) M. Kihara, A. Imaoka, M. Imae and K. Imamura: "Two-way time transfer through 2.4Gbit/s optical SDH system," 29th PTTI Meeting, pp.415-422, 1997

今江 理人 (正員)

昭49横浜国大・工・電気卒。昭51東京工大修士課程了。昭51郵政省電波研究所(現通信総合研究所)入所。同所にて周波数標準・時系、特に精密時刻比較に関する研究に従事。現在、同所標準計測部周波数標準課長。

木原 雅巳 (正員)

昭51日大・理工・電気卒。同年日本電信電話公社(現NTT)入社。以来、高安定発振器、同期品質、網同期システムの研究に従事。現在、未来ねっと研究所主幹研究員。工博。