

衛星搭載用パケット交換機評価実験

平良真一 山本伸一

技術試験衛星VIII型に搭載されたパケット交換機につき、衛星打ち上げ後の軌道上性能確認試験を行い、BER 特性、処理遅延時間特性等の基本特性を取得し、当初予定していた交換機としての機能及び性能が、静止軌道上においても維持できていることが確認できた。また、各特性については、定期的に同様の試験を実施して、経年変化特性を取得したが、実験終了までの4年間に於いて、経年劣化とみられる性能の変化は認められなかった。

1 はじめに

技術試験衛星VIII型 (ETS-VIII) には、2種類の交換機が搭載されている。1つは、音声通信用の回線交換機、そして、もう1つが、高速データ通信用のパケット交換機である^{[1][2]}。衛星上に交換機能を持たせることで、柔軟なネットワークが構築でき、回線使用効率の向上も期待できる。情報通信研究機構では、ETS-VIII開発の初期段階から、衛星搭載用パケット交換機の研究開発に携わってきている。本パケット交換機を使用した移動体衛星通信システムは、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、1Mbps のデータ伝送速度が実現できるシステムとなっている^{[3][4]}。衛星は平成18年12月に打ち上げられ、東経146度の静止軌道に投入後、搭載機器の性能確認試験が実施された。本稿では、衛星打ち上げ後に実施された、ビット誤り率特性や交換処理時間特性などのパケット交換機における基本性能実験結果について述べる。また、基本特性については、平成24年12月の実験終了までに、定期的な性能確認試験である「定期チェックアウト」を3回にわたって実施し、搭載機器の経年変化についてデータを取得したので、それらの結果についても述べる。

2 パケット交換機の概要

ETS-VIIIに搭載されているパケット交換機(PKT)は、イーサネットのブリッジに相当する交換機能を有している。交換制御は、受信したパケット信号のフレームに含まれているデータリンク層でのアドレスであるMACアドレスの情報を基にしてスイッチングを実施することから、伝送信号を衛星上にて一旦復調し、信号のスイッチング後に変調を行う、再生中継方式としている。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、入出力としてファイダリンク用2ポート、モバイルリンク用2ポートを持っており、各ポート間でパケット信号の交換制御を衛星上にて行う。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い、得られた制御情報をもとにして交換制御する。表1にパケット交換機の主要諸元を、図1にパケット交換機のブロック図を、そして図2に搭載したパケット交換機の写真を示す。図2の左側が変復調部で、右側の2つが完全冗長系となっている交換制御部である。

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としており、送信 EIRP (Equivalent Isotropically Radiated Power) が 18dBW 程度、受信 G/T が -22dBK 程度である。回線総合の伝送速度は 1024kbps、誤り訂正は、畳み込み符号化 (拘束長 7、符号化率 1/2) / ビタビ復号 (8 値軟判定) を用いた FEC (Forward Error Correction) に加えて、誤ったビットを含むパケット信号に対しては ARQ (Auto Repeat reQuest) による自動再送処理を行う。表2にS帯の周波数を使用するモバイルリンクの回線設計例を示す。

伝送するパケット信号のパケット長は 8msec を標準とし、最大で 32msec まで拡張が可能である。アクセス方式は、回線効率の向上と連続データ伝送を可能とするため、Slotted ALOHA 方式によるランダムアクセスとパケット予約方式を併用した。パケット予約方式におけるスロットの予約には Slotted ALOHA 方式によるバースト信号を送出して予約を行う。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。

2 通信実験用衛星搭載機器評価実験

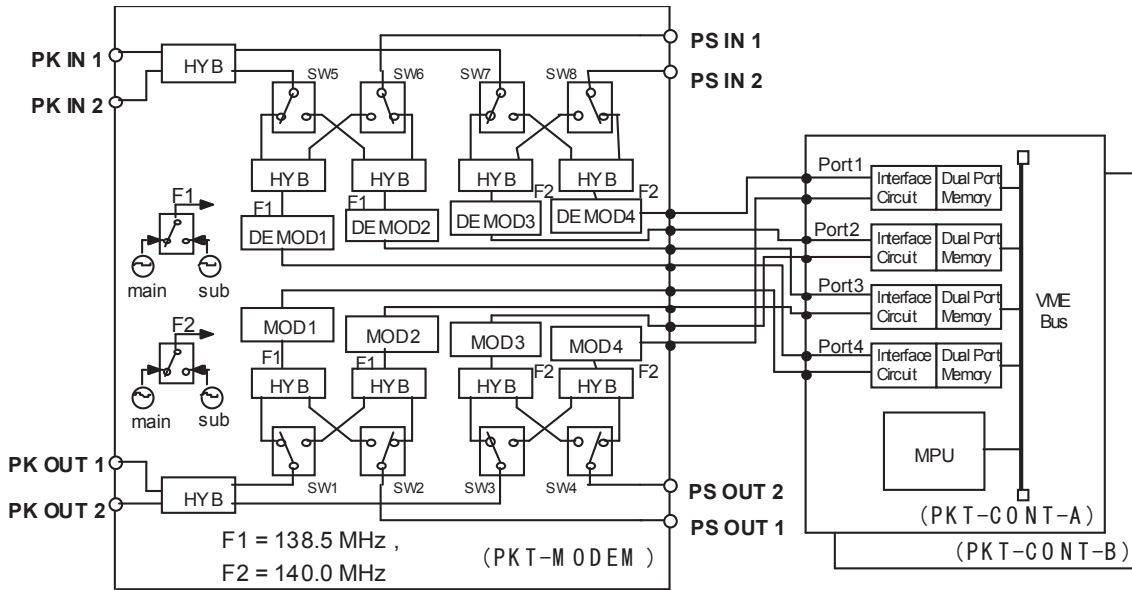


図1 パケット交換機ブロック図

表1 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	1024kbps
誤り訂正方式	FEC, ARQ
パケット長	8msec (32msec まで拡張可能)
アクセス方式	Slotted ALOHA 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

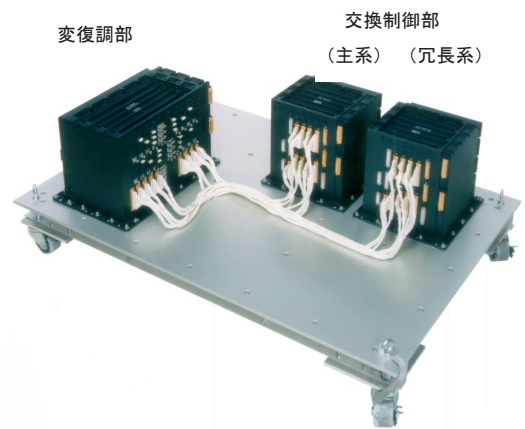


図2 衛星搭載パケット交換機

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

図3にパケット交換機を用いた衛星通信システムの概念図を示す。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。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。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。また、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、地上局からアップロードする方式をとっている。このほか実験用としてFECのon/off切り換え機能や擬似雑音(PN)データで構成されたバーストパケット信号を続けて送信する機能、無変調波(CW)信号送出機能、変調器の出力信号on/off切り換え機能等も備わっている。

3 軌道上性能評価

3.1 ビット誤り率特性

軌道上性能確認試験では、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4にEb/No(1ビット当たりの受信信号電力対雑音電力密度比)に対する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、衛星の中継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Eb/No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、

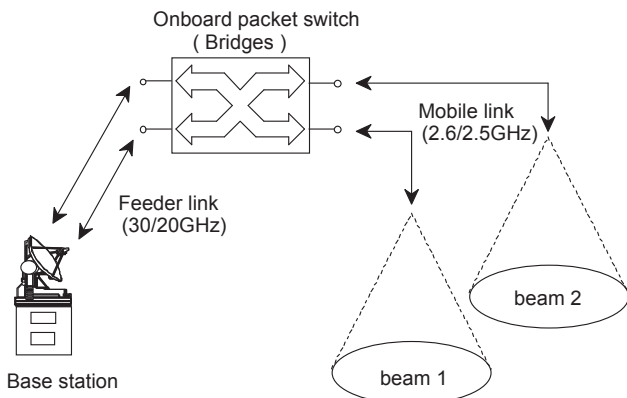


図3 通信システム概念図

#印及び×印が軌道上における試験結果であり、BERが 1×10^{-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特性は急激に劣化するため、移動環境での運用を行う場合には、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。

3.2 周波数捕捉特性

図5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、 1×10^{-6} 、また、地上側の移動局でのローカル

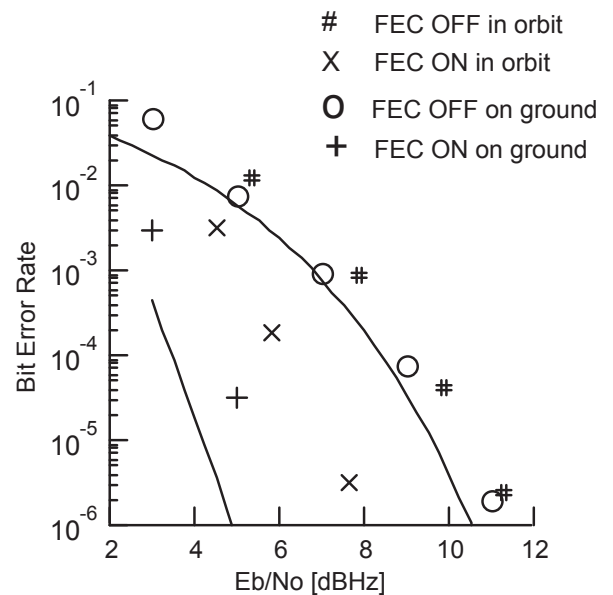


図4 ビット誤り率特性

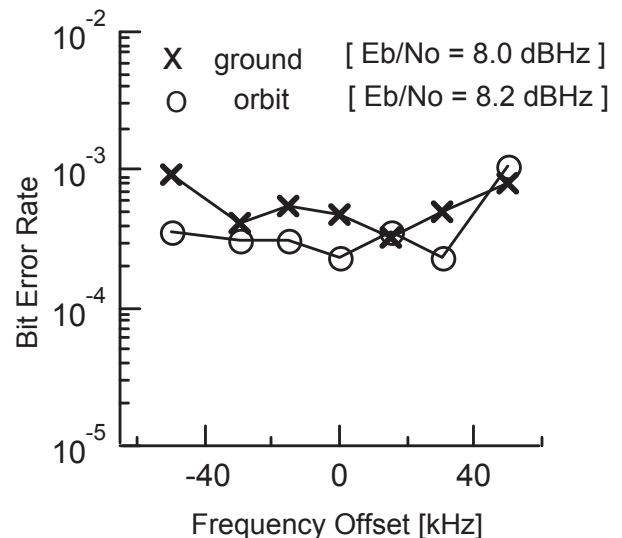


図5 周波数オフセット対ビット誤り率特性

2 通信実験用衛星搭載機器評価実験

発振器の周波数安定度は 5×10^{-6} である。移動地球局の移動速度を最大で1,000km/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 ± 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、 ± 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5に示すように、周波数偏差が ± 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。

3.3 制御プログラムロード特性

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6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 1×10^{-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

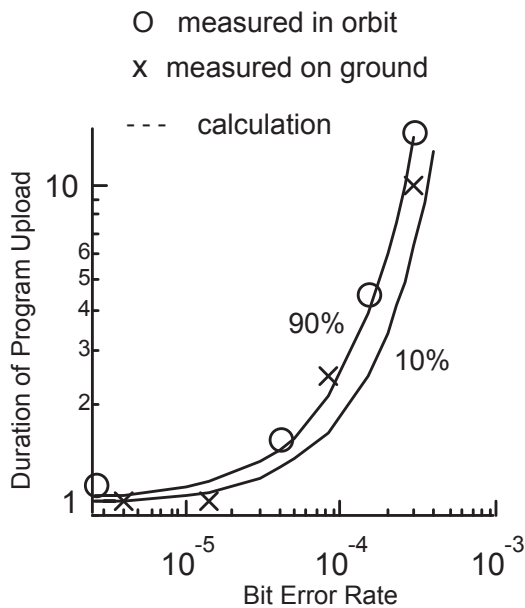


図6 プログラムロード特性

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 1×10^{-4} のとき、0.53となる。BERが 1×10^{-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。

3.4 交換処理時間特性

交換機においては、交換処理にかかる時間が、重要な性能の1つである。特に静止衛星を用いた通信システムでは地上局間の電波伝搬遅延時間のみで約0.25秒と長いことから、搭載機器や地上局での信号処理時間を短くすることが望まれる。搭載されているパケット交換機の処理時間の測定は、交換機を介して伝送されたパケット信号と、交換機を介さずにベントパイプモードにて伝送されたパケット信号との時間差を測定することにより実施した。ETS-VIIIにおいては、衛星にて受信した2.6GHz帯のRF信号をダウンコンバータで140MHz帯のIF信号へと変換し、パケット交換機を経由して再生中継された信号と、ベントパイプモードで中継された140MHz帯のIF信号を同じアップコンバータへ入力することが可能な回路構成となっており、これらの信号を地上へと下ろして2つの信号の時間差を測定すれば、パケット交換機における信号処理遅延時間がわかることになる。図7に測定例を示す。測定にはスペクトラムアナライザを用いており、図7はその画面である。

図で左端の信号及び右から2番目の信号は、パケット交換機の交換状態を地上へと知らせるための報知信号で約130msec毎にパケット交換機から出力されている。左から2番目の信号が、ベントパイプモードの経路を通った信号、右端の信号がPKTにて再生処理された信号である。図は左から2番目の信号と右端の信号との時間差、すなわちパケット交換機での処理遅延

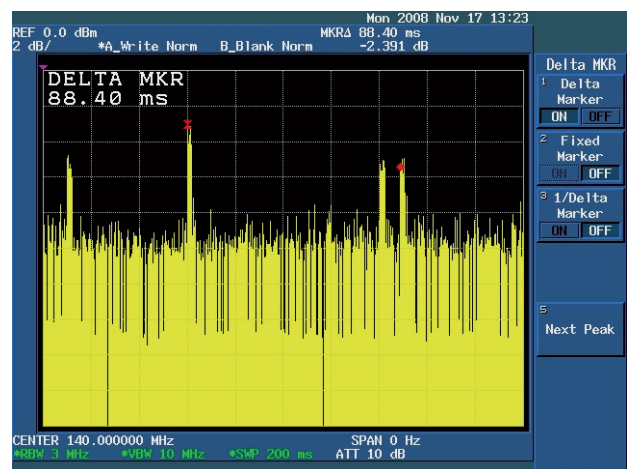


図7 処理遅延時間 測定例

時間が88.4msecであることを示している。測定では、それぞれ50個のパケット信号を送出し、処理遅延時間の最小値約70msec、最大値約105msec、処理遅延時間の平均値としては83.4msecという測定結果を得ているが、本パケット交換機は、信号伝送の信頼性を高めるためStored & Forward方式によるブリッジを用い、また衛星搭載機器ということで回路構成を簡単にするため、受信した信号の一定量を一旦メモリへと蓄積して処理を行っており、電波伝搬遅延時間に比べて十分に小さな信号処理時間とはなっていない。時分割多重アクセス(TDMA)システムやパケット通信のような時分割で信号を送送するシステムにおける交換機では、信号処理遅延時間を短くする工夫が必要であると考えられ、今後の課題である。

この他、本パケット交換機はブリッジ機能を有することから、ユニキャスト及びブロードキャスト機能、MACアドレステーブルの登録、変更及びエイジングタイマー機能、フラッディング機能等の基本交換処理機能を確認する試験を実施し、静止軌道上においてもブリッジ機能が正常に動作していることを検証した。

4 基本性能の経年変化特性

パケット交換機の初期性能試験は、平成19年4月に、テレメトリ・コマンド信号等の機能確認試験から開始されたが、他の実験項目とのスケジュールの関係もあり、基本的な電気性能試験データが取得できたのは、同年の7月から10月にかけてである。その後、パケット交換機としてのシステム評価試験並びに移動体衛星通信実験を行いつつ、平成20年9月に第1回の定期性能試験を、平成22年1月、平成23年11月に、それぞれ第2回、第3回の定期性能試験を実施し、衛星搭載機器としての経年変化を評価するためのデータを取得している。

本パケット交換機では再生中継を行っていることから、デジタル変復調器の基本性能であるBERにつき、各定期チェックアウトにてその特性を取得した。図8にEb/No対BER特性を示す。○印が初期性能試験での結果、△、#及び×印がそれぞれ第1、2及び3回の定期性能試験での結果を示している。FECによる誤り訂正の無し、有りの場合共にBERが 1×10^{-5} のときの理論値からの性能劣化は3dB以内におさまっており、また、約4年の時間経過に伴う性能劣化は認められない様子が見られる。

図9に、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を示す。図9では、FECによる誤り訂正が無くEb/No値が8.0dBの場合の特性と、誤り訂正が有りEb/No値が6.5dBHzの場合の特性が示

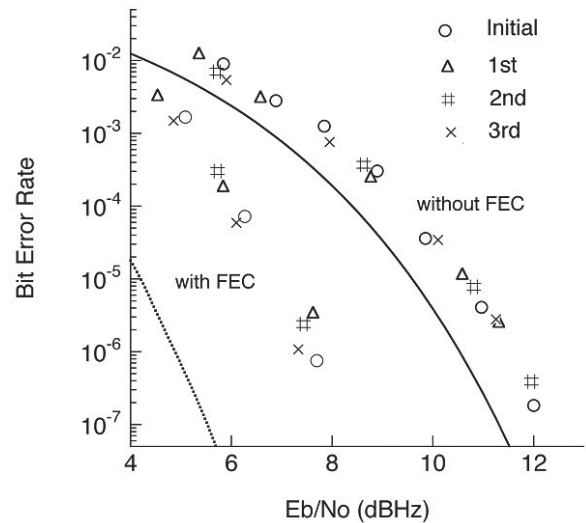


図8 BER特性の経年変化

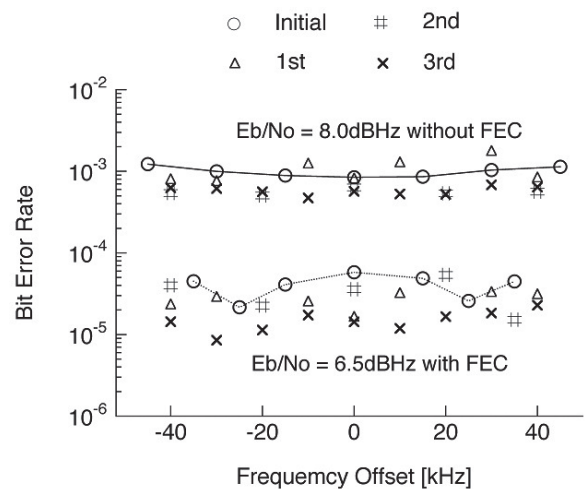


図9 周波数捕捉特性の経年変化

してある。誤り訂正が無くEb/No値8.0dBHzの結果は、周波数偏差が ± 40 kHz以内であれば、周波数に対するビット誤り率に大きな差はなく、要求される性能を満足し、また経年変化も認められない。誤り訂正有りでEb/No値6.5dBの場合、測定時間の制限から1点が示す誤りビット数は数十個程度である影響から、BER値にはかなりのバラつきが見られる。しかしながら、経年変化と思われるような事象は見られない。

図10には、交換制御用プログラムのロード所要時間の結果を示す。図6の場合と同様に、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。BERが 1×10^{-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が、この特性もほぼ同じ傾向を示しており、性能が維持されていることがわかる。

2 通信実験用衛星搭載機器評価実験

図 11 に処理遅延時間特性の経年変化を示す。測定では、それぞれ 50 個の packets 信号を送出し、処理遅延時間の最小値約 70msec、最大値約 105msec、処理遅延時間の平均値としては約 85msec という測定結果を得ている。ランダムアクセス方式はスロットドアロハであるが、packet 信号処理は、1 スロット 8msec の 4 スロット分である 32msec をまとめて処理する方法をとっている。遅延時間としては約 72msec、80msec、88msec、96msec の packet 信号がランダムに現われることになる。このうち、遅延時間が約 96msec の信号の一部については、約 130msec 毎に packet 交換機より制御信号を送出するため、さらに約 8msec の遅延が生じる。この約 104msec の遅延が生じる packet 信号は、確率的には 16 個に 1 個の割合となるが、第 2 回目の定期チェックアウトにおける誤り訂正が無い場合のデータでは測定した 50 個の中に観測されおらず、最大値は、他の 2 回での測定結果に比べて小さな値となっている。

移動体衛星通信では、移動環境におけるフェージン

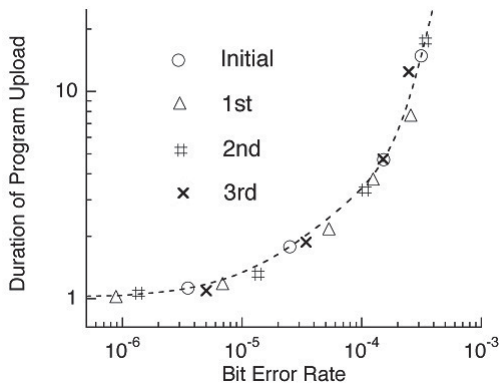


図 10 プログラムロード特性の経年変化

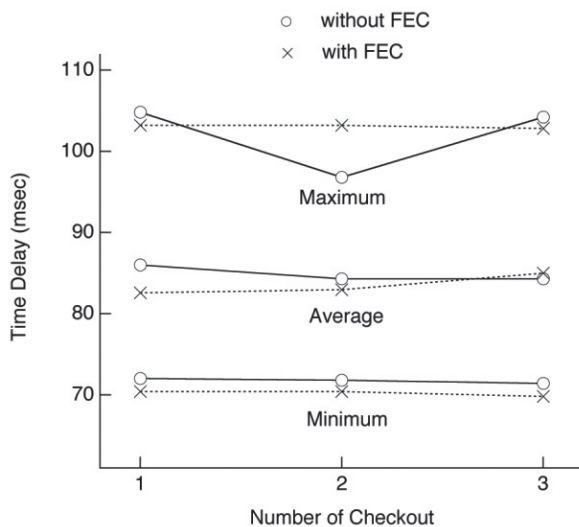


図 11 処理遅延時間特性の経年変化

グの影響で、通信信号レベルが変化することから、復調器における入力信号のダイナミックレンジは重要な特性の 1 つである。測定では、Eb/No 値を一定にし、衛星の S 帯ダウンコンバータの 1 つである S-RX2 の利得を変えることで packet 交換機への入力信号レベルを変化させ、BER を取得した。S 帯ダウンコンバータは 0 から 31 の 32 段階での利得変化が可能で、利得は、1 段階で約 1dB 変化する。図 12 の横軸は利得の段階値を示している。

ダイナミックレンジの測定は、第 1、2、3 回の定期性能試験にて行っているが、第 1 回目の測定では、段階値が 13 以下及び 24 以上では、復調器が信号捕捉できない状態となった。同様に、第 2 回目では、14 以下及び 24 以上、第 3 回目では、14 以下 25 以上で信号捕捉ができなくなった。各回の定期性能試験における測定 Eb/No 値が若干異なっているため、その分ビット誤り率も異なっているものの、ダイナミックレンジの観点から結果を見ると、時間の経過と共に、信号を捕捉できる S 帯ダウンコンバータの利得段階値が増加して、約 3 年弱の間に、約 1dB の差が現われている。BER 特性に大きな変化が生じないような入力信号のダイナミックレンジとしては 8dB 程度と変化が無い。主な原因としては、packet 交換機への入力レベルが時間の経過と共に低くなった、すなわち、S 帯ダウンコンバータ利得が低下したものと考えられる。ダイナミックレンジの上限や下限を超えると、BER 特性の急激な劣化や信号の未捕捉が発生するため、移動環境での運用を行う場合には、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。

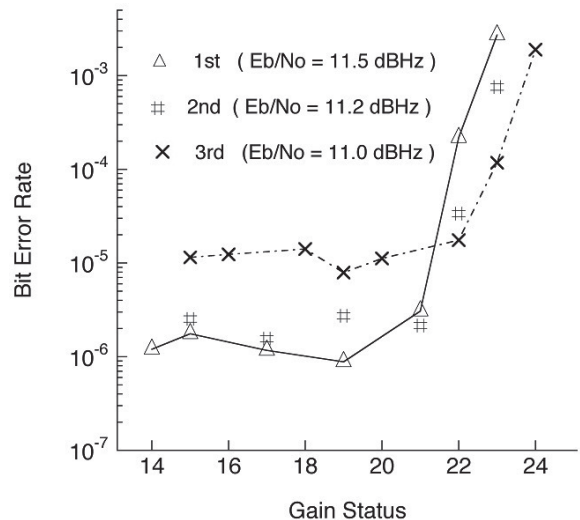


図 12 ダイナミックレンジ特性の経年変化

5 むすび

本稿では、技術試験衛星Ⅷ型に搭載されたパケット交換機につき、衛星打ち上げ後の軌道上性能確認試験を行って、BER 特性、処理遅延時間特性等の基本特性を取得した結果について述べた。静止軌道上における特性は、地上試験に比べると若干の劣化が見られるものの、当初予定していた交換機としての機能及び性能を、宇宙環境においても実現できていることが確認された。また、各特性については、定期的に同様の試験を実施して、宇宙環境下での搭載機器性能の経年変化特性を取得した。ETS-Ⅷにおいては搭載された通信用機器の設計寿命は3年間であったが、定期チェックアウトの結果、実験終了までの4年間において、経年劣化とみられる性能の変化は認められなかった。

開発したパケット交換機は、レイヤ2にて動作するブリッジ機能を有しており、マルチビーム構成の移動体衛星通信システムに必要な位置登録機能も兼ね備えている。交換機能としては比較的単純なものであるが、その分、小型軽量、低消費電力化がはかれるため、衛星搭載用としてのシステム要求に応えることが可能である。今後、衛星搭載用デバイスの高度化が進めば、より複雑な交換制御をもち、ネットワークの利用効率をより高められるような機器の開発が期待される。

謝辞

パケット交換システムの開発及び宇宙実証実験に携わった多くの方々、特に、NEC 東芝スペースシステム株式会社の米田誠良氏に感謝致します。

【参考文献】

- 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, Oct. 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 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, Sept. 1998.
- 4 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, Feb. 1998.
- 5 S. Taira, T. Ide, and S. Hama, "Development of an onboard packet switch for the mobile satellite communication system," 18th International Communications Satellite Systems Conference, Paper Number: AIAA-2000-1111, April, 2000.



平良真一 (たいら しんいち)

ワイヤレスネットワーク研究所宇宙通信システム研究室副室長
移動体衛星通信、交換システム



山本伸一 (やまもと しんいち)

ワイヤレスネットワーク研究所宇宙通信システム研究室主任研究員
移動体衛星通信