

4-2 GPSコモンビュー法

4-2 GPS Common View

後藤忠広 金子明弘 澁谷靖久 今江理人

GOTOH Tadahiro, KANEKO Akihiro, SIBUYA Yasuhisa, and IMAE Michito

要旨

GPS Common Viewは、1980年代にその方式が提唱されて以来、ここ20年間、国際間の時刻比較方式の主流を占めてきた。C/Aコードを使用したシングルチャンネル受信機による時刻比較精度は、1日平均で 10^{-14} 台の比較精度を達成することができる。しかし、原子時計の性能が進歩するに従い、より高精度な時刻比較方式の開発が望まれている。

本稿では、GPS Common Viewの基本的な原理、解析方法と誤差要因について述べるとともに、マルチチャンネル計測、軌道精度、電離層補正、搬送波位相の利用などによる精度改善について解説する。特にマルチチャンネル計測や実測値による電離層補正については、当所で最近得られた実測データを用いた検証結果を示す。

GPS common-view method was developed in the 1980s and it had been a world leading time transfer technology in the recent two decades. According to this method, daily averaged time comparison precisions obtained from the C/A code single channel receivers could reach 10^{-14} approximately. However, to meet the advancement of atomic clocks, we attempt to develop new methods for highly precise time comparison technology.

This paper describes a fundamental theory of the GPS common-view method, data analysis and error sources as well as to express the improvements of the time transfer precision using multi-channel receivers, the improvements of satellite orbit, of the ionosphere model, and carrier phase observations. Especially, we show the evaluation results of multi-channel receivers and the ionosphere model improvements of recently observed data.

[キーワード]

GPS, 国際原子時, 時刻比較

GPS, International atomic time, Time transfer

1 はじめに

国際度量衡局 (BIPM: Bureau International des Poids et Mesures) によって決められる国際原子時 (TAI: International Atomic Time) [1] は、世界50機関以上の保有する、200台以上の原子時計のデータを基にして計算される。各国の保持する原子時計のデータ収集のために、国際的な時刻比較ネットワークが構築されている。GPSが使用される以前は、国際的な時刻比較にはLORAN-Cが使用されていた[2]。LORAN-Cの比較精度は数100ns程度であり、比較可能な地域も限られていた。GPSの利用は、比較精度を格段

に向上させるとともに、LORAN-Cでは不可能だった全世界規模での時刻比較ネットワークを構築することを可能とした。

GPSの時刻比較精度は1日平均2ns、周波数安定度にして 3×10^{-14} 程度であり、平均化時間を長くすることで、現在のTAIの決定精度を維持している。しかし、TAIの安定度は、原子時計の進歩に合わせ、およそ7年で1桁ずつ改善されており、既存の方式では、数年後にはTAIの決定精度は原子時計の安定度ではなく、リンク精度によって制限を受けることになると思われる。

比較精度改善のためには、世界中で様々な方式が開発、研究されている。通信衛星を使用し

た衛星双方向時刻比較方式は、容易に高精度な時刻比較を行うことが可能であり、アジア地域では主な国は衛星双方向に移行している[3]。GPSを利用した時刻比較でも、マルチチャンネル受信機の開発、GPSとGLONASSの2種類の衛星が受信可能な時刻比較受信機の開発、測地用受信機の時刻比較への活用などにより、比較精度改善が図られている。

2 GPS時刻比較

2.1 GPS

GPSは米国防総省主導で開発された全世界測位衛星システムで、NAVSTAR/GPS (Navigation System with Time and Ranging/Global Positioning System) の略称である[4]。GPSは4個以上の衛星からの信号を同時に受けることで、地球上の極域を除いたあらゆる場所で実時間測位を可能にするために開発された。

GPS衛星には、セシウム又はルビジウム原子時計[5]が搭載され、すべての周波数と時刻の元となっている。GPS衛星はこの原子時計を使用して10.23MHzの基準周波数を作り、更にこれを154倍(1575.42MHz)及び120倍(1227.60MHz)した二つの搬送波周波数を作る。この搬送波周波数はそれぞれ L_1, L_2 と呼ばれる。これら二つの搬送波に、測距信号となる擬似乱数符合(Pseudo Random Noise: PRN)と、軌道情報などの航法メッセージを乗せて電波信号を送信する。搬送波として2波を使うのは電離層遅延を補正するためであり、3.2.3で詳細に述べる。

搬送波に重畳されている測距信号には、チップレートが1.023MbpsのC/A (clear and acquisition) コードと、10.23MbpsのP (precise) コードがあり、C/Aコードは L_1 のみに、Pコードは L_1, L_2 の両方に乗っている。Pコードは2波両方に乗っていることから、搬送波にならってそれぞれ P_1, P_2 と呼ばれる。C/Aコードは符合列が公開されており、一般の利用者が使用できる。Pコードは本来軍用であったが、最近では測地用受信機のほとんどがPコードを解読できる。

各信号の観測精度については、受信機の性能に依存するが、一般的には対応する波長の1/100が内部精度の目安であることから、C/Aコード

で3m (10ns)、Pコードで30cm (1ns)、 L_1 で2mm (7ps)程度となる。

2.2 GPS Common View

GPS Common View[6]は1980年代初期に当時のNBS (National Bureau of Standards、現在のNIST: National Institute of Standards and Technology) のD.W.Allanにより提案された方式である。GPS Common Viewの原理を図1に示す。

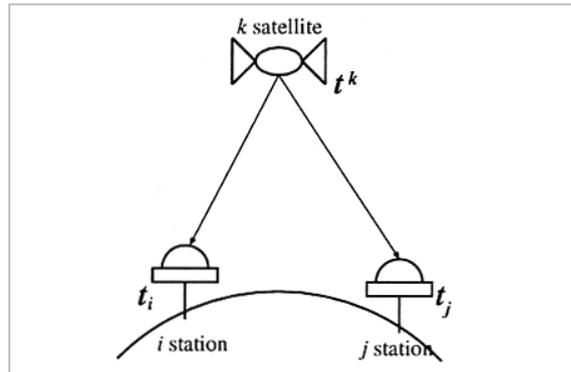


図1 GPS Common View

時刻比較を行おうとする局 i, j は、GPS衛星 k からの時刻信号 (t^k)を同時に受ける。各局の受信時刻をそれぞれ t_i, t_j とすると、伝搬遅延補正後の局 i, j と衛星 k の時刻差は、

$$\delta t_i^k = t_i - t^k \quad (1)$$

$$\delta t_j^k = t_j - t^k \quad (2)$$

となり、式(1)と式(2)の差をとることで、GPS信号を仲介とする時刻比較が行える。

$$\begin{aligned} \delta t_{ij} &= (t_i - t^k) - (t_j - t^k) \\ &= t_i - t_j \end{aligned} \quad (3)$$

このように、GPS Common Viewは、時刻比較を行う局間で、同時に同一の衛星からの信号を受信することにより、衛星の時計の誤差を相殺し、高精度な時刻比較を行うものである。

GPS時刻比較を行う場合、アンテナ位置は測量などの手段であらかじめ求めておき、比較時には既知として扱うことから、ある瞬間に1個の衛星が受かれば時刻比較が成立する。当時NBSでは、Common Viewの提案を行うとともに、時刻比較用の受信機的设计も行った。このような受信機はNBSタイプ受信機と呼ばれ、その後、

数社によって市販化されている。現在、国際時刻比較ネットワークで最も多く使用されているのは、このNBSタイプと呼ばれる、ある瞬間に1個の衛星が受信可能な受信機(シングルチャンネル受信機)である。

式(1)はCommon Viewの原理を分かりやすくするために簡易化したものであるが、実際に伝搬遅延などの影響を考慮すると、ある時刻 t における観測量 δt_i^k は式(4)のように表される。

$$\begin{aligned} \delta t_i^k(t) = & \frac{\rho_i^k(t, t - \delta t_i^k)}{c} + I_i^k + T_i^k + dm_i^k \\ & + [dt_i(t) - dt^k(t - \delta t_i^k)] \\ & + [d_i(t) + d^k(t - \delta t_i^k)] + e_i^k \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 ρ_i^k は衛星と受信機間の幾何学距離、 I_i^k は電離層による遅延、 T_i^k は対流圏による遅延、 dm_i^k はマルチパスによる誤差、 dt_i, dt^k は受信機及び衛星の時計誤差、 d_i, d^k は受信機及び衛星機器の内部遅延、 e_i^k はモデル及び観測誤差、 c は光速を表す。GPS Common Viewの精度は、受信機の観測精度のほかに、補正を行うためのモデル誤差にも依存する。これらモデル誤差の影響については3.2で述べる。

2.3 国際時刻比較ネットワーク

一般的なGPS時刻比較受信機はシングルチャンネルでC/Aコードのみ受信可能である。このため、GPS Common Viewによる国際的な時刻比較ネットワークを組むためには、各局が決められたスケジュールに従って衛星を受信する必要がある。この国際時刻比較ネットワーク用スケジュールとしてBIPMでは、シングルチャンネル受信機のためのGPS Common Viewスケジュールを作成し、ネットワーク参加機関に電子メールにて配信している。このスケジュールは、BIPMが決めた原期から、1恒星日(23時間56分)内に16分間ずつ区切って受信する衛星を89個配置したものである。この関係から、最後の12分間は観測が行われない。なお、スケジュールは6か月に一度更新される。

各機関のデータを効率的に処理するためには、データ形式が一意に決まっている必要がある。GPS Common Viewのためのデータ形式は、CGGTTS(Common GPS/GLONASS Time

Transfer Standard) data formatと呼ばれ文献[7][8]で定義されている。データ交換を目的としたCGGTTSは、ファイル容量を減らすために毎秒の受信データに対して13分間の平均化処理を施す。平均化の方法は、毎秒受信した15秒間隔のデータに2次曲線を当てはめ推定値を求める。13分間の観測時間内の求めた推定値52個に対して以下の補正を行う。

- (1) 航法メッセージを使用した衛星とアンテナ間の幾何学遅延
- (2) 航法メッセージを使用した電離層遅延
- (3) モデルによる対流圏遅延
- (4) 相対論補正 (Sagnac, periodic relativistic)
- (5) 航法メッセージを使用したL1-L2バイアス
- (6) アンテナ及び基準信号のケーブル遅延

補正後のデータに直線近似を行い、観測時間内の midpoint のデータを、その観測の推定値として採用する。各補正項の詳細は3.2で述べるが、相対論補正に関しては、一般的な解説は文献[9]に、GPSの相対論効果については文献[10]に詳しいのでそちらを参照されたい。

CGGTTSファイルの形式はASCIIファイルで、ヘッダー及びデータレコードから成る。ヘッダーには、受信機の名称、アンテナの位置、ケーブル遅延、基準信号の名前などが含まれる。データレコードは、1行が推定した1個のデータに対応している。データレコードの内容を表1に示す。

時刻比較ネットワーク参加局は、MJDの末尾が4又は9の日までの5日間のデータをCGGTTSファイルにまとめ、BIPMへ電子メール又はFTPにて送付する。BIPMでは、各局から届いたデータを使用してTAI計算のためのリンクを確立する。

3 比較精度改善のための研究開発

シングルチャンネルのC/Aコードを使用したGPS Common View方式は、最近の国際時刻比較ネットワークでは精度が足りなくなっている。そこで、世界各国の標準保持機関において、より高精度な時刻比較を行うための研究開発が行われている。

3.1 マルチチャンネル受信機の使用

表1 CGGTTS形式のデータレコードの内容^[20]

Category	Explanation
PRN	the satellite vehicle PRN number
CL	the Common View class of the track
MJD	Modified Julian Date of the start of the track
STTIME	hour, minute, and second (in UTC) of the start of the track
TRKL	the track length in seconds
ELV	the elevation of the satellite at the midpoint of the track
AZTH	the azimuth of the satellite at the midpoint of the track
REFSV	the time difference(.1ns) between the laboratory reference clock and satellite time, referred to the midpoint of the pass via a linear fit
SRSV	the slope determined via the linear fit to produce REFSV(.1ps/s)
REFGPS	the time difference(.1ns) between the laboratory reference clock and GPS system time, referred to the midpoint of the pass via a linear fit
SRGPS	the slope determined via the linear fit to produce REFGPS(.1ps/s)
DSG	the root mean square of the residuals of the linear fit used to produce REFGPS
IOE	the index of ephemeris
MDTR	the modeled tropospheric delay(.1n) referred to the midpoint of the pass via a linear fit
SMDT	the slope determined via the linear fit to produce MDTR(.1ps/s)
MDIO	the modeled ionospheric delay(.1ns) referred to the midpoint of the pass via a linear fit
SMDI	the slope determined via the linear fit to produce MDIO(.1ps/s)
MSIO	the measured ionospheric delay(.1ns) referred to the midpoint of the pass via a linear fit
SMSI	the slope determined via the linear fit to produce MSIO(.1ps/s)
ISG	the root mean square of the residuals of the linear fit used to produce MSIO
CK	the data line check sum in hexadecimal format

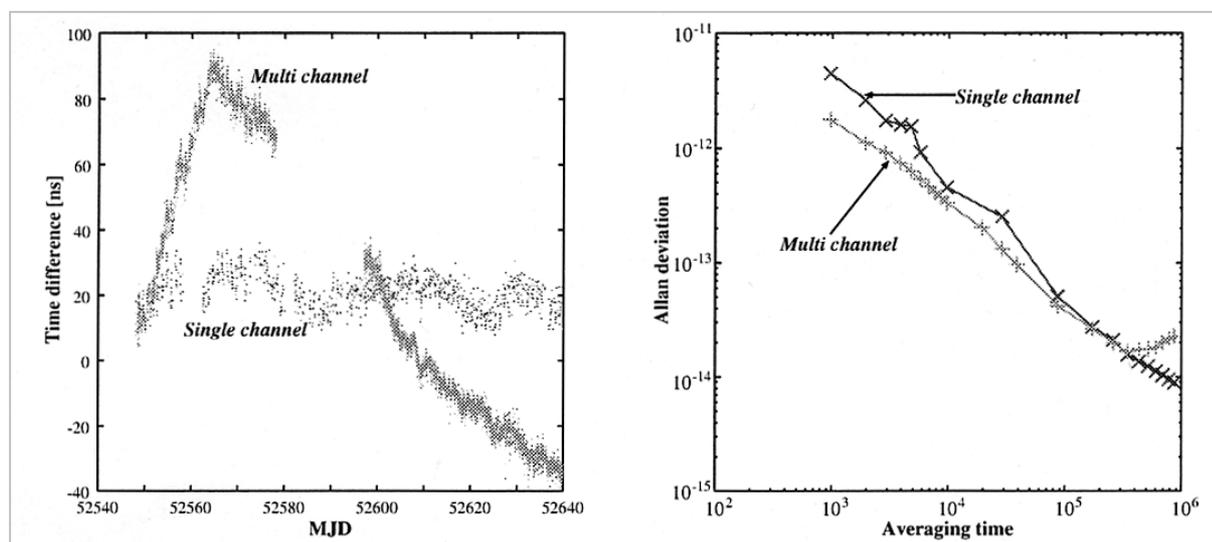


図2 シングルチャンネル受信機とマルチチャンネル受信機の比較。左：時系列、右：安定度

一般的な時刻比較受信機はシングルチャンネル受信機であるが、これをマルチチャンネル受信機にすることで、一度に受信する衛星数を増やすことができる。理論的には受信可能な衛星数がシングルチャンネルに対して n 倍であるとすれば、時刻比較精度は $n^{1/2}$ 倍改善されることとなる。

図2に当所とドイツ物理技術研究所(PTB: Physikalisch-Technische Bundesanstalt)のシングルチャンネル及びマルチチャンネル受信機の比較結果を示す。左図が時刻比較結果を時系列に表した図で、右図が安定度を表した図である。使用したデータは、シングルチャンネルについては国際時刻比較ネットワークに使用されている時刻比較受信機のデータ、マルチチャンネル受信機については、測地用受信機(ASHTeCH Z-XII3T)の出力をCGGTTS形式に変更したデータを使用している。比較期間は2002年10月1日～12月31日までの3か月間である。CRLは、時刻比較受信機、ASHTeCHとも基準信号としてUTC(CRL)を使用しているが、PTBは時刻比較受信機はUTC(PTB)だが、ASHTeCHには水素メーザーの信号が使用されているため、時系列データの振舞が異なっている。

時系列データでは、シングルチャンネル受信機、マルチチャンネル受信機に大きな差がないが、安定度を見ると一万秒以下の平均化時間ではマルチチャンネル受信機が明らかに良くなっている。比較した期間におけるCommon Viewの衛星数は、時刻比較受信機が1日平均13衛星、ASHTeCHが同97衛星と観測数でほぼ7.5倍になっているので、2.7倍の精度が得られるはずである。実際のデータは、平均化時間16分間で、時刻比較受信機が 4.5×10^{-12} 、ASHTeCHが 1.8×10^{-12} と2.5倍となっており、理論値とほぼ同じ精度改善が図られている。なお、安定度のグラフにおいて、精度改善の効果は本来時計の安定度が表れるまで持続するはずだが、今回のグラフでは平均化時間が長くなるに従い差が小さくなっている。これは、MJD52565付近に見られるような周波数調整の影響からマルチチャンネル受信機の安定度が $1/\tau$ で改善されていないためと思われる。

3.2 伝搬遅延モデルの改良

GPS受信機は、式(4)で表される観測量に対し

て、**2.3**で述べたように、伝搬遅延の補正をリアルタイムで行い、その結果をCGGTTS形式で出力する。このため、伝搬遅延の計算に使用するモデルは、リアルタイムで取得可能な航法メッセージを使用して行うこととなる。航法メッセージを使用して補正する遅延は、式(4)中の衛星軌道、電離層遅延及び衛星の時計誤差である。ただし、Common Viewを行った場合、衛星の時計誤差は相殺されるので、実際に比較精度に影響するのは軌道と電離層の二つの項である。

3.2.1 精密暦を使用した軌道補正

航法メッセージから取得可能な軌道要素は放送暦と呼ばれ[11]、WGS-84座標系上での修正ケプリアンの形式で配信される。決定精度は2m～5m程度である。一方、国際GPS事業(IGS: International GPS Service)[12]では、衛星軌道の精密暦をインターネット上で公開している。これは、IGSに参加している7か所の解析センターが、世界中に存在する約400か所の観測点から得られたデータを基に解いた軌道を結合したもので、予測暦、速報暦、最終暦の3種類があり、最終暦においては5cm以内の軌道決定精度を持つ。ただし、最終暦が公開されるまでには約2週間かかる。

軌道の誤差と時刻比較の精度の関係は、比較する局の基線長に依存する。短基線の場合、比較する局から見て衛星は同一の視線方向に見える可能性が高くなるので、軌道誤差はほとんど影響しない。しかし、基線長が長くなるに従い、衛星の視線方向が違ってくるため軌道誤差の影響を無視できなくなる。文献[6]によると、軌道の誤差が比較精度に与える影響は、軌道誤差の最大 $\sqrt{2}$ 倍となっている。

3.2.2 電離層電子分布データによる補正

電波が電離層を通過する場合、屈折率を感じるため伝搬速度が変化し遅延が発生する。電離層による遅延は、伝搬経路上の全電子数(Total Electron Content:TEC)に比例し、周波数の2乗に反比例することが知られている。ある高度におけるTECの値が分かると、衛星の位置と受信局の位置より鉛直方向の遅延時間を求め、それに仰角に依存したMapping Functionを適用する

ことで電離層遅延量を求めることができる。

航法メッセージから送られてくる電離層補正パラメータは、TECの値ではなくJ.A.Klobucharにより考案された電離層遅延補正モデル[13]に若干修正を加えたものである。これはGPS採用電離層モデルと呼ばれ、ある地点の鉛直方向の遅延を四つの振幅成分と四つの周期成分から求めるもので、電離層遅延の50%程度を補正できるとされている。

一方、IGSの解析センターの一つであるCenter for Orbit Determination in Europe (CODE)では、IGSの観測データを使用して全地球的な電離層電子分布データ (GIM: Global Ionosphere Map) を推定している。推定後のデータはIONEX[14]形式のファイルとしてインターネット上で公開される。IONEXファイルには、時間分解能が2時間おきで、地球上を緯度方向に2.5度、経度方向に5度ずつ区切った高度400kmのTECの値が収まっている。GIMの精度については、2GHzと8GHzによる高精度なVLBIの測定によるTEC量とが、誤差のRMSで約0.7TECU (10^{16} electrons/m²)の精度で一致しており、観測に寄与するTEC量を10%以下の誤差で推定できるとの報告がある[15]。

C/AコードによるGPS時刻比較では、軌道誤差よりも電離層の影響の方が大きいと考えられ、BIPMではGIMを使用した補正はすべての観測局に対して行っているが、精密暦を使用した補

正は、大陸間をまたいだ長基線の比較のみで使用されている[16]。

3.2.3 実測値による電離層遅延補正

2周波対応受信機を使用した場合は、電離層遅延量の周波数分散性を利用して電離層遅延量を相殺することができる。式(4)を元に、衛星 k を仲介とした局(i, j)の観測量の差を考えると、式(5)、(6)と表すことができる。

$$P_{1,ij}^k = \frac{\rho_{ij}^k}{c} + \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} I_{ij}^k + T_{ij}^k + dt_{ij} + e_{1,ij}^k \quad (5)$$

$$P_{2,ij}^k = \frac{\rho_{ij}^k}{c} + \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} I_{ij}^k + T_{ij}^k + dt_{ij} + e_{2,ij}^k \quad (6)$$

ここで、 P_1 は L_1 上の擬似測距値、 P_2 は L_2 上の擬似測距値を表す。式(5)、(6)から、式(7)のような線形結合をとることで、電離層遅延量を相殺した観測量を作ることができる[17]。

$$P_{3,ij}^k = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} P_{1,ij}^k - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} P_{2,ij}^k \quad (7)$$

$f_1=150$ 、 $f_2=120$ を式(7)の係数に入れると、 P_1 は約2.8倍、 P_2 は約1.8倍され、その分だけ e_1 、 e_2 も拡大されるので、 $e_1=e_2$ と仮定すると、 P_3 は P_1 、 P_2 に比べ誤差もおよそ3倍となる。BIPMでは、国際時刻比較ネットワークへの P_3 の利用を検討しており、2002年4月より試験的な運用を開始し

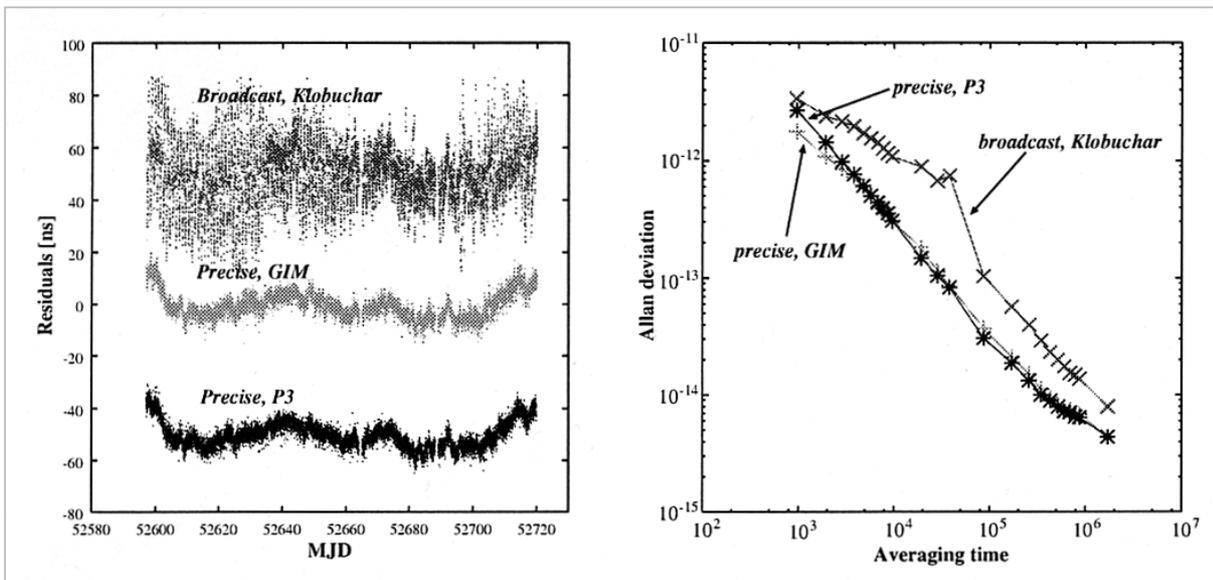


図3 補正方法の違いによる比較。左：残差、右：安定度

ている。

図3に、航法メッセージによる補正、精密暦及びGIMによる補正、精密暦及び P_3 による補正の3種類の時刻比較残差と安定度の結果を示す。使用した受信機は、CRLとPTBのASHTech Z-XII3Tである。比較期間は2002年11月19日から2003年3月21日までの約4か月間である。残差の図は、CRLとPTBの時刻比較結果に直線近似を行った後の残差を示す。なお、図を見やすくするため、航法メッセージによる補正には50ns、精密暦と P_3 による補正には-50nsのオフセットをつけてある。

モデルからの推定値を使うGIMと、実測値を用いる P_3 では、後者の方が良い結果が期待できる。しかし、CRLとPTBの結果からはGIMと P_3 による明確な違いは見られなかった。1000秒当たりでは P_3 の方がGIMより悪くなっている。これは、式(7)の線形結合により誤差が増幅されている影響だと考えられる。長期においても、 P_3 とGIMが目立った違いが現れないのは、GIMの推定精度がよいのと、比較した2局が中緯度の局であり、電離層の変化が少ないためだと考えられる。現時点では、赤道付近などのより電離層が活発な区域におけるTAI P_3 linkへの参加局がないため P_3 の有効性を明確にすることができないが、今後TAI P_3 linkへの参加局が増えることで、GIMとの違いを実証できると考えられる。

3.3 搬送波位相を用いた時刻比較

GPSから送信される測距信号の代わりに搬送波を使用して時刻比較を行った場合、10ps以下の観測精度が得られることは既に述べた。式(4)を搬送波を観測量とした式に書き直すと、式(8)となる。

$$\begin{aligned} \Delta t_i^k(t) = & \frac{\rho_i^k(t, t - \Delta t_i^k)}{c} - I_i^k + T_i^k + \delta m_i^k \\ & + [dt_i(t) - dt^k(t - \Delta t_i^k)] \\ & + [\delta_i(t) + \delta^k(t - \Delta t_i^k)] \\ & + \frac{\phi_i(t_0) - \phi^k(t_0)}{f} + \frac{N_i^k}{f} + \varepsilon_i^k \end{aligned} \quad (8)$$

ここで、 Δt_i^k は搬送波観測量で、コード観測量 δt_i^k と区別するため、大文字の Δ を使用した。 δ_i, δ^k は受信機及び衛星の機器内遅延、 $\phi_i(t_0), \phi^k(t_0)$ は受信機及び衛星の初期位相、 N_i^k は波数不確定、

ε_i^k はモデル及び観測誤差を表す。搬送波の場合、電離層の遅延が位相遅延となることから I の符号は逆となる。また、観測誤差はC/Aコードと比較すると1,000倍程度改善される。このように、搬送波を用いた時刻比較は、波数不確定の項を除きコードと同一に扱えることから、高精度なコード観測量とみなすことができる。

N_i^k は波長単位の整数を表すことから、式(8)の波数以外の項を、搬送波の波長以内の精度で決定できれば波数を確定することができる。実際には、衛星及び受信機の機器内遅延、時計誤差、初期位相を求めることが不可能なため、式(8)のままでは波数を確定することはできない。Common View方式では、衛星の機器内遅延、時計誤差、初期位相は除去できるが、受信機の対応する各項は残るため、やはり波数を確定することはできない。

測地解析では2台の受信機と2個の衛星の線形結合(Δt_{ij}^k)をとった二重位相差と呼ばれる観測量を使って波数を確定する。時刻比較を行う場合でも、二重位相差で波数を確定したあと、一重位相差(Common View)の波数を確定する作業が必要となる[18]。このように、搬送波位相の解析は、時刻比較より測地解析で蓄積された知識が要求されるためか、搬送波位相を用いた周波数比較は盛んに行われているが、時刻比較の報告例は少ないのが実状である。

当所では、軌道解析ソフトウェアCONCERTO [19]を用いて、GPS搬送波位相時刻比較を行うことを計画している。現バージョンのCONCERTOは、衛星レーザ測距のデータしか扱えない。そこで、GPSのデータ解析も行えるよう、新しいバージョンの開発が、大坪らによって行われている。新しいバージョンでは、GPSを使った低軌道衛星の軌道決定が目的であるが、最終的にはCommon Viewの解析も行えるよう計画中である。

4 おわりに

GPS Common Viewの基本的な原理と、CRLとPTBのデータを使用したGPS Common Viewの精度改善について検討した。ハードウェアの変更では、シングルチャンネル受信機をマルチチャンネル受信機に変更することで、精度改善

を行えることが実証されている。CRL-PTB間の結果からも分かるように、大陸間のCommon Viewでは、シングルチャンネル受信機では同時に見える衛星は1日10個程度しかないが、マルチチャンネル受信機では100個近くに増えるため、約3倍の精度改善を図ることが可能である。IGSの軌道要素及びCODEのGIMを使用した結果からは、比較したすべての平均化時間に対して、平均で約3倍の精度改善が図られている。2周波を使用した電離層の実測による補正では、今回の結果からは有効性は見られなかった。しかし、赤道付近の局に対しては、GIMの2時間間隔の補正では、電離層の短期的な変動を取り除けない可能性が高く、赤道付近の局の長基線の補正には、実測による補正が有効であると考えられる。

マルチチャンネル受信機の採用、2周波受信機による電離層補正、IGS精密暦の採用などにより、GPS Common Viewの精度は現状のTAIの決定精度をかるうじて満たしている。しかし、C/A

コードを使用した時刻比較では、これ以上の改善を図ることは難しく、搬送波位相を用いた時刻比較方式の早期確立が望まれるところである。一方、日本国内などの短中基線の時刻比較には、C/Aコードを使用した時刻比較でも十分な精度が確保できることや、システムがGPS受信機とアンテナのみで構成できることから、今後もその範囲の遠隔地の時刻比較にはGPS Common Viewは有効な方式である。

謝辞

本稿を執筆するに当たり、有益なコメントを頂いた当所無線通信部門サイバネティクスグループの大坪俊通氏に感謝します。また、解析のためのツール作成を支援していただいた、同久保岡俊宏氏、源波孝子氏、GPS全般について相談させていただいた電磁波計測部門宇宙電波応用グループの市川隆一氏に感謝します。

参考文献

- 1 C. Audoin, and B. Guinot, "The Measurement of TIME", Sec.7, Cambridge, 2001.
- 2 赤塚耕輔, "ロランCによる原子時の国際比較と公表業務", 電波研究所季報, 第29巻, 第149号, pp.201-211, 1983.
- 3 M. Imae, M. Hosokawa, K. Imamura, H. Yukawa, Y. Shibuya, N. Kurihara, P.T.H. Fisk, M.A. Lawn, L. Zhigang, L. Huanxin, Y. Nakadan, and K. Hagimoto, "Two-way Satellite Time and Frequency Transfer Network in Pacific Rim Region", IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, Vol.50, No.2, pp.559-562, 2001.
- 4 高野忠, 佐藤亨, 柏本昌美, 村田正秋, "宇宙における電波計測と電波航法", 4章, コロナ社, 2000.
- 5 T.B. McCaskill, O.J. Oaks, M. Largay, W.G. Reid, H.E. Warren, and J.A. Buisson, "Performance of Global Positioning System Block II/IIA/IIIR On-orbit Navstar Clocks", 31st PTTI Meeting, pp.75-89, 1991.
- 6 D.W. Allan and M.A. Weiss, "Accurate Time and Frequency Transfer During Common-View of a GPS Satellite", Proc. Frequency Control Symposium, pp.334-336, May. 1980.
- 7 D.W. Allan and C. Thomas, "Technical directives for standardization of GPS time receiver software", Metrologia, Vol.31, pp.69-79, 1994.
- 8 J. Azoubib and W. Lewandowsky, "CGGTTS GPS/GLONASS data format Version 02", 7th CGGTTS meeting, 1998.
- 9 細川瑞彦, "時間・周波数標準における相対論効果", 本特集.
- 10 Neil Ashby, "相対論とGPS(全球測位システム)", パリティ, Vol.18, No.06, pp.18-26, 2003.
- 11 Global Positioning System Standard Positioning Service Signal Specification, 2nd Edition, Jun. 1995.
- 12 International GPS Service, <http://igsceb.jpl.nasa.gov/>.

- 13 J. Klobuchar, "Design and characteristics of the GPS ionospheric time delay algorithm for single frequency users", Proc. Position Location and Navigation Symposium, 1986.
- 14 Schaer S., Gurtner W., and Feltens J., "IONEX: The IONsphere map EXchange Format Version 1", Proc. IGS AC Workshop, Feb. 1998.
- 15 関戸衛, 近藤哲朗, 川合栄治, 今江理人, "GPSによる電離層推定の精度評価", 信学技法, AP2000-161, SANE2000-142, pp.61-68, 2001.
- 16 W. Lewandowski and J. Azoubib, "Time Transfer and TAI", Proc. Frequency Control Symposium, pp.586-597, 2000.
- 17 P. Defraigne, G. Petit, and C. Bruynix, "Use of Geodetic Receivers for TAI", Proc. 33rd Annual PTTI, Nov. 2001.
- 18 R. Dach, G. Beutler, U. Hugentobler, S. Schaer, T. Schildknecht, T. Springer, G. Dudle, and L. Prost, "Time transfer using GPS carrier phase: error propagation and results", Journal of Geodesy, Vol.77, pp.1-14, 2003.
- 19 大坪俊通, 国森裕生, Bret Engelkemier, 高橋富士信, "SLR解析ソフトウェア CONCERTO における数値積分誤差の制御", 測地学会誌, 第40巻, 第4号, pp.347-355, 1994.
- 20 USNO GPS Time Transfer, <http://tycho.usno.navy.mil/ggts.html>.



ごとう だひろ
後藤忠広

電磁波計測部門時間周波数計測グループ
研究員
GPS時刻比較



かねこ てるひろ
金子明弘

電磁波計測部門タイムスタンププラットフォームグループ研究員
周波数標準



しみず ひさひろ
澁谷靖久

電磁波計測部門日本標準時グループ



いまえ りつと
今江理人

電磁波計測部門時間周波数計測グループリーダー
周波数標準