

## 4-8 時刻比較実験

### 4-8 Time Comparison Experiment

#### 4-8-1 高精度時刻比較実験用地球局

##### 4-8-1 Earth Station of Time Comparison Experiment

藤枝美穂 高橋靖宏 後藤忠広 中川史丸 今江理人  
FUJIEDA Miho, TAKAHASHI Yasuhiro, GOTOH Tadahiro, NAKAGAWA Fumimaru,  
and IMAE Michito

##### 要旨

CRLでは2004年度に打上げが予定されている技術試験衛星Ⅷ型(ETS-Ⅷ)に搭載される、高精度時刻比較を行うための装置(TCE: Time Comparison Equipment)の開発を行ってきた。その装置により地上の時計と衛星上の時計間での双方向時刻比較を行い、搭載原子時計の性能評価を行う予定である。現在はTCEの開発が終わり、地球局及びデータ解析プログラムの開発に着手している。地球局では時刻比較精度を高めるため、屋外部分の温度管理、ドップラー周波数の除去と補正、信号処理部の改良などを行う。

The Time Comparison Equipment (TCE) for ETS-Ⅷ has been developed to transfer time precisely between the ground reference clock, UTC (CRL) and the on-board atomic clock. We have finished the development of the TCE and have been under construction of the earth station as well as a data-analysis program. In order to upgrade the stability of the time transfer, temperature control of the outdoor unit, improvement of the code-phase resolution and so on are planned in the earth station.

##### [キーワード]

ETS-Ⅷ, 時刻比較, 衛星測位  
ETS-Ⅷ, Time transfer, Satellite Navigation

### 1 はじめに

GPS等を使用する衛星測位にとって、測位に用いる衛星の時計間に時刻のずれがあると位置決定精度に大きく影響する。このため複数の衛星と地上の間を高精度に時刻比較し、衛星間の時計のずれを把握することが必要となる。そのような衛星測位のための基盤となる技術として高精度時刻比較が求められている。当所では、衛星-地上間で高精度に時刻比較を行うことが可能な装置TCE<sup>[1]</sup>をETS-Ⅷに搭載し、衛星軌道上での原子時計の振る舞いを検証する予定である。TCEでは衛星と地球局の双方で信号を送受信することにより、時刻比較を行う。双方向時

刻比較では、電波の伝搬経路がアップリンクとダウンリンクでほぼ同じになることから、大気圏による伝搬遅延や衛星の運動の影響が相殺され、高精度での比較が可能である<sup>[2]</sup>。TCEではコード位相で数ns、搬送波位相を使用して100ps程度の精度で比較ができると考えられる。

現在はTCEの開発が終わり、地球局及びデータ解析プログラムの開発に着手している。本報告では開発中の地球局(TCE地球局)の概要を紹介する。

### 2 双方向時刻比較

TCE地球局では地上の時計を基準としてコー

ド位相、搬送波位相を測定し、衛星から送信された信号を受信した時間  $T_e$  を求める。TCE では搭載されたセシウム原子時計を基準として、受信時間  $T^s$  を求める。

それらの観測量は以下のように表すことができる。

$$T_e = \tau_g + dt_e - dt^s + d_{eTx}^s + d_{eRx} + I_d + T \quad (1)$$

$$T^s = \tau_g + dt^s - dt_e + d_{eTx} + d_{eRx}^s + I_u + T \quad (2)$$

ここで、 $\tau_g$  は地球局と衛星間の幾何学的遅延、 $dt_e$ 、 $dt^s$  は TCE 地球局及び衛星上の時計のずれである。 $T$  は対流圏による遅延、 $I_d$ 、 $I_u$  はダウンリンク、アップリンクにおける電離層による遅延を表す。 $d_{eTx}$ 、 $d_{eRx}$  は TCE 地球局の送信系、受信系の局内遅延、 $d_{eTx}^s$ 、 $d_{eRx}^s$  は TCE の送信系、受信系の局内遅延を表している。地上、衛星での観測量  $T_e$ 、 $T^s$  を差引きすることにより、衛星-地上間の時計の時刻差を求めることが可能となる。

$$T_e - T^s = 2(dt_e - dt^s) + (d_{eTx}^s - d_{eRx}^s) + (d_{eRx} - d_{eTx}) + (I_d - I_u) \quad (3)$$

式(3)から双方の観測量の差は、地上と衛星の時計のずれ、双方の送信系、受信系の局内遅延の差、アップリンク、ダウンリンクにおける電離層遅延の差の和で表されることが分かる。TCE、TCE地球局では、リアルタイムに局内遅延測定を行い補正する。電離層遅延量は周波数分散性があることから、TCE地球局でLバンド、Sバンドの2周波の電波を受信し、TEC (Total Electron Content) の推定をし補正を行う[3]。

### 3 測定原理

TCE地球局でのコード位相、搬送波位相の測定原理について簡単に説明する。TCE地球局で送受信する信号はGPS互換のC/A (Clear and Acquisition) コードを用いて拡散されたPSK (Phase Shift Keying) 変調信号である。コードクロックは1.023MHzである。衛星から送信される信号のコード番号が既知であるため、受信側ではそのコードに対して追尾を行う。受信信号のコードに同期をとるために、受信機内で発生したコードをどれだけずらしたかがコード位相である。搬送波位相についても同様である。TCE地球局では、基準信号とコヒーレントにコードと搬送波を発生させるため、衛星上の時計と地上の時計との時刻差が測定可能である。

データ処理部[4]では  $(+\frac{1}{2}, 0, -\frac{1}{2})$  チップ位相をずらしたコード、(Lead, Typical, Lag) を生成する。各々のコードについて、計測信号との相関積分の sin 成分、cos 成分を求める。搬送波位相はそれらの積分値を用いて、arc tangent を計算することで算出する。コード位相はコードレジスタのシフト量から求められる。

衛星から送信される信号の搬送波周波数はLバンド、Sバンドであるので、搬送波位相ではpsの分解能を持つ。しかし、信号の伝搬中に搬送波位相が何回転したかは求めることができないため、コード位相の測定結果を用いて推定する必要がある。

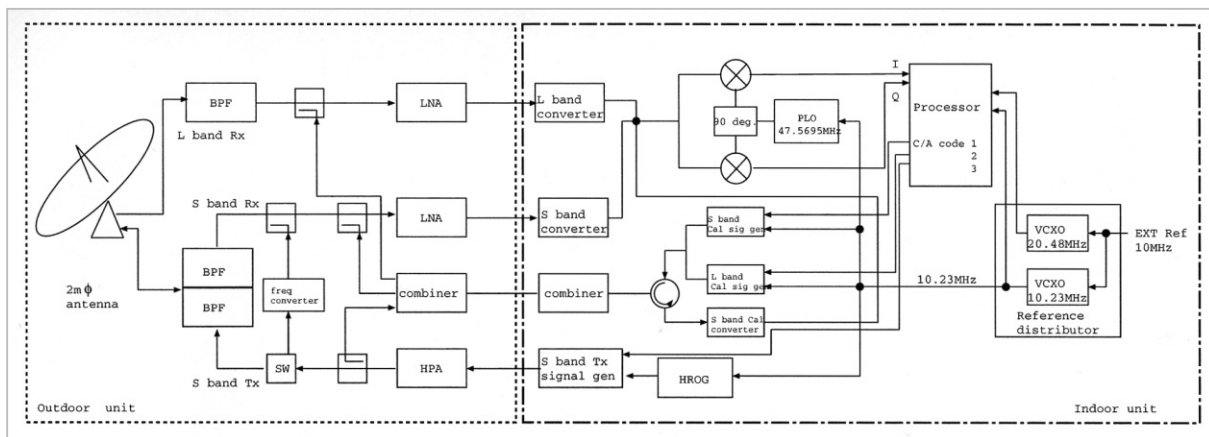


図1 TCE地球局ブロック図

## 4 TCE 地球局の概要

TCE 地球局は TCE の技術試験モデルを基に開発され、TCE とほぼ同じ構成と機能を持つ。TCE 地球局の主な機能は以下のとおりである。

- ・ ETS-Ⅷからの S バンド、L バンド信号を受信し、コード位相、搬送波位相を測定する。
- ・ ETS-Ⅷへ送信するための S バンド信号を生成する。
- ・ 受信信号の局内遅延を測定するための S バンド、L バンド信号を生成し、各々のコード位相、搬送波位相を測定する。
- ・ S バンド送信信号の局内遅延を測定するため、アンテナ直前で折り返し、コード位相、搬送波位相を測定する。

諸元を表 1 に、ブロック図を図 1 に、外観を図 2 に示す。

図 1 において、左側の点線で囲まれた部分が屋外部分を表している。TCE 地球局では基準信号 UTC (CRL) を用いて衛星と同じ 10.23MHz 信号を生成し、各モジュールのクロックとして使用する。受信系信号の経路を説明する。直径 2m のアンテナで受信された信号は LNA (Low Noise



図 2 TCE 地球局外観

表 1 TCE 地球局諸元

アンテナ	
アンテナ径 [m]	2.4
偏波	L バンド : 右旋円偏波 S バンド : 左旋円偏波
利得 [dBi]	受信 : 34.2 送信 : 34.2
送信機	
送信周波数 [MHz]	S バンド : 2656.390
送信機出力 [W]	18
EIRP[dBw]	43.8
受信機	
受信周波数 [MHz]	L バンド : 1596.880 S バンド : 2491.005
受信信号強度 [dBw]	-134
利得 [dB]	60
C/N <sub>0</sub> [dB·Hz]	67

Amplifier) で増幅され、converter に入力される。converter で IF 周波数、50.127MHz まで下げられた後、2.5575MHz へと更に周波数変換され、90 度位相の異なった I、Q 成分に分割され processor に入力される。そこで、C/A コードが復調され、コード位相と搬送波位相が測定される。送信信号は signal generator で搬送波が生成され、コードの重畳を受けた後、HPA (High Power Amplifier) で増幅されて送信される。受信系校正信号は局内遅延の測定のために combiner から LNA 入力の直前で受信系の信号経路に入力され、受信信号と同じ経路をたどる。送信系校正信号は HPA で増幅された後に分岐され、combiner に入り、復調される。送信系校正、L バンド受信系校正、S バンド受信系校正の 3 信号は校正信号共通の経路を通り、送信系信号、受信系信号の経路に挿入される。そのため、送信系校正信号と受信系校正信号の遅延時間を差し引くことで、送信系と受信系の局内遅延量の差を求めることが可能となっている。S バンド送信信号を HPA にて増幅後、スイッチで切り替え周波数変換し S バンド受信系信号経路に入力することによって、自局で折り返しを行うこともできる。この機能はシステムのテストのために使用される予定である。

TCE 地球局では可搬局の開発を予定している。

可搬局のアンテナ径は2.4mで固定局の径と同じであるが、可搬性を考慮し分割できる構造となっている。その他の機能は固定局と同等のものを持つ。固定局はCRL本所(東京都小金井市)に設置し、可搬局は原子時計のあるサイトに移動させて実験を行う予定である。TCE地球局を用いて地上の時計UTC(CRL)とETS-Ⅷ上の原子時計の時刻比較を行うと同時に、衛星を仲介とした地上時計UTC(CRL)と地上間の他の時計との双方向時刻比較実験を行うことを計画している[5]。

データ処理部では、同時に複数の信号を処理するために、IF周波数に変換した後の構成が共通化されている。チャンネルごとに異なるC/Aコードを割り振れば、八つまでの信号処理が可能である。通常のTCE地球局とETS-Ⅷ間の実験では、受信チャンネル2、送信チャンネル1、校正用チャンネル2の合計5チャンネルを使用する。残りの3チャンネルは可搬局を用いた地上-地上間の実験等に使用する予定である。

## 5 TCEからの改良点

双方向時刻比較はTCEで測定した信号の受信時間とTCE地球局で受信した信号の受信時間を差し引きして行う。したがって、TCE、TCE地球局双方の測定精度が時刻比較精度を決定する。TCEでは衛星搭載部品への制約があるためCPUのクロックが遅く信号処理能力などが制限されている。TCE地球局では制約がないので、可能な限り双方の測定精度を高めるために、幾つかの改良を行う。その内容を以下に示す。

### 5.1 屋外部分の温度制御

双方向時刻比較の式(3)から、局内遅延の測定誤差は時刻比較の精度を劣化させることが分かる。TCE地球局ではリアルタイムに局内遅延の測定を行うが、その変動をできるだけ少なくすることが望まれる。ケーブルやHPA、LNAなどの機器は周囲の温度によりその特性が変化することが知られている。psオーダーでの時刻比較精度を目指す場合、温度変化による遅延量の変動が大きなシステムエラーを招いてしまう[6]。そのため、TCE地球局ではアンテナ以外の屋外部分の機器を幾つかの筐体に納め、その内部の

温度制御を行い遅延時間の変化を少なくする。屋内機器はすべて恒温室内に設置される。屋内と屋外を結ぶケーブルを含め、各機器にセンサーが取り付けられ温度のモニターが行われる。

### 5.2 送信パワーの調整

搬送波位相はC/Aコードの相関積分値のsin成分、cos成分から求めることができる。信号のC/N(Carrier to Noise ratio)が良い場合、搬送波位相は相関積分値をデジタル化する際のbit数の影響を受け量子化してしまう。TCEでは符合付きの1bitで相関積分値をサンプリングしている[4]。そのため搬送波位相の分解能は45°に制限されている。しかし、C/Nが悪くなると受信信号に位相変調がかかったことと等価になり、積分を行うことにより得られる搬送波位相に線形性を確保することができる。

TCE地球局では送信信号のパワーを可変アテネータで調節し、TCEでの受信信号のC/Nが最適な状態になるよう調整する。

### 5.3 コード位相測定

TCEにおけるコード追尾は、シフトレジスタの値をコードクロックの20倍の20.46MHzで調整するディレイ制御方式で行われる。シフトレジスタの値は20msec毎に加算され、1secに一度テレメトリで取得する。したがって、コード位相は1秒間の平均値として求められる。一方、TCE地球局ではNCO(Numerically Controlled Oscillator)による追尾制御を採用し、NCOの位相の積算値が取得可能となるためコード位相の測定精度の向上が期待できる。また、NCOの追尾レートは40.96MHzに上がるため、単純に分解能が約2倍に向上することが期待できる。

### 5.4 送信コード、搬送波位相の調整

搬送波位相はコードの相関積分値から算出する。相関積分値はコード位相と同様に1秒間の平均値として取得される。このため搬送波位相が $\pm 180^\circ$ でふらついているような場合、送られてくる位相の平均値は $0^\circ$ となり、正確な値とは言えない。このようなことが起こらないようにするために、地球局から送信する信号の搬送波位相、コード位相の調整を行う。搬送波位相は送

信波生成器に入力される 10.23MHz の基準信号の周波数を調整し位相を変化させる。コード位相は NCO の位相をシフトさせることで位相の調整が可能となっている。

## 5.5 ドップラー周波数の除去と送信周波数の補正

TCE ではドップラー周波数の追尾を自動的にしないため、ドップラー周波数の偏移量が大きくなるとコード相関がとれず測定ができなくなってしまう。一方、TCE 地球局では NCO によるキャリア周波数の自動追尾を行うため、NCO の位相の積算値から周波数の偏移量を求めることが可能である。この周波数偏移量を使用して TCE 地球局の基準周波数を調整し、TCE でのドップラー偏移を打ち消すように送信周波数をシフトさせる。この周波数補正により TCE でコード相関がとれ、測定が可能となるようにする。その概念図を図 3 に示す。図中の SG は Signal Generator を表し、TIC は Time Interval Counter、DMTD は Dual Mixer Time Difference を表す。NCO による周波数偏移量を読み出し、基準信号周波数 10.23MHz でのシフト量に変換する。ここで衛星上での偏移を相殺するため、送信波の中心周波数からのずれの向きを逆にする。その 10.23MHz からわずかにずれた周波数信号を SG から出力し、S バンド送信波生成器の基準周波数として使用する。その結果、S バンド送信周波数は 2491.005MHz からシフトした値となる。双方向時刻比較ではドップラーによる偏移量は補正を行わなくても差し引きすることでキャンセルされる。しかし、TCE での測定を可能にする

ため周波数をシフトさせるので、時刻差を求める際に補正を行わなくてはならない。位相は周波数の時間積分であるので、時系列での周波数の変化を正確に把握しておく必要がある。このため、基準周波数の時間変化を DMTD 装置を使用して ps のオーダーでモニターし、時刻比較時の周波数補正に使用する。

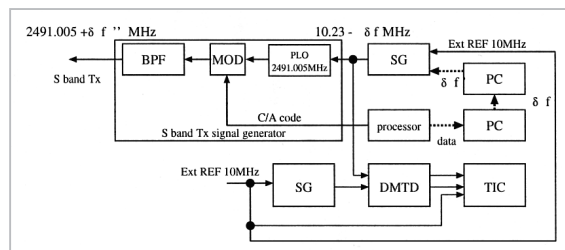


図 3 TCE 地球局 S バンド信号生成部

## 6 まとめ

TCE ではコード位相を使用して数 ns、搬送波位相で約 100ps の精度での時刻比較を目指している。時計の安定度が確実に進歩している現在では ps オーダーでの時刻比較精度の実現が望まれている。また、衛星側位技術の確立からも重要な研究であるといえる。TCE 地球局では測定分解能を上げるために、屋外機器の温度制御やデータ処理装置のコード追尾周波数の向上を行う。また、TCE での測定を維持するためにコード位相、送信パワーの調整やドップラー周波数の補正機能を持つ予定である。今後は、地球局の性能検査、データ処理プログラムの整備等を行い、衛星打ち上げに備える予定である。

### 参考文献

- 1 高橋靖宏ほか，“ETS-VIII搭載用高精度時刻比較装置による実験計画”，電子情報通信学会論文誌 B, Vol. J84-B, No.12, pp.2101-2107, 2001.
- 2 H. Sun et al., "Performance of Two-way Satellite Time and Frequency Transfer in Asia-Pacific Region", Journal of the Geodetic Society of Japan, Vol. 49, No. 2, pp. 135-142, 2003.
- 3 中川史丸ほか，“データ処理・解析”，本特集.
- 4 木内等ほか，“データ処理部 搭載処理部（TCE-PRO）の構成”，本特集.
- 5 高橋靖宏ほか，“TCE 実験計画”，本特集.
- 6 E. Powers et al., "Hardware Delay Measurements and Sensitivities in Carrier Phase Time Transfer", Proc. of the 30th PTTI, pp. 293-306, 1998.

藤枝美穂

電磁波計測部門時間周波数計測グループ  
専攻研究員 博士(理学)  
衛星測位、衛星時刻比較

高橋靖宏

電磁波計測部門時間周波数計測グループ  
主任研究員  
衛星通信、衛星測位システム

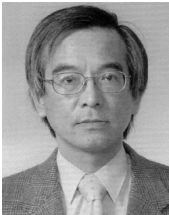


後藤忠広

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

中川史丸

電磁波計測部門時間周波数計測グループ  
専攻研究員 博士(理学)  
衛星測位、衛星時刻比較



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、特に高精度時刻比較