

高速データ通信実験

平良真一 山本伸一

技術試験衛星Ⅷ型に搭載されているパケット交換機を用い、移動体用の高速データ通信システムにおける性能評価試験を実施した。汎用のデータ転送用プロトコルであるFTPを用いたデータ転送試験では、理論値に近い性能を有していることが実証できた。また、移動環境下における通信回線のビット誤り率を測定した結果、移動時の特性には、静止時の場合に比べて約3dBの性能劣化があることが認められた。

1 まえがき

平成18年に打ち上げられた技術試験衛星Ⅷ型(ETS-Ⅷ)には、高速データ通信用のパケット交換機が搭載されている^{[1][4]}。この衛星搭載パケット交換機は、イーサネットのブリッジに相当する機能を有しており、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。移動体衛星通信システムにおいては、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、回線使用効率の上昇が期待できる。衛星が打ち上げられた後、搭載機器の基本性能評価試験を実施して、静止軌道上においても、当初予定していたパケット交換機としての機能及び性能を持つ動作が可能であることが実証されている^[4]。基本性能の確認後、ファイル転送試験や、移動地球局の走行中における性能試験など、移動体衛星通信システムとしての実証実験を実施した。本文では、通信ネットワークにおける汎用のファイル転送用プロトコルであるFile Transfer Protocol (FTP)を用いたデータファイル転送試験結果、パケット交換機へ複数の信号を入力した場合の交換処理時間測定結果について述べる。さらに、移動時における衛星回線の信号電力測定を行い、その測定結果に基づいて、フェージングシミュレータを用いることで移動環境を模擬し、パケット交換機における移動環境下でのビット誤り率特性を取得したので、その結果について述べる。

2 パケット交換システム

ETS-Ⅷに搭載されているパケット交換機(PKT)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、Ka帯(30GHz/20GHz)の周波数を用いる基地地球局と衛星の間をつなぐファイダリンク用に2ポート、S帯(2.6GHz/2.5GHz)

の周波数を用いる移動地球局と衛星の間をつなぐモバイルリンク用に2ポートを持っており、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示す。

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、送信の等価等方輻射電力(Equivalent Isotropically Radiated Power: EIRP)が18dBW程度、受信の性能指数(Figure of merit: 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(3bit軟判定)を用いたFEC(Forward Error Correction)に加えて、ARQ(Auto Repeat reQuest)による自動再送処理を行う。情報速度が512kbpsのとき、装置劣化として3dBを見込むと、ビット誤り率が 1×10^{-5} となる信号対雑音電力密度比(C/No)は、約65dBHzとなる^[4]。

伝送するパケット信号のパケット長は8msecを標

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	1024 kbps
誤り訂正方式	FEC, ARQ
パケット長	8 ms (32 ms 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

3 移動体衛星通信システム実験

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。

図 1 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。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。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。パケット交換機には、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 データファイル転送実験

デジタル信号を使用した衛星通信システムの基本試験として、ネットワークにおける汎用のファイル転

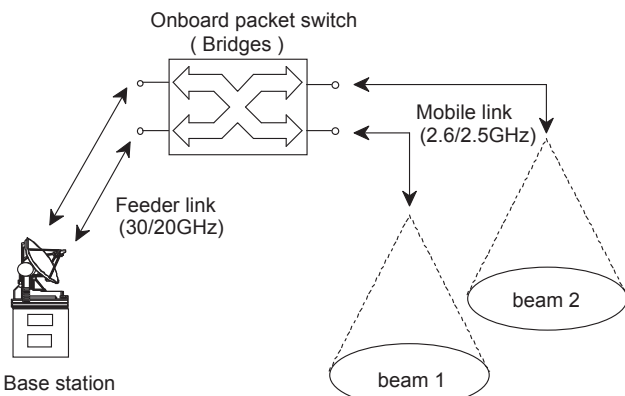


図 1 通信システム概念図

送用プロトコルである FTP を用いたデータファイル転送試験を実施した。FTP はネットワークでの第 5 層におけるプロトコルであるが、その 1 つ下の第 4 層のプロトコルである TCP によるデータ転送に関しては、最大のデータ転送速度 R が、往復の遅延時間 (Round Trip Time: RTT) とウィンドウサイズ (Window Size: WS) により

$$R = WS/RTT$$

と表わされる。

図 2 に、ウィンドウサイズに対する転送速度の測定結果を示す。なお、試験においては誤り訂正処理を行っていないが、回線の信号電力対雑音電力密度比 (C/No) の値は十分に大きく、ファイル転送時にデータの誤りは起きていない。また、RTT の実測値は、平均で 735msec であり、図 2 には、RTT が 735msec のときの TCP の最大転送速度を実線にて示してある。WS が、64Kbyte においては、データ伝送速度がやや劣化しているが、これは、送信したファイルサイズが約 3.5Mbyte であり、送信時間としては約 50 秒と短時間であったために、TCP によるスロースタートの影響が出ているものと考えられる。図に示すように、測定値は、最大転送速度とほぼ等しい値であり、このことから、パケット交換機のブリッジ機能は、ネットワーク上において所期の動作をしていることが実証された。

4 交換処理遅延時間特性

基本性能評価試験の結果、パケット信号の処理遅延時間は、平均で約 85msec であったが、この試験においては、1 個のみのパケット信号を送出して、処理遅

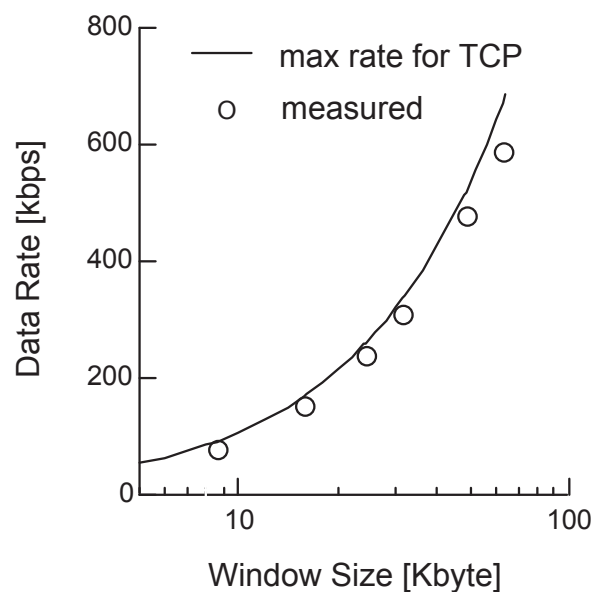


図 2 FTP データ転送特性

延時間を測定している⁵⁾。しかしながら、実際には、複数の移動地球局から複数のパケット信号が送出され、交換処理をすることから、交換機へ入力される信号のトラフィック量に応じた処理遅延時間の測定を実施し、性能評価を行った。図1の通信システム概念図に示したように、パケット交換機は、4つの入出力ポートを有しており、この間にて交換処理を行う。測定では、これら4つの入出力ポートの1ポートに輻輳用のパケット信号を入力し、他の1つのポートへ処理時間測定用のパケット信号を入力する。輻輳用のパケット信号と処理時間測定用のパケット信号を同一のポートから出力させ、入力する輻輳用パケット信号の単位時間当たりのパケット数を変化させた場合における、処理遅延時間測定用パケット信号の交換処理に要した時間を測定する。処理時間の測定においては、パケット交換機を経由した信号の伝送時間と、パケット交換機を経由しないベントパイプモードによる信号の伝送時間の差分をスペクトラムアナライザにより計測し、パケット交換機での交換処理遅延時間を求める。パケット交換機には、各入出力ポートに対応した4組の変復調器があるので、復調器のNo.3 (DEM0D3) から変調器のNo.4 (MOD4) へ輻輳用のパケット信号を送り、同時に、復調器のNo.2 (DEM0D2) の受信信号を変調器No.4 (MOD4) へと送って、輻輳信号が存在する場合の処理遅延時間について測定を行った。なお、試験においては、誤り訂正符号 (FEC) 処理を行っていない。

図3に測定結果を示す。パケット信号のアクセス方式にはSlotted ALOHA方式を用いており、そのスロット長は8msecである。衛星からは、128msec毎に制御用の報知パケット信号が送出されるため、衛星から地球局への回線であるダウンリンクに収容できる1秒間当たりの最大パケット数は、 $(128/8-1)/0.128=117.2$ と

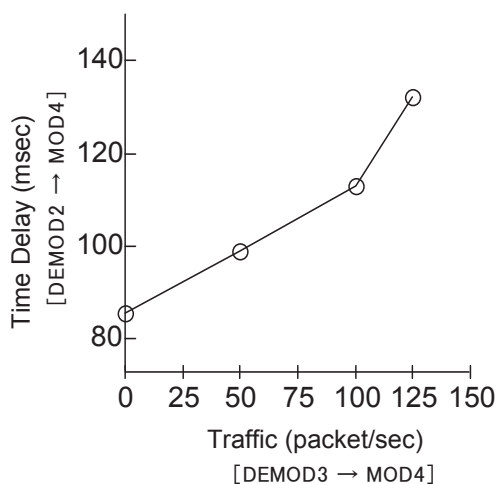


図3 処理遅延時間特性

算出され、117個となる。パケット交換機は、受信した信号を順次交換処理して送信側へ送り出すという単純な方法を用いており、パケット交換機にて処理する信号のトラフィック量が少なければ、トラフィックの増加に比例して、交換処理時間が増加するが、トラフィック量がダウンリンクの回線容量を超えると、処理時間は急激に増加する。

パケット交換機は、First-In-First-Outという単純な処理方法を用いているが、データの内容によっては緊急性、リアルタイム性等を求められることも想定されるため、ネットワークのサービス品質をコントロールするQoS制御は、今後の衛星搭載交換機には必須となる機能であると考えられる。

5 移動環境下における伝送特性

5.1 ダウンリンクにおける信号伝送特性

移動体衛星通信においては、衛星が見通せる場合、移動中における衛星からの電波の伝送信号電力値はライス分布に従うことが知られている⁶⁾。走行試験による伝送信号電力測定は、茨城県鹿嶋市内、水戸駅付近、千葉県幕張地区、千葉駅付近等にて実施した。移動地球局のアンテナには、方位角方向が無指向性、仰角方向はほぼ衛星方向に指向したビーム半値幅が約30度のヘリカルアンテナを用いた。図4に測定例を示す。なお、受信電力データの取得は、移動の6mm毎に行っている。

図4の上側のカーブは、千葉駅付近の衛星を見通せるような道路を走行した場合の受信電力の変動の様子であり、道路の両側には数階建てのオフィスビルが連続しているような環境である。また、下側のカーブは、高速道路上にて、防音壁のすぐ脇を走行時に取得した

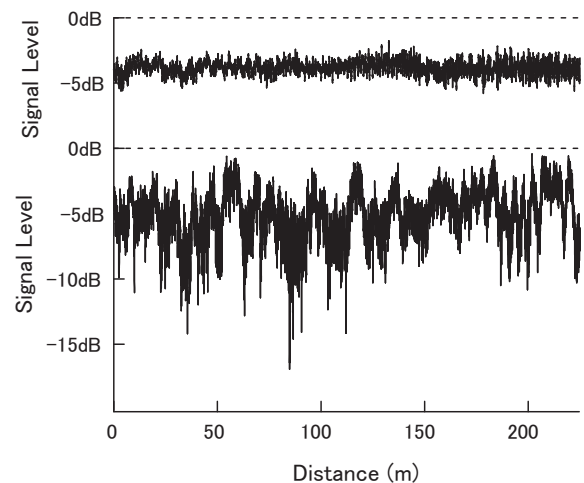


図4 移動中における伝送信号電力測定例
[上: 千葉市街、下: 高速道路上 防音壁脇]

3 移動体衛星通信システム実験

データであり、やはり、衛星は見通せる状態となっている。衛星は、進行方向から左側の斜め前方に位置しており（およそ10時の方向）、衛星の仰角は約48度、防音壁は右側（およそ3時の方向）にある。防音壁による反射波も受信しているものと思われ、レベルの変動幅が大きくなっている様子がわかる。

各々のレベル変動の統計的性質は、図5に示すように、ライス分布における直接波の電力と間接波（反射波や散乱波）の電力の比を表すパラメータであるCM比が21.5dB及び10.5dBの分布とほぼ等しくなった。実線がそれぞれの理論カーブ、×印及び○印がそれぞれの測定値の累積分布を示しており、点線はRayleigh分布の理論直線である。なお、受信信号における信号電力対雑音電力密度比（C/No）の値は約60dBHz、測定に使用したスペクトラムアナライザの分解能帯域幅（RBW）は1kHzに設定しているため、測定におけるSN比としては約30dBが確保されている。

水戸市街や幕張地区にても走行時のデータを取得したが、これらの特性についても、CM比で20dB前後のライス分布に等しかった。鹿嶋市内のような郊外地では、レベル変動が小さく、取得したデータより求めたCM比は約25dBとさらに高くなったが、測定時におけるSN比は30dBであり、CM比に比べて十分高くないため、取得したデータは、受信系における白色雑音による影響が大きくなっており、CM比を直接的に求めることはできないが、CM比として約25dB以上の移動環境にあるとは言える。

5.2 アップリンクにおける信号伝送特性

5.1では、ダウンリンクにおける測定例を示したが、実験においては、衛星に搭載されている再生中継装置の受信性能を測定するので、移動地球局から衛星へ向かう回線であるアップリンクにおける特性を把握する

必要がある。ETS-VIIIの大型展開アンテナの受信系については、不具合により使用できない状態にあり、衛星での通信信号受信にはバックアップ用の直径1mのパラボラアンテナを使用している⁶⁾、当初予定していた受信利得より約20dB下回っている。このため、実現できるアップリンクの回線品質は低く、移動地球局に出力40Wの高出力増幅器を使用しても、確保できるC/No値は47dBHz程度である。測定は、移動地球局での信号受信と共に移動地球局から信号を送信し、衛星をベントパイプモードに設定して信号を中継し、基地局側にて電力測定を実施した。5.1と同様に測定に使用したスペクトラムアナライザの分解能帯域幅（RBW）は1kHzに設定しているため、測定した信号におけるSN比は約17dBである。SN比が高い場合と同様の統計処理は難しいが、「可逆定理」により、アップリンクにおけるフェージングもライス分布に従うと推定されることから、C/No値がほぼ47dBHzとなる回線を設定し、フェージングシミュレータを通した送信信号をアップリンクへと送出してデータを取得し、フェージングシミュレータによるデータと移動中に取得したデータとを比較することで、アップリンクにおけるCM比を推定した。結果を図6に示す。

図の×印及び○印がそれぞれの測定値の累積分布を示しており、フェージングシミュレータでCM比を変化させたデータを取得して比較した結果、測定値に近い分布を示したのは、CM比で、それぞれ14dB及び6dBであった。図6にはCM比が14dB及び6dBのデータを実線で示してある。したがって、アップリンクにおける分布もライス分布に従うと推定されるが、アップリンクでのCM比は、5.1にて述べたダウンリンクにおけるCM比の21.5dB及び10.5dBに比べて、低い値となっている。要因としては、移動地球局アンテナの送信パターンと受信パターンの違いが考えられる

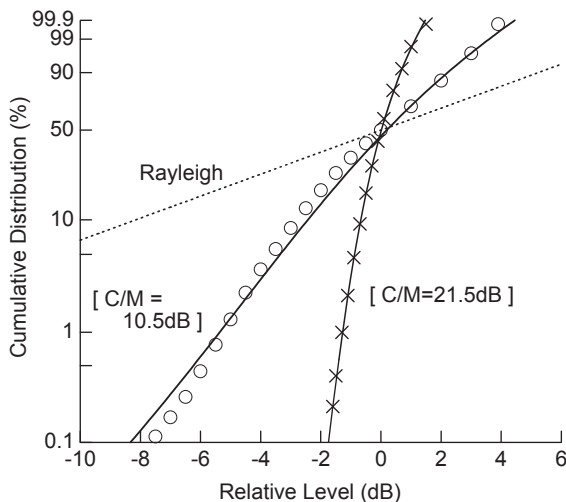


図5 伝送信号電力の累積分布

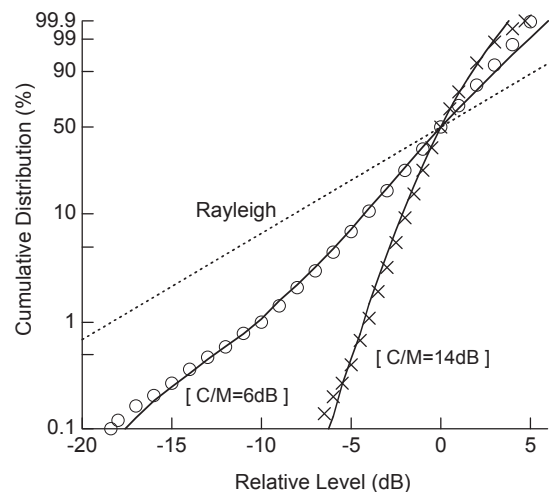


図6 アップリンクにおける伝送信号の累積分布

が、両者の相違点としては、送信アンテナパターンにおいて、仰角方向の最大指向方向が約 40 度、ビーム半値幅が約 25 度であるのに対し、受信アンテナパターンにおいては、仰角方向の最大指向方向は約 50 度、ビーム半値幅が約 30 度となっている。今回の測定では、送受信でダイナミックレンジに 10dB 程度の差が生じていることから、衛星通信システムの設計時には、送受信のアンテナパターンの違いに留意する必要があると考えられる。

5.3 ビット誤り率特性

衛星上での復調器の基本性能であるビット誤り率を測定した。測定に当たっては、図 7 に示すような構成として、移動中に生じるアップリンクにおけるフェージングについてはシミュレータによる模擬をし、地球局には直径 3.6m のパラボラアンテナを持つ大型のものを用いた。これは、前述のように衛星の大型展開アンテナの受信系は使用できないため、移動地球局を走行させて直接データを取得するには回線品質が低すぎるという事情による。

5.1 で述べたように、アップリンクで生じているフェージングは、ライス分布に従ったフェージングであると推定されるので、フェージングシミュレータにより、いくつかの CM 比の値にて、ビット誤り率特性を取得した。なお、衛星上のパケット交換機自体にはビット誤り率を測定可能な装置は搭載されていないが、衛星上にて復調された信号をそのまま変調して送信する機能は有しており、ダウンリンクにおける回線品質は十分に高いので、地上局で観測されるビット誤りは、

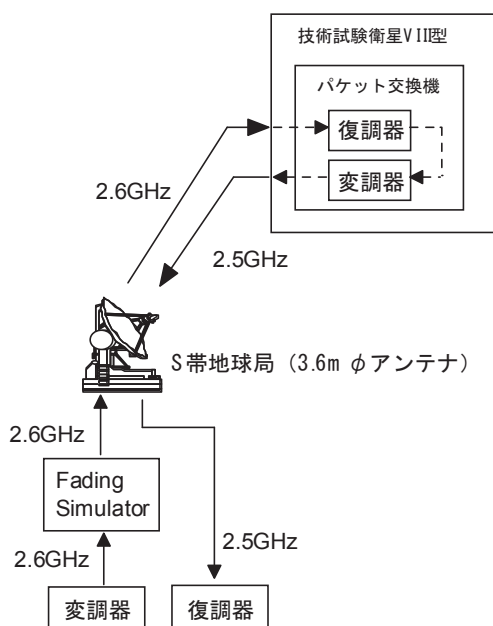


図 7 BER 測定構成図

パケット交換機復調器でのビット誤りと等しくなる。結果を図 8 に示す。図 8 には、CM 比が 20dB 及び 10dB の、誤り訂正を用いた場合と用いない場合の特性と、フェージングが無い静止状態での特性が示されている。

ETS-VIII の衛星搭載交換機は、パケット信号を復調するため、高速の引き込み特性とキャプチャレンジの確保に重点をおいた開発を行っており⁷⁾、変復調部には、特段のフェージング対策を施していない。図 8 に示すように、CM 比が 10dB、誤り訂正有り、ビット誤り率が 1×10^{-5} の場合で、静止状態からの劣化量は約 3dB であったが、特に移動体衛星通信システムにおけるアップリンクでは、回線マージンが小さいことが多いため、劣化量としての影響は小さくないと考えられ、今後の衛星搭載交換機の開発においては、フェージング対策を施す必要性があると思われる。

6 むすび

衛星搭載パケット交換機を用いた移動体用の高速データ通信システムにおける性能評価試験を実施し、汎用のデータファイル転送用プロトコルである FTP を用いた試験では、ほぼ理論値に近い性能を有していることが実証された。また、システムにおける信号の処理遅延時間は、ダウンリンクの最大回線容量になるまでは、処理する信号のトラフィック量に比例して大きくなり、ダウンリンクの回線容量を超えると、信号は交換機のメモリへと蓄積され、処理遅延時間が急激に増加することが確認できた。今後の衛星搭載用交換機では、今回のような単純な処理ではなく、信号の処

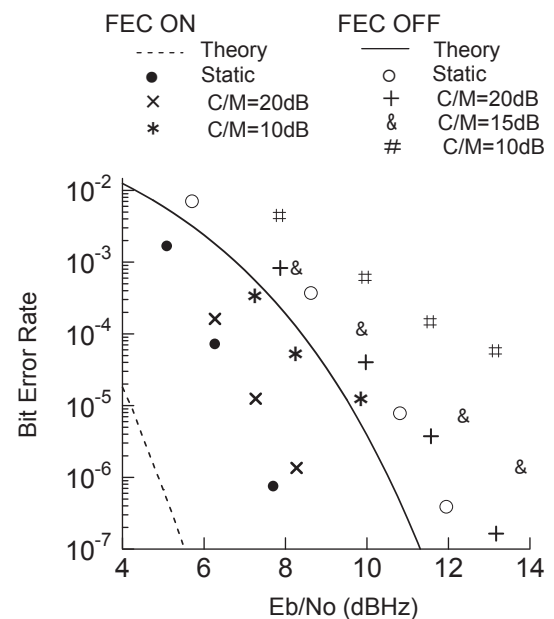


図 8 BER 特性

3 移動体衛星通信システム実験

理優先度を考慮した QoS 制御の機能を考慮する必要があると思われる。さらに、パケット交換機は、移動体衛星通信用に開発したことから、再生中継性能について、フェージング環境下での復調器のビット誤り率特性を取得した。試験では、まず、移動中のアップリンクにおける電力測定を実施し、取得したデータの統計処理の結果、フェージング特性がライス分布に従うことを示し、次に、ライス分布に従うフェージング環境をシミュレータにより模擬して、アップリンクにおけるビット誤り率特性を取得した。その結果、CM 比が 10dB で、誤り訂正を行い、ビット誤り率が 1×10^{-5} の場合において、静止状態からの Eb/No 値の劣化量は約 3dB であった。ETS-VIII でのパケット交換機は、フェージング対策の機能を有していないが、特にアップリンクの回線マージンが少ないという特徴を持つ移動体衛星通信システムにおいてはその対策が重要な課題となると考えられる。

謝辞

衛星搭載用パケット交換機の開発研究にあたり、宇宙航空研究開発機構をはじめとして御協力頂いた関係各位に感謝致します。特に、今回の性能試験並びに統計処理にご協力頂いた川崎和義主任研究員に深謝します。

【参考文献】

- 1 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.
- 2 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.
- 3 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.
- 4 S. Taira, M. Tanaka, and Y. Hashimoto, "An Experimental Mobile Satellite Communication Network with an Onboard Packet Switch System," 2002 IEEE 56th Vehicular Technology Conference, Sept. 2002.
- 5 S. Taira, S. Yamamoto, S. Kozono, and M. Yoneda, "Performance of an Onboard Packet Switch for Mobile Satellite Communications in Geostationary Satellite Orbit," 59th International Astronautical Congress, IAC-08-B2.2.9, Sept. 2008.
- 5 高田潤一, "移動体衛星通信のための電波伝搬再入門," 信学技報, SAT2004-168, Feb. 2005.
- 6 野田浩幸, 佐野和彦, 浜真一, "高精度時刻基準装置 (HAC)," 通信総合研究所季報, Vol. 49, No. 3/4, pp. 89-94, Sept./Dec. 2003.
- 7 M. Yoneda, O. Takeda, Y. Tsuchihashi, N. Hamamoto, and S. Taira, "The Characteristics of Digital Modulation and Demodulation for Engineering Test Satellite-VIII (ETS-VIII) Onboard Packet Switch," 19th International Communications Satellite Systems Conference, Paper Number: AIAA-2001-051, April 2001.



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