

## 3-10 高精度時刻比較装置

### 3-10 Time Comparison Equipment

#### 3-10-1 高周波部

##### 3-10-1 RF Part

高橋靖宏 後藤忠広 中川史丸 藤枝美穂 今江理人 木内 等  
 細川瑞彦 野田浩幸\* 佐野和彦\* (\*独立行政法人 宇宙航空研究開発機構)

TAKAHASHI Yasuhiro, GOTOH Tadahiro, NAKAGAWA Fumimaru,  
 FUJIEDA Miho, IMAE Michito, KIUCHI Hitoshi, HOSOKAWA Mizuhiko,  
 NODA Hiroyuki, and SANNO Kazuhiko

##### 要旨

ETS-Ⅷ(技術試験衛星Ⅷ型)では、衛星測位の要素技術の習得を主な目的に、日本で初めて衛星に原子時計が搭載される。その原子時計の性能評価を目的に高精度時刻比較装置(TCE)が搭載される。現在、搭載機器の製造を終了し、衛星全体での試験に供されている。本稿では本装置の概要、原理、高周波部の構成等について述べ、TCEの開発結果を報告する。

The Engineering Test Satellite-Ⅷ(ETS-Ⅷ) missions will include application experiments using Cesium atomic clocks in space. Using this satellite, the CRL (Communications Research Laboratory) and the JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency) is planning to conduct a precise time and frequency transfer between an atomic clock on-board the satellite and a ground-reference clock. This paper describes the system for precise time transfer between the ground reference clock and on-board clock.

##### [キーワード]

技術試験衛星, 衛星測位, 衛星搭載原子時計, 時刻比較  
 ETS-Ⅷ, Satellite positioning system, On-board atomic clock, Time comparison

## 1 まえがき

ETS-Ⅷ(技術試験衛星Ⅷ型)[1]は、2004年に打上げ予定の今後の宇宙活動に必要となる先端的な共通基盤技術の開発を行うことを目的とした衛星で、大型展開アンテナを用いた移動体通信実験[2]をはじめ、各種の実験が予定されている。

また、ETS-Ⅷには、我が国の人工衛星では初めて、宇宙航空研究開発機構(JAXA)のミッションとして、原子時計が搭載され、その応用実験として、衛星測位技術に関する基礎研究を行うことが予定されている[1]。

当該原子時計の衛星軌道上での性能評価を主目的として、搭載原子時計と地上の原子時計との間の高精度時刻比較法に関してCRLから提案した時刻比較方式が、CRLのミッションとしてETS-Ⅷに搭載されることが認められ、搭載機器の開発を進めてきた。現在は搭載機器の製造を終了し、衛星全体の試験に供されている。

本装置で用いる時刻比較方式は、2008年に打上げ予定の準天頂衛星を用いた衛星測位システム[3]の時刻管理でも同様のものが採用される予定[4]であり、本装置を用いた実験の成功が期待されている。

本稿では、ETS-Ⅷ搭載の高精度時刻比較装置

(TCE)の概要、原理及び高周波部の構成等について述べ、TCEの開発結果について報告する。

## 2 開発の経緯

### 2.1 日本の衛星測位技術開発

今日の日本では、カーナビゲーションシステムをはじめとして、船舶の測位システム、時刻供給等、GPS[5]を用いたシステムが各方面で大いに利用され、また、地震観測網や、標準時刻の国際比較[6]等にも利用されている。日本での衛星測位システムに関する研究開発は遅れていたが、平成8年ごろから我が国の衛星測位システムの技術開発のあり方について議論が進められてきた。平成9年3月に宇宙開発委員会の分科会報告が出され、当面は以下の衛星測位システムの要素技術を開発することとされた。[7]

- ・衛星搭載原子時計
- ・衛星群時刻管理技術
- ・高精度衛星軌道決定技術

この中で、衛星搭載原子時計はGPS衛星に搭載されているセシウム原子時計及びルビジウム原子時計より周波数安定度の良い水素メーザの衛星搭載用原子時計[8]の研究開発はCRLで、また、衛星群時刻管理技術及び高精度衛星軌道決定技術の研究開発はJAXAにより進められることとなった。

### 2.2 ETS-Ⅷ開発計画

ETS-Ⅷでは、JAXAのミッションとして、我が国で初めて原子時計が衛星に搭載される。これは、原子時計の開発を目的としてではなく、GPSにも用いられているセシウム原子時計を導入し、原子時計の軌道上性能の把握等を行うとともに、以下の衛星測位技術に関する要素技術の習得を計画している。

- ・搭載原子時計の軌道上性能評価及び軌道上管理技術の習得
- ・衛星群時刻・地上時刻の精密管理技術の習得
- ・高精度軌道決定技術の評価

CRLでは、ETS-Ⅷ搭載原子時計の軌道上での性能評価のため、搭載原子時計と地上の原子時計の高精度時刻比較法に関して、本装置で用いている双方向時刻比較方式を提案し、そのため

の実験機器がCRLのミッションとしてETS-Ⅷに搭載されることとなった。

## 3 衛星搭載機器

JAXAのミッションであるHAC(High Accuracy Clock)と呼ばれる原子時計とSバンド・Lバンドの通信機器及びCRLのミッションである衛星-地上間の高精度時刻比較を行うTCEについて、その全体構成及びTCEの高周波部の詳細について以下に述べる。

なお、TCEの信号処理部(TCE-PRO)の詳細については別稿[9]を参照されたい。

### 3.1 衛星搭載原子時計

衛星搭載原子時計(HAC-CFS)は、JAXAのミッションとして、GPSにも用いられている米国FTS社製のセシウム原子時計を導入し、衛星測位技術の要素技術の習得を目的としている。

その諸元は以下のとおりである。

- ・周波数：10.23MHz -  $5.5 \times 10^3$ Hz  
(相対論的補正項を含む。)
- ・重量：13.6kg
- ・精度： $\pm 1 \times 10^{11}$
- ・安定度： $1.0 \times 10^{11}$  (1~3.6s)  
 $1.89 \times 10^{11} / \sqrt{\tau}$  (3.6~10<sup>5</sup>s)  
 $6 \times 10^{14}$  (10<sup>5</sup>~10<sup>6</sup>s)

これ以外のJAXAのミッションとしては、Sバンド送受信機、Lバンド送信機、Sバンド・Lバンド共用1.0mφアンテナ及びSLR(Satellite Laser Ranging)用機器等が搭載される。

### 3.2 高精度時刻比較装置(TCE)の概要

TCEのPFM(Proto Flight Model)の外観を図1に示す。TCEはEM(Engineering Model)、PFMの順に開発された。EMは電気設計及び機械設計の確認を行い、PFMは衛星搭載の認定試験等に供され、その後衛星に搭載される。

ETS-Ⅷ搭載原子時計と、地上の基準時計の間の高精度時刻(周波数)比較の原理図を図2に示す。衛星から地上へ、地上から衛星へ時刻比較用の信号を伝送し、それぞれが受信した信号と時刻差を測定し、その差を求めることにより衛星搭載原子時計と地上の基準時計の時間差を求

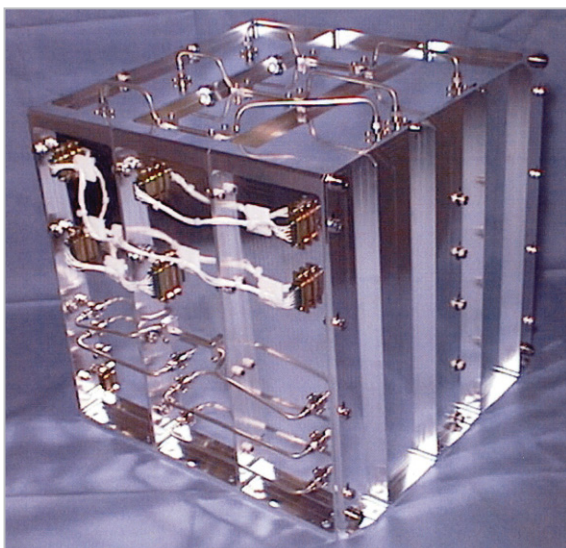


図1 TCE-PFMの外観

める双方向伝送方式時刻比較法を用いる。双方向時刻比較では、伝搬路上の電離層や大気での遅延とその変動、衛星の運動の影響が原理上相殺でき、高精度の時刻比較が可能になる。

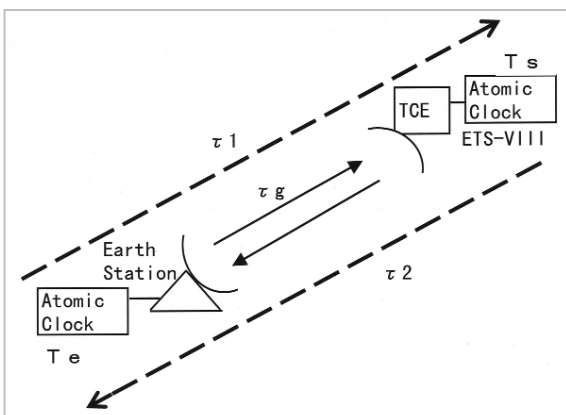


図2 双方向時刻比較の原理図

また、衛星上及び地上の双方に高安定原子時計が置かれ、搬送波信号、変調信号等がすべてGPSと同様にコヒーレントに生成されることから、変調信号のみならず、搬送波信号の位相情報を利用することが可能となり、距離にしてmmオーダー、時刻比較精度でpsオーダーの時刻比較を目指す。

### 3.3 TCEの原理

本装置による実験は、図2のように衛星から地上へ、地上から衛星へ時刻比較用の信号を伝送する。その場合、それぞれで、その受信した信

号と時刻差を計測する。その計測値

$\tau 1$ ：衛星の時計  $T_s$  を基準に地上からの信号との時刻差の計測値

$\tau 2$ ：地上の時計  $T_e$  を基準に衛星からの信号との時刻差の計測値

$\tau g$ ：衛星－地上間の伝搬時間

として、

$$\text{UPLINK} \quad : \tau 1 = \tau g + T_s - T_e \quad \dots\dots (1)$$

$$\text{DOWNLINK} : \tau 2 = \tau g + T_e - T_s \quad \dots\dots (2)$$

この差と和をとる

$$\text{UP-DOWN} = \tau 1 - \tau 2 = 2(T_s - T_e) \quad \dots\dots (3)$$

$$\text{UP+DOWN} = \tau 1 + \tau 2 = 2\tau g \quad \dots\dots (4)$$

となり、差からは時刻差が、和からは伝搬時間を求められる。

伝搬時間からは、衛星－地上間の距離を計算でき、測距データとして用いることが可能である。

実際の計測は、測距信号として送信される1.023MHzで駆動されるPN符号(GPSのC/Aコード相当)のコードクロック情報と、その搬送波位相情報が用いられ、前者で概略の計測を行い、最終的に後者の情報により高精度の計測がなされる。

TCEの時刻比較及び誤差の補正等の詳細については別稿[10]を参照されたい。

### 3.4 TCE及びHACの全体構成

TCE及びHACの主な諸元は表1に示すとおりである。

表1 TCEとHACの主要諸元

送信出力	5.7W
Sバンド送信周波数	2491.005MHz
受信周波数	2656.390MHz
Lバンド送信周波数	1595.880MHz
PNコード	GPS C/A コード相当
大きさ (TCE)	320×320×325mm
重量 (TCE)	12.4kg 以下

図3は、TCE(青枠内)及びHAC(青枠外)のブロック図であり、以下の機能を有する。

- ・衛星から地上へ時刻比較用の信号を送信する機能(送信信号)
- ・地上からの時刻比較用の信号を受信する機能(受信信号)



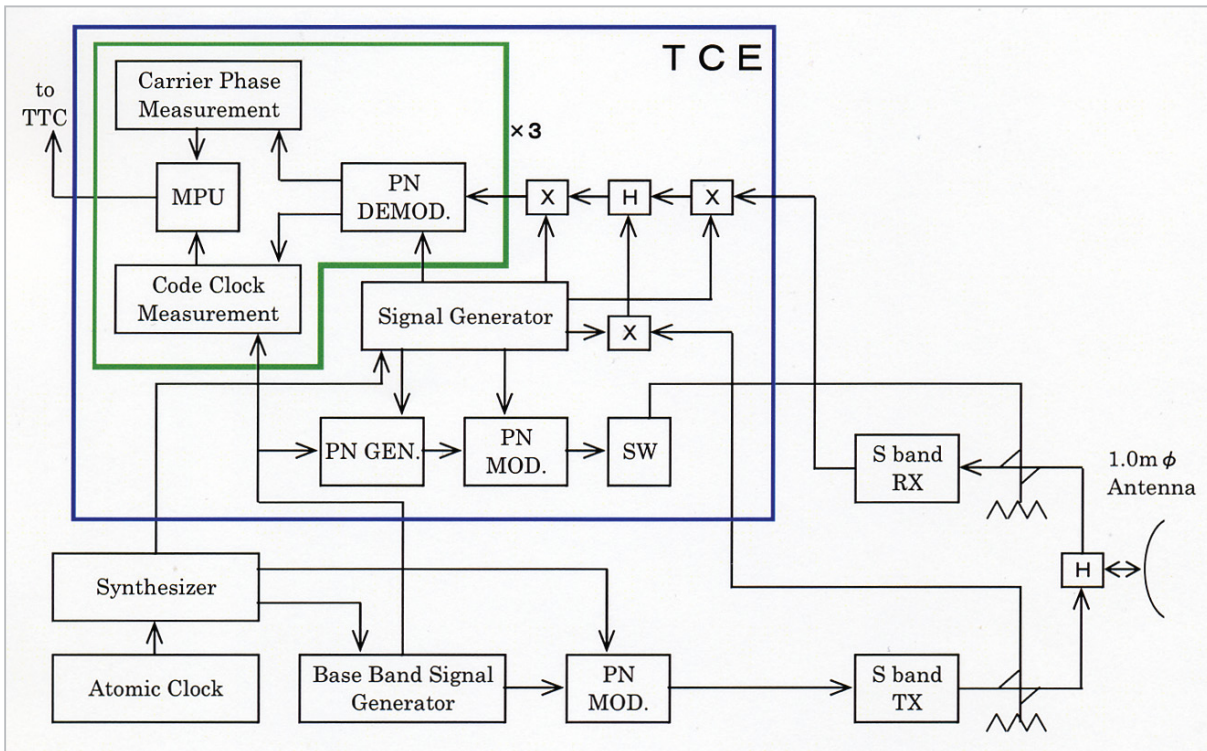


図3 高精度時刻比較系衛星搭載部ブロック図

・衛星内の送信系及び受信系の遅延時間をリアルタイムで測定する機能(送信系校正信号、及び受信系校正信号)

この送信信号及び受信信号を用いて、双方向伝送方式で時間差を測定する。また、送信系校正信号及び受信系校正信号により、温度変化や経年変化等による送受信系で共通でない経路の遅延時間変動の補正を行う。そのため、TCEの信号処理部(緑枠内)では、受信信号、受信系校正信号及び送信系校正信号の3チャンネルの信号処理を同時にできるようになっている。

以下、各信号の経路に沿って説明する。

・送信信号：シンセサイザにより送信搬送波が、ベースバンド信号合成部によりPN(Pseudo Random Noise)符号が生成され、PN変調後に、Sバンド送信系で増幅され、1.0mφアンテナから送信される。

・受信信号：1.0mφアンテナで受けた電波をSバンド受信系で分岐し、周波数変換後、PN復調し、搬送波位相計測及びコードクロック計測される。

・受信系校正信号：信号合成部で生成された搬送波及びPNコード発生器で生成されたPN符号はPN変調後、Sバンド受信系の前の方向性結合器から挿入され、受信信号とともに処理される。

・送信系校正信号：送信信号をアンテナの前の方向性結合器で分岐し、その信号は周波数変換後に、受信信号及び受信系校正信号とともに処理される。

### 3.5 TCEの高周波部の詳細構成

TCEの高周波部は、ローカル部、コンバータ部及び電源部で構成される。以下にその詳細構成について述べる。

#### 3.5.1 ローカル部

ローカル部はHACから入力される10.23MHzの基準信号から、TCEの各部で必要な周波数をコヒーレントに生成する。

##### (a) 20.46MHzローカル信号

20.46MHzローカル信号は、TCE-PROのクロックとしても使われるため、安定度を良くする必要があり、図4に示すように10.23MHzの基準信号からダイオードによるダブラで作っている。基準信号の高調波レベルが高いので、TCE-PROの動作が不安定になるという問題が、EM(エンジニアリングモデル)のHAC/TCE組合せ試験で分かった。PFMでは、その改善のためにノッチフィルタを追加し、TCE-PROの動作を安定させた。

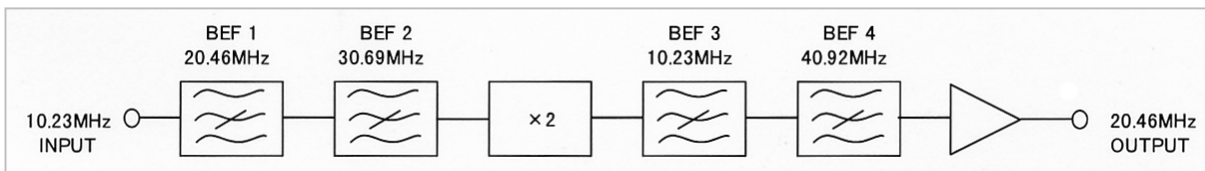


図4 20.46MHz生成方法

(b) 他の周波数のローカル信号

他の周波数のローカル信号は、図5に示すように47.5695MHzの信号はLO (Local Oscillator) にて、Sバンドの3周波の信号についてはPLO (Phase Lock Oscillator) 及びSUB LO、PLA (Phase Lock Oscillator Amplifier) にて半分の周波数を生成後、2通倍器にて得ている。

(c) その他

ローカル部では、そのほかにHACから供給される1Kpps (1023パルス/秒) 信号を、RS-422でインタフェースし、その2系統の信号をOR回路で一つにし、TCE-PROに供給している。

校正信号が重畳された2656.390MHz信号を50.127MHzのIF周波数へ変換及び2491.005MHzの送信信号を同じくIF周波数へ変換を行う。また、その二つの信号をハイブリッドで重畳して3信号が重畳された信号にする。その後、47.5695MHzローカル信号を90度位相の異なる二つの信号とし、上記の3信号が重畳されたIFを周波数変換することにより、90度位相の異なる2.5575MHzのI、Qの二つの信号として、TCE-PROで処理される信号を作っている。

3.5.2 コンバータ部

コンバータ部は図7に示すように、受信信号と

3.5.3 電源部

ETS-VIIIのバス電圧は日本の実験衛星では初めて100V-DCを採用している。電源部では、このバス電圧100V-DCから、TCEの各部で必要な

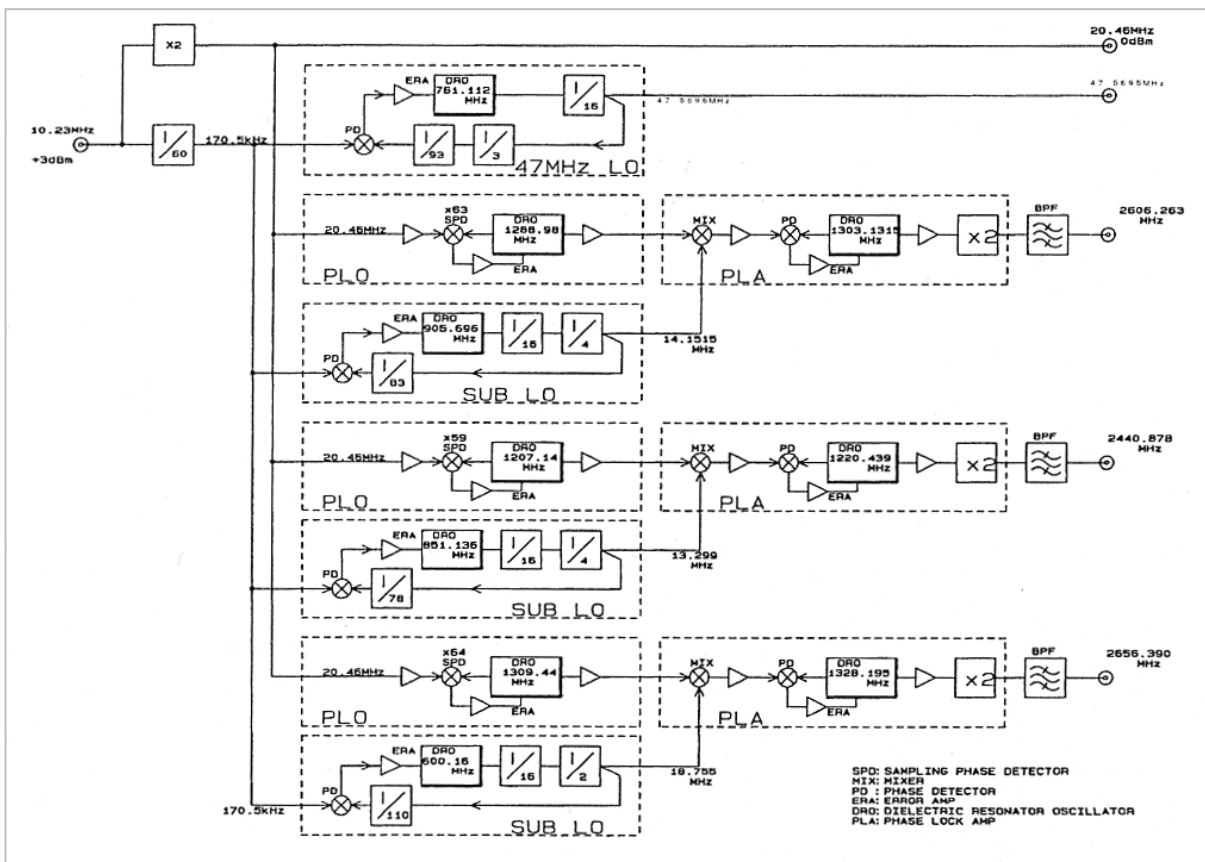


図5 ローカル部ブロック図

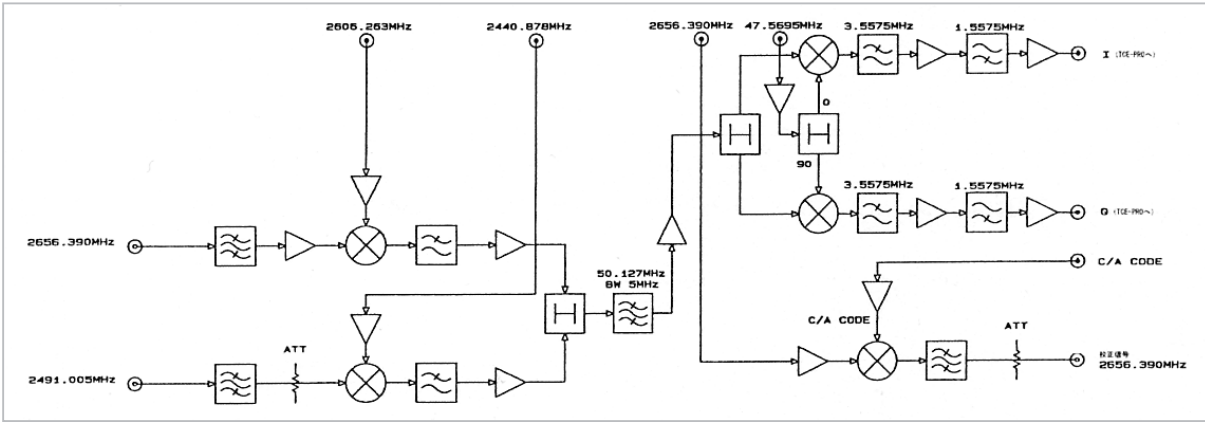


図6 コンバータ部

+5V 及び ±15V を、DC-DC コンバータで作成、供給している。

### 3.6 TCE-PFMの試験結果

TCE-PFMでは、これまで以下の試験を行ってきた。

- ・各ローカル信号の発振周波数、レベル、安定度
- ・受信信号に送信及び受信の校正信号を重畳した時の各PN符号及びキャリア位相の計測性能
- ・熱真空試験、振動試験、衝撃試験、EMC 試験

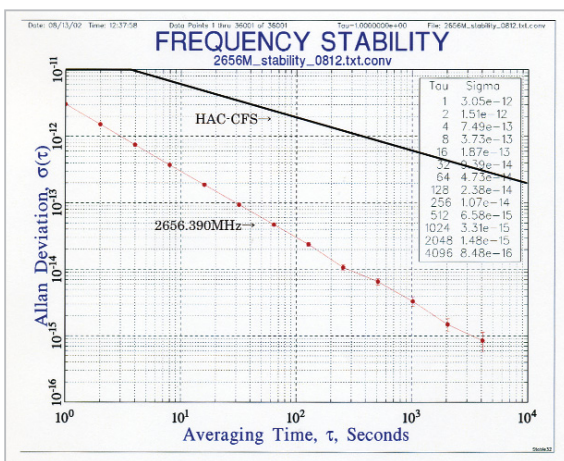


図7 2.65639GHzの周波数安定度測定結果

・ TCE用地球局との接続試験

周波数安定度の測定結果の一例を図7に示す。周波数安定度についてはHAC-CFSより良く、所期の性能を満足することを確認した。その他の試験でも、TCE-PFMは衛星搭載に耐えること及び高精度時刻比較を行う上で十分な性能であることを確認した。

## 4 むすび

衛星上の原子時計と地上の原子時計を psec オーダーで比較することを目指して、TCEの開発を進めてきた。その開発に際して、幾度かの設計変更を経て、所期の性能の装置開発を行うことができた。今後は、地球局及びデータ処理部等の地上部分の整備を行い、軌道上でのTCEとの実験に向けて準備を行う予定である。

## 謝辞

本装置のETS-Ⅷへの搭載化に御尽力戴いた関係各位に感謝するとともに、長年にわたって本装置の開発に御尽力頂いた日本通信機株式会社及びコスモリサーチ株式会社の関係各位に深謝します。



## 参考文献

- 1 M. Homma, S. Yoshimoto, N. Natori, Y. Tsutsumi, "Engineering Test Satellite-8 for Mobile Communication and Navigation Experiment", IAF, No.IAF-00-M.3.01, pp.256-263.
- 2 Y. Kawakami, S. Yoshimoto, Y. Matsumoto, T. Ohira, T. Ide, "S-Band Mobile Satellite Communications and Multimedia Broadcasting Onboard Equipment for ETS-VIII", IEICE Trans.Commun., Vol.E82-B, No.10, pp.74-81, Oct. 1999.
- 3 河野 功, 小暮 聡, 柰野正明, 梶井 誠, 伊藤 憲, 江州秀人, 今江理人, 岩田敏彰, "準天頂衛星による高精度測位実験計画", 第47回宇宙科学技術連合講演会.
- 4 高橋靖宏, 今江理人, 藤枝美穂, 森川容雄, 木村和宏, 伊東宏之, "準天頂衛星利用測位システムの時刻管理系の全体計画", 第47回宇宙科学技術連合講演会.
- 5 B. Hofmann-wellenfof, H. Lichtenegger, J. Collins: GPS Theory and Practice, Spring-Verlag Wien, New York, 1994.
- 6 相田政則, "5.時刻周波数標準の発生, 維持, 供給 5-1 発生と公表の自動化システム", 通信総合研究所季報, Vol.45, No.1/2, Mar/Jun. 1999.
- 7 宇宙開発委員会計画調整部会衛星測位技術分科会報告 "我が国における衛星測位技術開発への取り組み方針について", 1997.
- 8 T. Morikawa, K. Takahei, M. Uehara, M. Tsuda, "Design Analysis of a Sapphire Loaded Cavity for a Spaceborne Hydrogen Maser", Conference on Precision Electromagnetic Measurements, No.MOP4-3, pp.74-75, Sydney, Australia, May 2000.
- 9 木内 等, 今江理人, 高橋靖宏, 後藤忠広, 中川史丸, 藤枝美穂, 細川瑞彦, "3-10-2 データ処理部", 本特集.
- 10 中川史丸, 後藤忠広, 藤枝美穂, 高橋靖宏, 今江理人, 木内 等, "4-8-2 データ処理・解析部", 本特集.

たかはし やすひろ  
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



ごとう ちゅうひろ  
後藤忠広

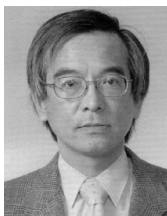
電磁波計測部門時間周波数計測グループ研究員  
GPS 時刻比較

なかがわ しみまる  
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

ふじえだ みほ  
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



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、特に高精度時刻比較

きのうち ひとし  
木内 等

無線通信部門光宇宙通信グループ主任研究員 博士(工学)  
電波干渉計、空間光伝送



ほそかわ みつひこ  
**細川瑞彦**

電磁波計測部門原子周波数標準グループ  
リーダー 理学博士  
原子周波数標準、時空計測

の だ ひろゆき  
**野田浩幸**

独立行政法人宇宙航空研究開発機構  
衛星測位実験システム

さ の かず ひこ  
**佐野和彦**

独立行政法人宇宙航空研究開発機構  
衛星測位実験システム