

## きく8号高速データ通信用衛星搭載パケット交換機の初期性能

平良 真一† 山本 伸一† 小園 晋一†

†情報通信研究機構 鹿島宇宙技術センター 〒314-8501 茨城県鹿嶋市平井 893-1

米田 誠良‡

‡NEC 東芝スペースシステム株式会社 〒183-8551 東京都府中市日新町 1-10

### 概要

マルチビーム型衛星通信システムでは、衛星上において交換処理を行なうことにより、効率的で、かつ柔軟性に富むシステムとすることが可能となる。情報通信研究機構では、高速データ伝送に対応した移動体衛星通信用の衛星搭載パケット交換機の開発研究を行なっている。本衛星搭載パケット交換機は、ブリッジ機能を有しており、マルチビーム構成の衛星通信システムにおいて、各ビーム間でのスイッチング制御を行なう。パケット交換機は、2006年12月18日にH-IIAロケットにより打ち上げられた技術試験衛星VIII型(きく8号)に搭載されており、現在までに静止軌道上における初期性能確認試験を終え、要求される性能を満足していることが確認された。

### 1. はじめに

技術試験衛星VIII型(Engineering Test Satellite Eight:ETS-VIII、愛称「きく8号」)は、2006年12月18日にH-IIAロケットにより打ち上げられた大型静止衛星である。[1]-[3] ETS-VIIIにより宇宙実証される技術の1つとして、衛星搭載交換機技術があり、情報通信研究機構では、高速データ伝送に対応した移動体衛星通信用の衛星搭載パケット交換機の開発研究を行なっている。[4],[5] 本文では、ETS-VIII及びパケット交換機の概要と、静止軌道上にて行なったパケット交換機の初期性能試験の結果について述べる。

### 2. ETS-VIIIにおける通信ミッションシステムの概要

ETS-VIIIは、大型展開アンテナ、高出力中継器並びに衛星搭載交換機を有するS帯移動体通信実験用の大型静止衛星である。表1にETS-VIIIにおける通信ミッションの主要諸元を、図1に通信ミッション機器の構成図を示す。ETS-VIIIには、S帯を用いるモバイルリンク用に開口径が13m級の大型展開アンテナが搭載され、アンテナ給電にはフェーズドアレー方式を採用している。給電部は2種類のビームフォーミングネットワーク(BFN)装置と、それぞれ31個の高出力固体増幅器(SSPA)、低雑音増幅器(LNA)、送信及び受信アンテナ素子によって構成されており、8台の20W級SSPA、23台の10W級SSPA

表1 通信ミッション主要諸元

軌道 :	静止衛星軌道 東経146度
使用周波数 :	S band [ 2.6 / 2.5 GHz ] (モバイルリンク) Ka band [30 / 20 GHz] (フィーダリンク)
通信用アンテナ :	13 mφ オフセットパラボラ (モバイルリンク) 0.8 mφ オフセットパラボラ (フィーダリンク)
送信出力 :	400 W (モバイルリンク) 8 W (フィーダリンク)
衛星搭載交換機 :	回線交換 (パーソナル通信) パケット交換 (広帯域データ通信)

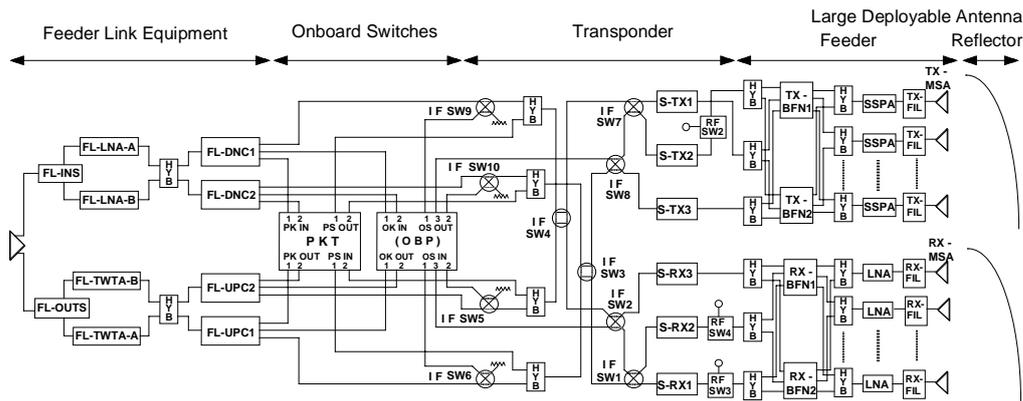


図1 通信ミッション機器構成図

により合計で最大約400Wの出力を実現している。パケット交換機を用いた高速データ通信を行なう場合における衛星からの送信信号のEIRPは55dBW程度、また、衛星受信部のG/Tは14dBK程度である。S帯を使用するモバイルリンクは、6つのビームで日本本土をほぼ覆うことができる設計となっているが、試験衛星に実際に搭載された

のは3ビーム分の装置である。パケット交換機は、信号の変調、復調、交換の各機能を有し、数百kbps以上の伝送速度をもつ高速な通信システムを実現している。パケット交換機を介した高速データ通信に用いる地球局は、車載型の移動地球局や可搬型の小型地球局を対象にしており、送信信号のEIRPが18dBW程度、受信部のG/Tとしては-22dBK程度である。誤り訂正には、畳み込み符号化(拘束長7、符号化率 1/2)ノビタビ復号(8値軟判定)を用いた Forward Error Correction(FEC)に加えて、建造物等による回線のシャドウイングによるバースト誤りに対処するため Auto Repeat Request (ARQ)による再送処理を行なう。

表2にモバイルリンクの回線設計例を示す。情報速度が512kbpsのとき、装置劣化として

表2 回線設計例

Up-link (2.6 GHz)		Down-link (2.5 GHz)	
Mobile station		Satellite	
HPA output power	43.0 dBm	HPA output power	47.3 dBm
Feed loss	1.0 dB	Feed loss	1.5 dB
Antenna gain	6.0 dBi	Antenna gain	40.1 dBi
Mobile station EIRP	48.0 dBm	Satellite EIRP	85.9 dBm
Propagation loss	192.6 dB	Propagation loss	192.1 dB
Satellite		Mobile station	
Rx antenna gain	42.7 dBi	Rx antenna gain	6.0 dBi
Feed loss	1.1 dB	Feed loss	1.0 dB
Rx power (at LNA in)	-103.0 dBm	Rx power (at LNA in)	-101.4 dBm
System noise temp.	520 K	System noise temp.	450 K
System G/T	14.6 dBK	System G/T	-21.5 dBK
Up-link C/No	68.5 dBHz	Down-link C/No	70.7 dBHz
Required C/No	64.7 dBHz	Required C/No	64.7 dBHz
Link margin	3.8 dB	Link margin	6.0 dB

表3 パケット交換機主要諸元

変復調方式	$\pi/4$ シフトQPSK / 同期検波
伝送速度	1024 kbps
誤り訂正方式	FEC, ARQ
パケット長	8 msec (32 msecまで拡張可能)
アクセス方式	スロットドアロハ方式, パケット予約方式
スイッチング機能	ブリッジ
寸法	変復調部: 440×285×278 mm, 交換制御部: 280×285×278 mm
重量	変復調部: 21 kg, 交換制御部: 11 kg
消費電力	変復調部: 86 W, 交換制御部: 34 W

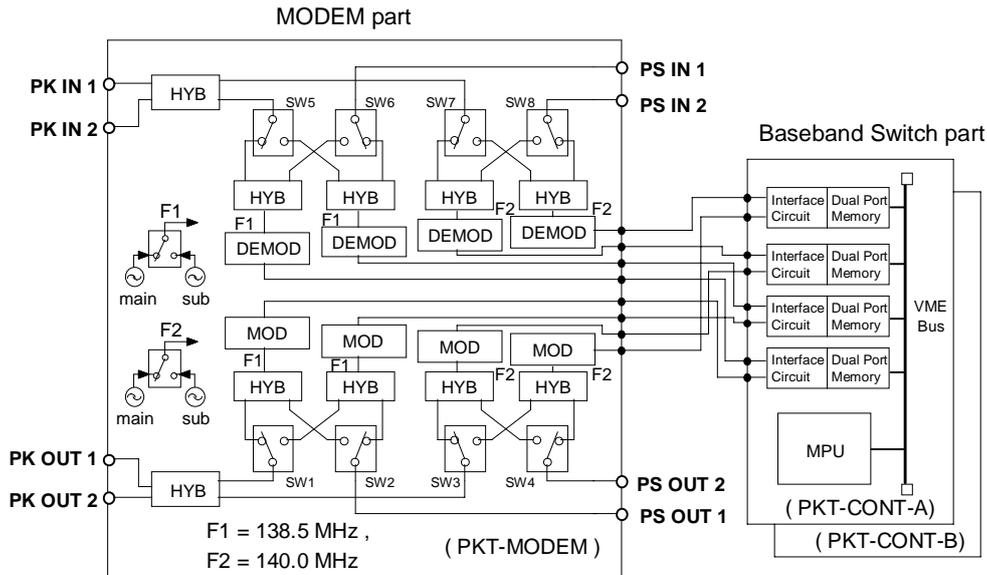


図2 パケット交換機ブロック図

3dB を見積もると、ビット誤り率が  $10^{-5}$  となる信号対雑音電力密度比(C/No)は 64.7dBHz となる。

### 3. パケット交換機の概要

パケット交換機(PKT)は、信号の変調、復調、交換の各機能を有し、数百 kbps 以上の伝送速度をもつ高速な移動体通信システムを実現している。図2にパケット交換機のブロック図を、図3に外観写真を示す。パケット交換機は変復調部(PKT-MODEM)と交換制御部(PKT-CONT)より構成され、入出力としてフィーダリンク用2ポート、モバイルリンク用2ポート



図3 パケット交換機外観

を持っており、パケット信号の交換制御を衛星上にて行なう。信頼性を高めるため、交換制御部は完全冗長系とし、また変復調部においては内部発振器及びコマンド処理系も冗長構成としている。スイッチングを行なうための制御情報はパケット内に含まれているため、伝送するパケット信号はすべて再生中継を行ない、得られた制御情報をもとにして交換制御する。

アクセス方式としては、スロットドアロハによるランダムアクセスに加え、リアルタイム伝送を効率よく行なうため、パケット予約方式を併用している。パケット予約方式におけるスロットの予約にはスロットドアロハ方式によるバースト信号を送出して予約を行なう。伝送するパケット信号のパケット長は8ミリ秒を標準とし、最大で32ミリ秒まで拡張が可能である。図

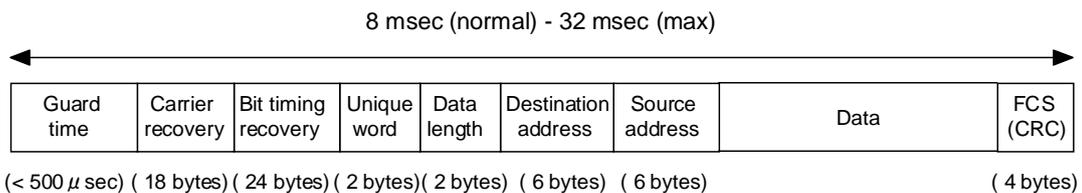


図4 パケット信号フレーム図

4にパケット信号のフレーム構成を示す。パケット信号には、ユニークワード、送信元の MAC アドレス、宛先の MAC アドレス、データ長等の情報が含まれており、また、パケット信号の最後には Cyclic Redundancy Code (CRC) を付加して、パケット信号の誤り検出を行なっている。

交換制御は、イーサネットのブリッジに相当する交換機能に、予約制御のための機能を追加している。入出力の1ポートは、ネットワークにおける1セグメントに対応しており、パケット交換機では、データ

リンク層でのアドレスである MAC アドレスのアドレステーブルを維持管理する。図5にパケット交換機を用いた衛星通信システム概念図を示す。モバイルリンクにおいては、マルチビームでの1ビームがネットワークでの1セグメントに相当することになる。イーサネットにおいては、同じセグメント内での信号伝送時、ブリッジに入力された信号は破棄される。一方、本システムでは、パケット交換機へ入力されるパケット信号の宛先の地球局が同じビーム内にある場合、その受信パケット信号は破棄せずに交換機で処理を行なって、同一ビームへと出力する。衛星上では各ビーム内に位置している地球局を把握しており、マルチビームを持つ無線通信システムにおける位置登録機能と同等の機能を有していることになる。

アクセス方式は、スロットドアロハ方式にパケット予約方式を併用しているが、パケット予約方式は、回線交換に相当しており、地球局側では、まず、必要なタイムスロットを予約するためのリクエスト信号を衛星側へ送る。衛星側においては、リクエストの内容が可能な場合に、使用すべきタイムスロットの情報を地球局側へ返信し、予約スロットを使用した通信が開始されることになる。図6にパケット信号のスロット予約手順を示す。予約スロットを開放するための信号も、基本的には、地球局側から送ることになる。衛星側では、ある一定の連続した期間、地球局からの信号が受信できない場合に限り、強制的に予約スロットを開放するようにしている。スロットの予約状況については衛星側で把握していることはもちろんであるが、パケット交換機からは128ミリ秒毎に制御情報を地上側へ通知しているため、その情報により地球局においても認識することが可能である。

交換制御としては、ブリッジに相当する交換機能を有しているが、ブリッジ以外の交換制御方式にも対応できるように交換制御プログラムを書き換えることが可能になっており、交換制御プログラムは地球局から衛星へと転送を行なう方式を採っている。

#### 4. 軌道上初期性能確認試験

再生中継を行なうためのパケット信号の復調においては、逆変調方式に周波数オフセット

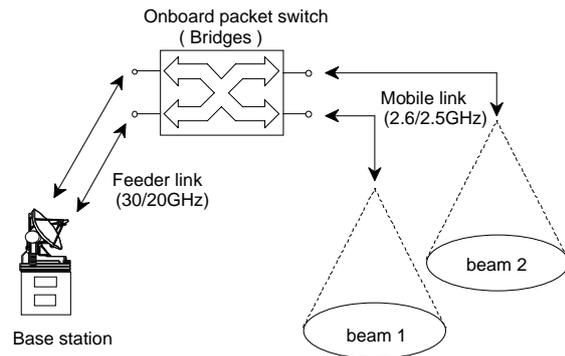


図5 通信システム概念図

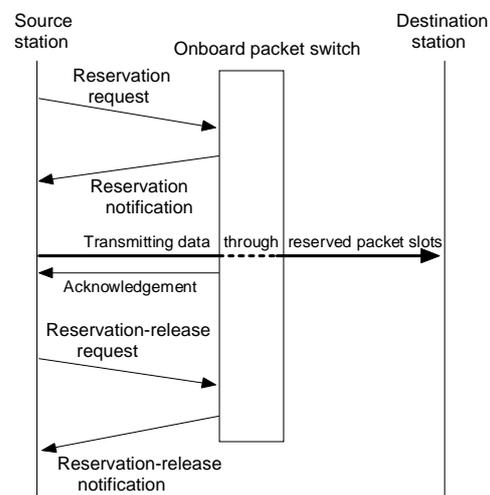


図6 スロット予約手順

の初期推定回路を付加し、十分広いキャプチャレンジを確保しつつ低  $E_b/N_0$  値においても良好な復調特性が得られる方式としている。[5]

初期性能確認試験では、まず、デジタル変復調器の基本性能であるビット誤り率 (Bit Error Rate : BER) 特性を取得した。図7に  $E_b/N_0$  対 BER 特性を示す。測定にあたっては、実際に移動環境において運用する状態に近いように、衛星の利得を雑音レベルが一定に保持されるよう設定し、信号レベルを変化させることによって  $E_b/N_0$  値を変化させた。○印及び+印が衛星打上げ前の地上試験における結果、#印及び×印が軌道上における試験結果であり、BER が  $1 \times 10^{-5}$  のときの理論値からの性能劣化は3dB 以内におさまっている。また復調器における入力信号のダイナミックレンジは8から9dB 程度であり、ダイナミックレンジの上限を超えると、BER は急激に劣化するため、移動環境での運用を行なう場合には、この入力信号のダイナミックレンジに注意を払い、衛星通信システムのレベル設定をする必要がある。

図8には、受信パケット信号の周波数オフセットに対するビット誤り率特性が示してある。衛星に搭載される周波数変換器におけるローカル発振器の周波数安定度は、 $1 \times 10^{-6}$ 、また、地上側の移動局でのローカル発振器の周波数安定度は  $5 \times 10^{-6}$  である。移動局の移動速度を最大で 1000km/hour を想定すると、S 帯 (2.6/2.5GHz) を使うモバイルリンクでの最大周波数変移は約  $\pm 20$  kHz となる。Ka 帯 (30/20GHz) を使用するフィーダリンクにおいては周波数が高い分その変移も大きくなるが、フィーダリンク側では地上の基地地球局に周波数制御装置を設けているので、結局、パケット交換機側の復調器においては、 $\pm 20$  kHz の周波数変移内で性能の劣化が無く復調できれば良いことになる。図8に示すように、周波数偏差が  $\pm 30$  kHz 以内であれば、ビット誤り率に大きな差違はなく、要求される性能を満足していることが確認された。

交換制御のためのソフトウェアは種々のプロトコルによる実験を可能にするため、地上局からのロードが可能になっている。制御プログラムのアップロードには、伝送データの誤りを無くすことと、アップロードを短時間で行なうために Selective ARQ 方式を採用している。ARQ 方式では、回線の品質が良好ではなく、信号データの誤り率が高ければ、アップロードにかかる時間はそれだけ長くなることになる。試験においては、回線の品質を変化させ、アップロードの所要時間を測定した。図9に結果を示す。図では、ロードに要する時間を、パケット信号に誤りが無い場合を1とした比率で示してある。○及び×印が実際に

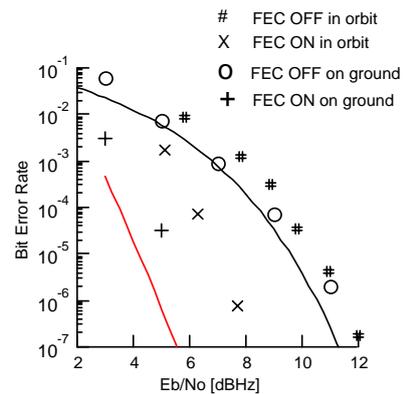


図7 ビット誤り率特性

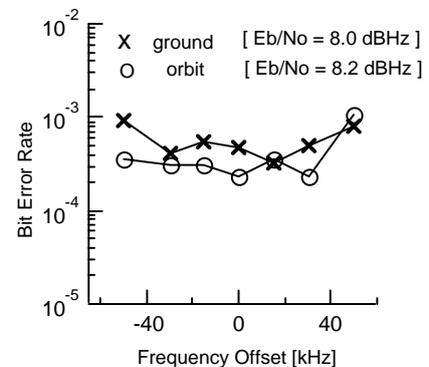


図8 周波数オフセット対ビット誤り率特性

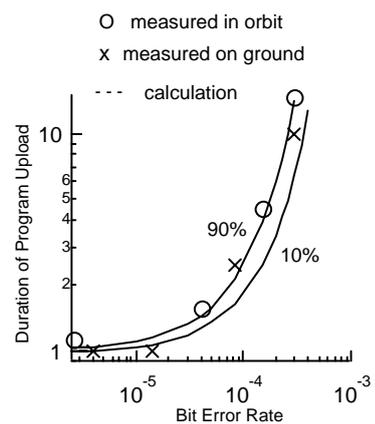


図9 プログラムロード特性

に、回線の品質が良好ではなく、信号データの誤り率が高ければ、アップロードにかかる時間はそれだけ長くなることになる。試験においては、回線の品質を変化させ、アップロードの所要時間を測定した。図9に結果を示す。図では、ロードに要する時間を、パケット信号に誤りが無い場合を1とした比率で示してある。○及び×印が実際に

測定した値であり、また、コンピュータによる計算値を実線で示している。図の計算結果は、例えば、BER が  $1 \times 10^{-4}$  の時、ロードに要する時間の比率が 1.8 以内である確率は 10 パーセント、また 2.6 以内である確率は 90 パーセントであることを示している。送信した1パケット信号のデータ長は、960byte であり、パケット誤り率としては、BER が  $1 \times 10^{-4}$  のとき、0.53 となる。BER が  $10^{-5}$  より大きくなると、ロードに要する時間は急激に増加していくことが読み取れる。

## 5. むすび

ETS-VIIIに搭載されている高速データ通信用のパケット交換機について、初期機能確認試験を実施し、変復調器の基本特性であるビット誤り率特性について所期の性能であることが確認された。また、交換制御を行なうためのプログラムの衛星へのアップロードが良好に行なえること、ブリッジ機能についても所期の性能を有していることが確認できた。今後実施する基本実験を通じてさらにデータを取得し、移動体通信システムにおける衛星搭載パケット交換機の性能評価を行なって行く予定である。

## 謝辞:

衛星搭載用パケット交換機の研究開発にあたり、御協力頂いている関係各位に深く感謝致します

## 文献:

- [1] K. Yoneyama, Y. Otsu, T. Miyoshi, Y. Kawakami, H. Hara and H. Hoshino, "R&D on S-band Mobile Communications and Sound Broadcasting Systems by Geostationary Satellite for the Next Decade", 47th Congress of the International Astronautical Federation, IAF-96-M.3.04, October 1996.
- [2] Y. Kawakami, S. Yoshimoto, Y. Matsumoto, T. Ohira and N. Hamamoto, "S-band Mobile Satellite Communications and Sound Broadcasting System in ETS-VIII", 21st International Symposium on Space Technology and Science, ISTS98-h-02, May 1998.
- [3] Y. Kawakami, S. Yoshimoto, T. Ide, M. Homma, N. Hamamoto and K. Araki, "The Onboard Mission System for Satellite Mobile Communications and Broadcasting in the ETS-VIII", 18th International Communications Satellite Systems Conference, Paper Number: AIAA-2000-1149, April 2000.
- [4] S. Taira, Y. Matsumoto, S. Hama and N. Hamamoto, "An onboard packet switching system for the mobile satellite communication network", 49th International Astronautical Congress, Paper Number: IAF-98-M.3.03, September 1998.
- [5] N. Hamamoto, Y. Hashimoto, M. Sakasai, Y. Tsuchihashi and M. Yoneda, "An experimental multimedia mobile satellite communication system using the ETS-VIII satellite", AIAA-98-1301, A collection of technical papers of 17th International Communications Satellite Systems Conference, pp.408-416, February 1998.

本原稿は下記の AIAA-ICSSC2008 での発表をもとに書き直したものである。

Shinichi TAIRA, Shinichi YAMAMOTO, Shinichi KOZONO and Masayoshi YONEDA, "Initial Performance of an Onboard Packet Switch for High-Data-Rate Mobile Satellite Communications" Proc. 26th AIAA International Communications Satellite Systems Conference (ICSSC 2008), 10-12 June 2008, San Diego, California, USA, AIAA-2008-5400.