

3-9 高精度時刻基準装置(HAC)

3-9 High Accuracy Clock

野田浩幸* 佐野和彦* 浜 真一 (*独立行政法人 宇宙航空研究開発機構)
NODA Hiroyuki, SANO Kazuhiko, and HAMA Shin'ichi

要旨

宇宙開発事業団(現宇宙航空研究開発機構)では、ETS-Ⅷ搭載高精度時刻基準装置を使用し、衛星測位基盤技術の修得を主眼に、ETS-Ⅷの高精度軌道・時刻決定実験、測位信号衛星中継実験、GPS衛星との組合せによるユーザ測位実験を行う。高精度時刻基準装置は、実験運用を満足させるために、Cs原子時計が出力する高安定周波数からL/Sバンド2周波測位信号を生成・送信する機能及び地上から送信された測位信号をコヒーレント中継する機能を有する。衛星測位実験システムは、ETS-Ⅷ、GPS衛星の衛星セグメントと、L/Sバンド測位信号を受信し測距データを生成する衛星モニタ局、データを収集・解析・評価するマスタコントロール局、測位信号送信局、レーザ測距局からなる地上セグメントから構成される。

To obtain the basic technology of satellite positioning system, NASDA will conduct the experiments of ETS-Ⅷ high accurate orbit determination and time synchronization, satellite navigation signal relay, user positioning by ETS-Ⅷ combined with GPS satellites. High Accuracy Clock (HAC) generates and transmits L/S-band navigation signal synchronized with high stability frequency signal from Cs atomic clock on board, and conducts coherent relays of navigation signal transmitted from ground station. Positioning experiment system consists of the satellite segment of ETS-Ⅷ, GPS satellite and the ground segment of satellite monitor stations receiving navigation signal and generating ranging data, master control station processing the ranging data, navigation signal transmitting station and laser ranging stations.

[キーワード]

衛星測位実験, 高精度時刻基準装置, 衛星測位実験システム, ETS-Ⅷ
Satellite positioning experiment, High Accuracy Clock, Satellite positioning experiment system, ETS-Ⅷ

1 まえがき

近年における衛星測位アプリケーションの発展は目覚ましく、科学、産業、経済から日常生活まで、もはやなくてはならない技術となっている。衛星測位システムにはGPS、GLONASS等があるが、近年では欧州によるガリレオ計画など新しいシステムも開発が始まっている。このような状況の中、日本においても独自に測位システムの基盤技術を修得し、高精度化・高機能化を検討することは大きな意義がある。そこで、宇宙開発事業団(現宇宙航空研究開発機構)では、ETS-Ⅷプロジェクトにおいて、衛星/地上シス

テム共に測位実験システムの開発から運用までを一貫して実施することによって測位基盤技術の修得を行うこととした。本文では、ETS-Ⅷで実施する衛星測位実験、高精度時刻基準装置(HAC)及び衛星測位実験システムについて説明する。

2 衛星測位実験

ETS-Ⅷ衛星測位実験では、下記の項目を実施する。参考として図1に実験概念を示す。

- (1) 高精度軌道決定・時刻決定
測位衛星として必須である衛星の高精度軌

道決定・時刻決定技術の確立を目指す。静止衛星は、中高度のGPS衛星より遠方に位置し、地上との相対位置の変化が小さいため、軌道・時刻の決定精度を高く維持することは技術的に高度であり、これを確立することが本実験の大きな目的の一つである。

決定手法は、ETS-Ⅷ測位信号を使用した逆GPS方式を基本とし、時刻比較モード、SLR運用モードで取得した高精度時刻・測距データを参照して高精度化を図る。

技術確立のアプローチとして、まずは事後解析により測位実験システムに内在する誤差要因の抽出・補正及びETS-Ⅷの軌道・時刻決定精度の確保を行い、最終的にはリアルタイム解析による決定精度の向上を目指す。軌道・時刻決定精度の目標は、30m以下、10ns以下(事後解析)、100m以下、30ns以下(リアルタイム解析)とした。

以下に各モードでの実験内容について示す。

(a) 原子時計モード実験

ETS-Ⅷ測位信号を使用して地上局(4局)との測距データを取得し、解析的に衛星位置及び衛星搭載原子時計/地上基準原子時計間の時刻誤差を導出する(逆GPS方式)。

(b) 時刻比較モード実験

時刻比較装置(TCE)を用い、ETS-Ⅷ測位信号を地上/衛星で双方向通信し、衛星搭載原子時計と地上基準原子時計との時刻誤差を高精度に検出する。この方式では、原理的に測位信号の伝搬遅延をほぼキャンセルすることができるため、誤差検出精度としてサブナノ秒オーダーの極めて高い精度を得ることができる(時刻比較実験に係る衛星搭載TCE及び地上装置はCRLの開発による)。

(c) SLR運用モード実験

衛星/地上局間でレーザ測距を行う。cm級の高精度測距データに基づき、衛星の高精度軌道決定を行う。

(2) GPS衛星との組合せによるユーザ測位実験

実験(1)によりETS-Ⅷの軌道・時刻決定

技術を確立した後、GPSとETS-Ⅷとの組合せによるユーザ測位を実施し、GPS単独において測位精度が劣化する期間に静止衛星が補完としていかに有効であるかを確認する。

(3) 測位信号衛星中継実験

測位信号を地上局で生成し、ETS-Ⅷで中継するシステムにより実験(1)、(2)を実施し、このシステムの有効性について検証する。

本システムでは測位信号生成部を地上で構築するため、運用性・保守性が高く、原子時計等のキーコンポーネントに地上品を使用できることからコスト面でも有利である。

したがって、本システムの有効性が検証できれば、静止衛星を利用した測位システムとしては有効なシステムとなり得る。

(4) チップレート変更実験

測位信号に含まれる擬似ランダム符号(PRN)のチップレートを変更し、ユーザ測位精度(特にコード測位)に対するチップレートの依存性を確認することにより、チップレートの最適設計検討に資する。

(5) 測位実験システム運用性評価

所定の実験期間において測位実験システムを継続運用することにより、実用測位システムに必須のオペラビリティ、インテグリティ、コンティニューイティについて、実験システムの範囲で問題点を抽出する。

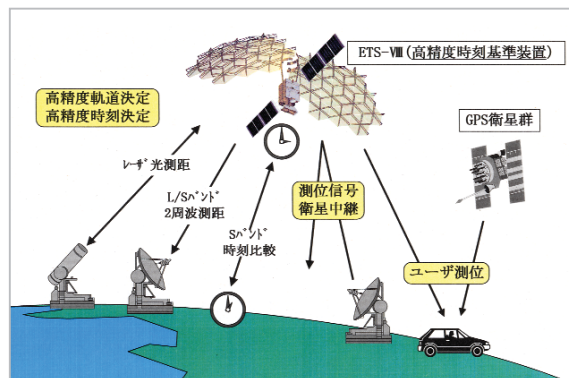


図1 ETS-Ⅷ衛星測位実験概念図

3 高精度時刻基準装置

3.1 機能・仕様・外観

2の実験を実現するために必要なHACの機能

を下記に示す。また、仕様を表1・図2に、外観を図3に示す。

- (1) 高安定な基準周波数を生成する。
- (2) 基準周波数から時刻基準信号を生成する。

表1 HACサブシステム仕様

項目	仕様		
原子時計			
形式	セシウム周波数標準		
出力周波数	10.23MHz-5.52328E-3Hz(相対論的補正項)		
周波数安定度	1E-11(1.0s<τ<3.6s) / 1.89E-11/√τ(3.6s<τ<1E5s) / 6E-14(1E5s<τ<1E6s) ドリフト:<1E-14/day / 温度依存性:<1E-13/degC(T-25℃ <10℃) 外部磁場依存性:<1E-12(B <1[Gauss]) / 外部電圧依存性:<1E-12(V-28 <4)		
測位信号	Lバンド信号(D/L)	Sバンド信号(D/L)	Sバンド信号(U/L)
変調方式	BPSK	BPSK	BPSK(測位信号) / CW(パイロット)
周波数	1595.88MHz±7.5MHz	2491.005±7.5MHz	2656.39±1.39MHz(測位信号) 2659.8MHz(パイロット)
送信EIRP	最大26.6dBW以上 (-3dBエリア)	最大28.0dBW以上 (-3dBエリア)	受信G/T:-8.4dB/K以上 (-2dBエリア)
偏波	右旋円偏波	左旋円偏波	左旋円偏波
データレート	50bps		
PRNコード	チップレート:1.023M / 1.705M / 3.410M / 5.115Mbps		チップレート:1.023Mbps
	コード長:1023		
アンテナ			
形式	リフレクタ:センチメートルパラボラアンテナ(1.0mφ) / 給電部:L/Sバンド共用パッチアンテナ		
信号	Lバンド信号(送信)	Sバンド信号(送信)	
利得	16.9dBi以上(-3dBエリア)	21.3dBi以上(-3dBエリア)	
ビーム幅	11.3度以上	6.9度以上	
軸比/VSWR	2.0dB以下/1.5以下	2.5dB以下/1.5以下	
サービスエリア	第2図に示す。		
LRRA			
形式	プリズムアレイ型(アレイ数:36個)		
使用波長	532nm(2nd harmonic of Nd:YAG レーザ)		
光学的特性	受光確率(注1):0.1以上 / 反射率:0.75以上		
質量	100.67kg(PFM実測値)		
消費電力	416W(peak)		

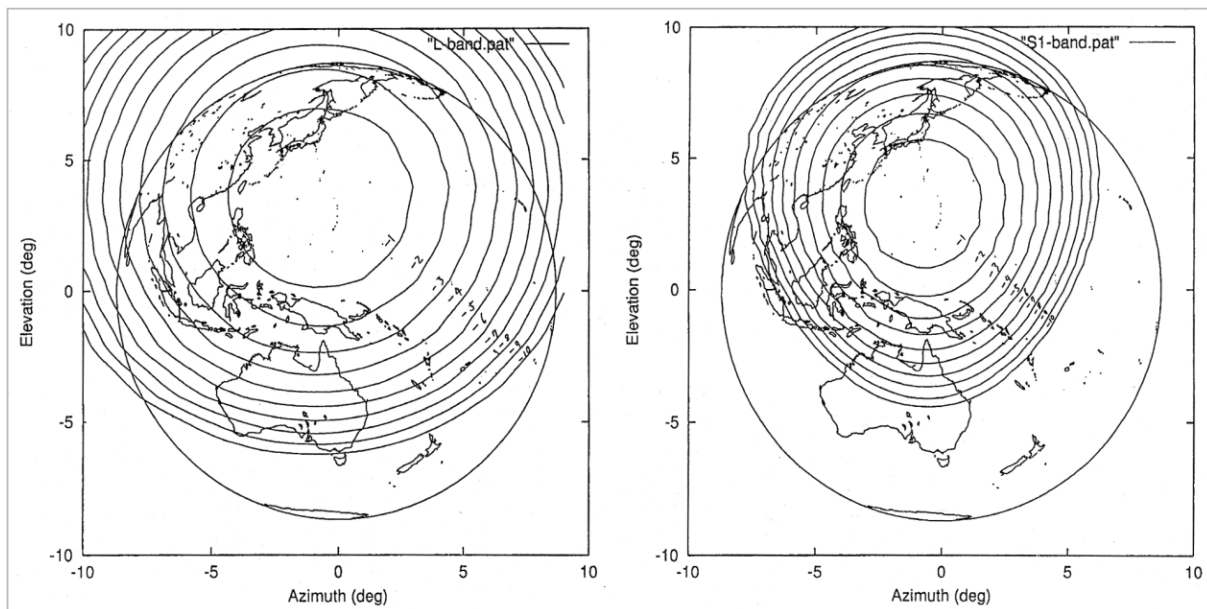


図2 測位信号サービスエリア

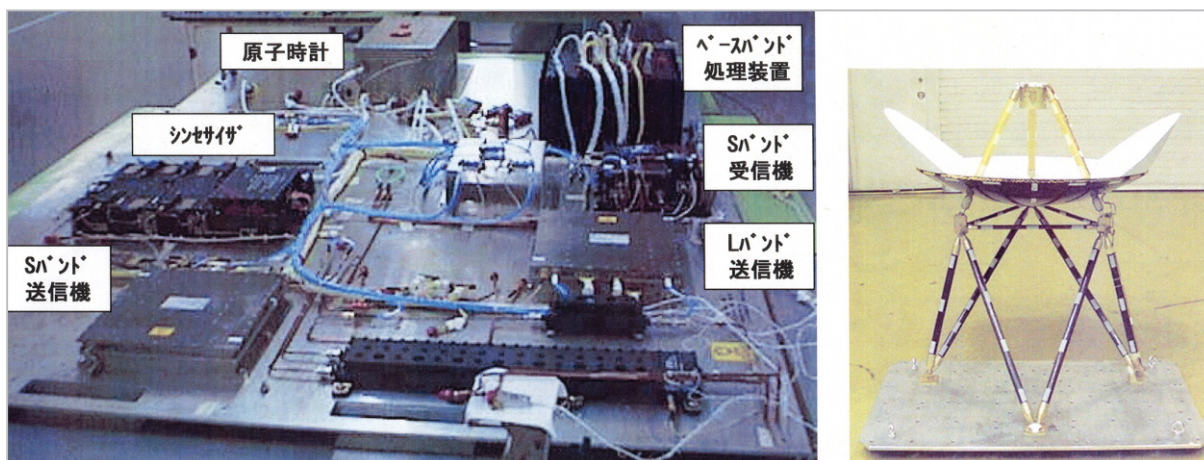


図3 HACサブシステム外観

- (3) 時刻基準信号を地上へ送信する。
- (4) 地上で生成した時刻基準信号をコヒーレント中継し、地上へ折り返す。
- (5) コマンド受信・テレメトリ送信を行う。
- (6) 地上からの光信号を地上へ反射する。
- (7) TCEを利用した実験のためのアップリンク信号を受信し、TCEへ配信する。また、クロック信号をTCEへ配信する。

3.2 設計概要

主な設計概要を下記に示す。参考として機能ブロックを図4に示す。

(1) 原子時計モード

原子時計が生成する基準信号はシンセサイザ (SYNTH) に入力され、SYNTHが f_1 (20.46MHz) 周波数を生成してベースバンド処理装置 (BPU) へ、Lバンド搬送波となる f_4 (1595.88MHz) 周波数をLバンド変調増幅器 (LMPA) へ、Sバンド搬送波となる f_5 (2491.005MHz) 周波数をSバンド変調増幅器 (SMPA) へ出力する。BPUは、 f_1 周波数を分周してPRNコード及び航法メッセージを生成する。航法メッセージはGPSと同一フォーマットであるが、一部ETS-Ⅷ固有情報を格納している。また、PRNコードは、C/Aコード(チップレート:1.023Mcps)以外に三つのチップレートを用意した。PRNコードはLMPA/SMPAに出力され、L/Sバンド搬送波がPRNコードでBPSKされた後、18W級SSPAで増幅され、HAC-ANTを介して送信される。

(2) 時刻比較実験モード

TCE実験時は、地上からの受信信号とTCEから入力された校正信号をSバンドカップラ2(SCPL2)で合成し、Sバンド受信機(SBPR)内のLNAで増幅した後、TCEへ出力する。また、原子時計を基準としてHAC内で生成されたSバンド送信信号(チップレートは1.023Mbps)は、地上へ送信されるとともにSバンドダイプレクサ(SDIP)内のSバンドカップラ1(SCPL1)で分波され、TCEへも出力される。また、原子時計の基準信号をSYNTHで分波してTCEへ出力するとともに、BPUの指示により1kpps信号もTCEへ出力する。

(3) 測位信号中継実験モード

中継実験モードでは、地上から送信されるパイロット信号を受信し、この信号により生成される10.23MHzを基準信号として動作する。パイロット信号はSBPRで受信され、SYNTHから出力されるローカル信号 f_7 (2625.7MHz)で34.1MHzに周波数変換され、同じくSYNTHから出力される f_{10} (34.1MHz)信号と位相比較を行って位相誤差信号がSYNTHに出力される。SYNTHは内部に10.23MHzのVCXOを有し、SBPRからの位相誤差信号でVCXOの周波数を制御して10/3通倍の f_{10} を生成してSBPRに出力し、全体としてPLLを形成してパイロット信号に同期した信号が生成される。このモードにおいては、パイロット信号及び測位信号をSバンド受信機で受信し、L/Sバンドに周

波数変換して、(2)と同様にSSPAで増幅し地上に折り返す。

(4) SLR運用モード

地上SLR局から送信されたレーザ測距信号を、レーザレトロリフレクタレイ(LRRA)で地上に反射する。LRRAは、36個(各5cmΦ)のプリズムアレイで、信号の到来方向に対して $1.0 \times 10^8 \text{m}^2$ 以上の有効反射断面積を有し、小金井(CRL)・Mt.stromlo(豪)・Heleakala(米)の各SLR局に対して1フォトンカウント以上の受光確率として0.9以上を解析的に得ている。

(5) 原子時計熱制御設計

温度依存性による基準周波数の変動を抑えるために、システムミッションパネル上の原子時計搭載領域でのパネル埋め込みヒートパイプを排除し、原子時計へのMLIカバーにより他コンポーネントとの熱交換を遮断するとともに、原子時計に専用のヒータ・温度センサを装着し、BPUがそれらを制御することにより $+25 \pm 10^\circ\text{C}$ で熱制御を行う。

4 衛星測位実験システム

衛星測位実験システムは、衛星セグメント(ETS-VIII、GPS衛星)及び下記の地上セグメントから構成される。参考として、図5にシステム構成を示す。

(1) HAC実験地上システム

本システムは、衛星モニタ局(4局：小金井、種子島、バンコク(タイ)、ブリズベン(オーストラリア))、ユーザ局(1局:筑波)、マスタコントロール局(1局：筑波)から構成される。衛星モニタ局はETS-VIII、GPS衛星の両測位信号を受信し、衛星との測距データを生成する。ユーザ局の基本機能は衛星モニタ局とほぼ同様であるが、可搬型としてユーザを模擬する局として使用する。マスタコントロール局は、衛星モニタ局、ユーザ局、SLR局からの測距データ等を収集・解析・評価するとともに、実験システム全体を管理する。

(2) HAC実験送信設備

測位信号衛星中継実験のために測位信号

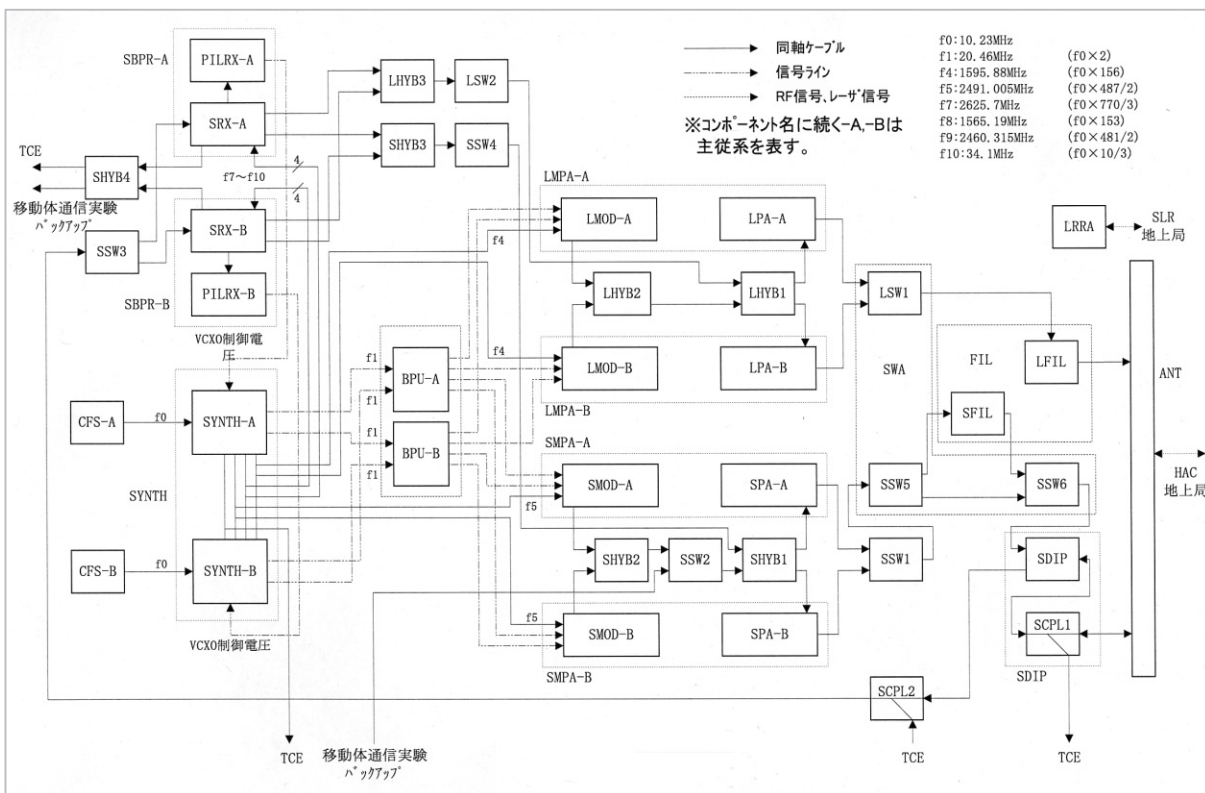


図4 HAC機能ブロック

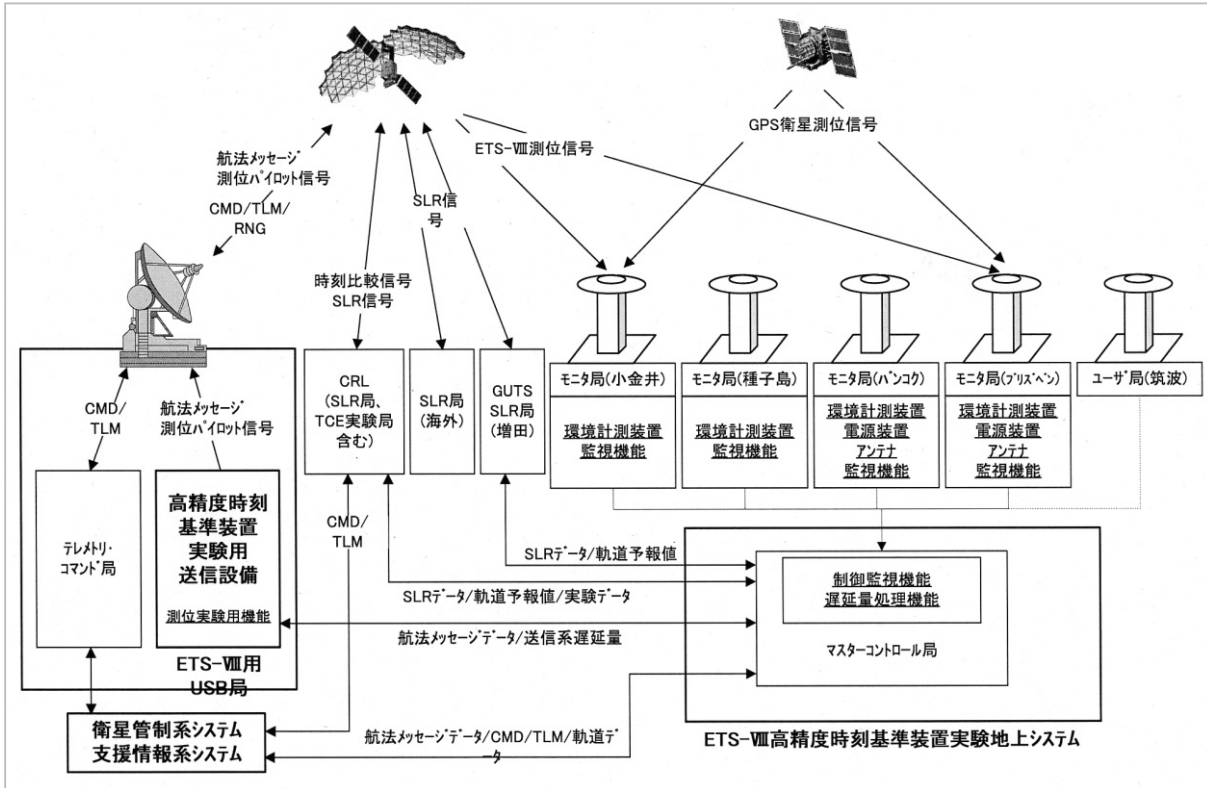


図5 ETS-Ⅷ衛星測位実験システム

を地上で生成・送信する設備である。

(3) SLR局

ETS-Ⅷに対してレーザ測距する。レーザ測距地上局として国内2局(小金井(CRL)、種子島(NASDA))、海外3局(Heleakala(米:ハワイ)、Mt.Stromlo(豪)、Kunming(中国))の利用を予定している。

(4) TCE地上局

時刻比較実験のための測位信号送受信を行う。

5 むすび

ETS-Ⅷ衛星測位実験、衛星搭載高精度時刻基準装置、衛星測位システムについて説明した。HACは、2002年度後半に実施された電気性能試験・耐環境試験に合格し、2003年8月現在、衛星システムへのインテグレーションが終了している。

HACの開発に際しご尽力頂いたNEC東芝スペースシステム株式会社に感謝します。

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の開発

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の開発



はま しんいち
濱 真一

電磁波計測部門準天頂衛星グループリーダー
衛星通信、VLBI