

## 4-3 高速バーストモデム

### 4-3 High-Speed Burst Modem for Bent Pipe Relay Mode

橋本幸雄 高橋 卓 吉村直子

HASHIMOTO Yukio, TAKAHASHI Takashi, and YOSHIMURA Naoko

#### 要旨

WINDS 非再生交換中継回線を用いた高速ネットワークを実現するため、622 Mbps/1244 Mbps 速度切替型高速ネットワーク端末を開発している。この高速ネットワーク端末は、高速バーストモデム及びデジタルターミナル、ルータ、TCP アクセラレータから構成される。鹿島局においては、JAXA 基準局より送信される非再生交換中継用 155 Mbps リファレンスバーストの受信機を設ける。

高速バーストモデム及びデジタルターミナルの開発している。また、155 Mbps リファレンスバースト受信機は、JAXA が基準局用にバースト復調装置と同等な装置を使用し、ルータ及び TCP アクセラレータについては、市販の装置を整備する予定である。

高速バーストモデムは QPSK のデジタル変復調器となっており、変調速度 1648 Mbps により最大 1244 Mbps のユーザデータ速度を得ている。また、クロックを 1/2 として変調速度 824 Mbps 及びユーザデータ速度 622 Mbps で動作するモードを持つ。622 Mbps の場合、WINDS 中継帯域の上側及び下側周波数帯を使用した 2 波運用が可能である。

622 Mbps 伝送用の試作モデムを用いて WINDS 搭載中継器及び地球局 RF 設備と組み合わせた試験を行い、BER が  $10^{-10}$  において  $E_b/N_0$  が 10 dB 以下と良好な結果を得ている。

The 622 Mbps/1244 Mbps dual rate SS-TDMA terminal is developed for the high-speed network of the WINDS bent-pipe mode. This terminal is consisted of a high-speed burst modem, a digital terminal that is a burst and communication controller, a router and a TCP accelerator. In addition at Kashima earth station, the receiver of the 155 Mbps reference burst transmitted JAXA standard station is provided.

We had been developed the high-speed burst modem and digital terminal. The 155 Mbps reference receiver are supplied same equipment using JAXA standard station. The router and the TCP accelerator will be supplied from commercial goods.

The high-speed burst modem is a digital modem of Quadrature Phase Shift Keying and the transmission rate of 1648 Mbps as the user data rate of 1244 Mbps. And the modem has another mode working a half rate clock for the transmission rate of 824 Mbps as the user data rate of 644 Mbps. In this mode, two carriers can be used for upper and lower band of the WINDS transponder.

The ground tests using 622 Mbps prototype burst modem with RF equipments of the earth station and the WINDS transponder showed good results that the  $E_b/N_0$  is less than 10dB at the BER of  $10^{-10}$ .

#### [キーワード]

高速バーストモデム, ターボプロダクト符号, 衛星交換時分割多重接続, デジタル信号処理, デジタル変復調器

High-speed burst modem, Turbo product code, SS-TDMA, Digital signal processing, Digital modem

## 1 はじめに

高速ネットワーク端末は、高速バーストモデム及びデジタルターミナルを中心として、ルータ、TCP アクセラレータを加えて構成される。鹿島実験地球局(以下「鹿島局」という。)においては、宇宙航空研究開発機構(JAXA)基準局より送信される非再生交換中継用 155 Mbps リファレンスバーストの受信機が追加される。

NICTでは、2003年度より高速ネットワーク端末の開発検討を行い、高速バーストモデムとその付加装置としてバースト制御及びユーザデータインタフェース機能を受け持つデジタルターミナルの開発を行うこととした。2004年度より、中心となる高速バーストモデムの開発を開始した。また、デジタルターミナルについても2005年度から開発検討・設計を行ってきた。

高速バーストモデムは、当初、変調器に使用可能なデジタル・アナログ変換器(MUX-DAC)の制限から、ユーザデータ速度 622 Mbps のモデムを2式使用して 1244 Mbps 伝送を達成することを目標に開発が開始された。2005年度に 622 Mbps 高速バーストモデムの開発と平行して、高速化のボトルネックとなっていた MUX-DAC の開発を行い、2 G サンプル/秒の高速 MUX-DAC を開発した。2006年度にその高速 MUX-DAC を使用し、622 Mbps 高速バーストモデムを基にユーザデータ速度を 1244 Mbps に上げた 622/1244 Mbps 速度切替え型高速バーストモデムの開発を行った。

2007年度にデジタルターミナルを完成させて高速バーストモデムと組み合わせ、高速ネットワーク端末の中心部を完成する予定である。

155 Mbps リファレンスバースト受信機は、開発期間及びコストを考慮して、JAXA が基準局用に開発した 155 Mbps バースト復調装置と同等な装置を整備する。また、ルータ及び TCP アクセラレータについては、市販の装置を調達する予定である。

## 2 高速ネットワークの概要

高速ネットワークは、衛星回線によりインターネットのバックボーンパッチやアクセスパッチの

利用、また島々などデジタルデバインド解消を目的として光回線並みのブロードバンドアクセス環境を提供するため開発を進めている。

図1に WINDS 中継器の構成を示す[1][2]。WINDS 非再生交換中継では、マルチビーム・アンテナ(MBA)及びアクティブ・フェーズド・アレー・アンテナ(APAA)が使用可能な4系統及び APAA のみ使用可能な2系統の合計6系統回線が使用できる。MBA の2系統及び APAA の2系統は 1100 MHz 帯域と広帯域の中継器となっている。MBA の他の2系統はバンドパスフィルタにより、上側周波数帯に中継帯域を制限し、下側周波数帯を使う再生交換回線と共用を可能としている。それぞれの回線は、衛星搭載中継器を構成する IF スイッチマトリクス(IFS)及び MPA、APAA の機能を組み合わせることにより、送受信ビームをスロット単位で任意のビームに切り替えることができる。WINDS 非再生交換中継回線では、この衛星上での交換機能と時分割多重接続(TDMA)システムを組み合わせることにより、SS-TDMA(Satellite Switched TDMA)システムを構成する。

SS-TDMA では、各地球局は衛星のビーム切替えと同期して信号を送受信する必要がある。衛星の切替えタイミングは基準局で管理されており、基準局から送信されるリファレンスバーストに各地球局が同期を取ることによって、地球局送受信信号を衛星と同期させる。WINDS 開発計画では、

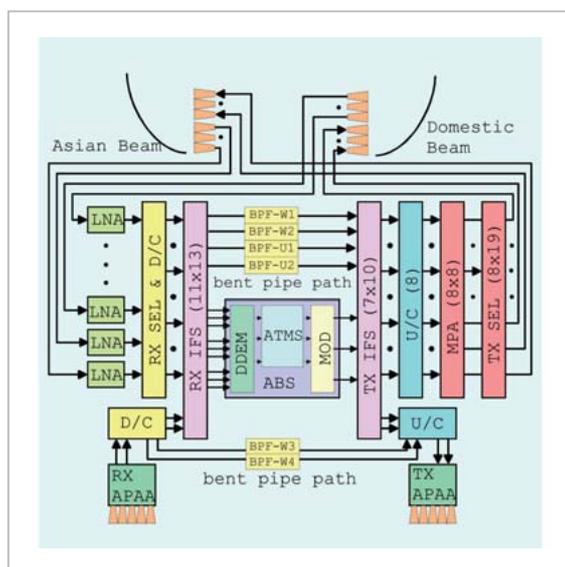


図1 WINDS 中継器構成図

非再生交換中継回線を複数のシステムで利用することを想定しており、基準局から送信されるリファレンスバーストは復調器が実現しやすい155 Mbps のデータ伝送速度を採用している。155 Mbps リファレンスバーストを高速バーストモデムでは、直接、復調することができないため、鹿島局に別途 155 Mbps リファレンスバースト受信機を設けて基準局からのリファレンスバーストを受信し、これと同期した 622 Mbps リファレンスバーストを高速バーストモデムで新たに送信することとした。他の高速ネットワーク地球局は、この 622 Mbps リファレンスバーストを受信することで、衛星と同期を取る。

### 2.1 ネットワーク構成

図2に高速ネットワークの概念図を示す。高速ネットワークは他の WINDS 非再生交換中継回線を使用するシステムと同時に運用ができるよう開発を行った。非再生交換中継回線を構成する衛星、JAXA 基準局と高速ネットワーク地球局である鹿島局及びその他の地球局、そして高速ネットワーク端末から構成される。搭載中継器は同時に 6 系統の中継を行うことができるほか、最大で MBA

による関東及びその他の 7 ビーム、APAA による 8 ビームを同一実験期間に利用できる。ビーム及び中継器の組合せにより各高速ネットワーク地球局を接続する。高速ネットワーク端末は初期接続機能がないため、事前に決められたスロット割当情報を基にして送受信を行うプリアサイン方式を採る。

### 2.2 フレームフォーマット

WINDS 非再生交換中継回線のフレームフォーマット例を図3に示す。1 スロットは 2 ms であり、20 スロットで 1 フレームとしている。1 フレームは 40 ms であり、16 フレームで 1 スーパーフレームを構成する。1 スーパーフレームは 320 スロットで構成され、640 ms となっている。また、各バースト間のガードタイムは 75 μ秒以上としている。通信はスーパーフレーム単位で制御される。

155 Mbps リファレンスバーストは各フレームの先頭スロットをデフォルトとしている。また、6 系統の通信波を中継できるが、リファレンスバーストを高出力で送信するため、1 系統のみを使用する。さらに SS-TDMA システムであり、

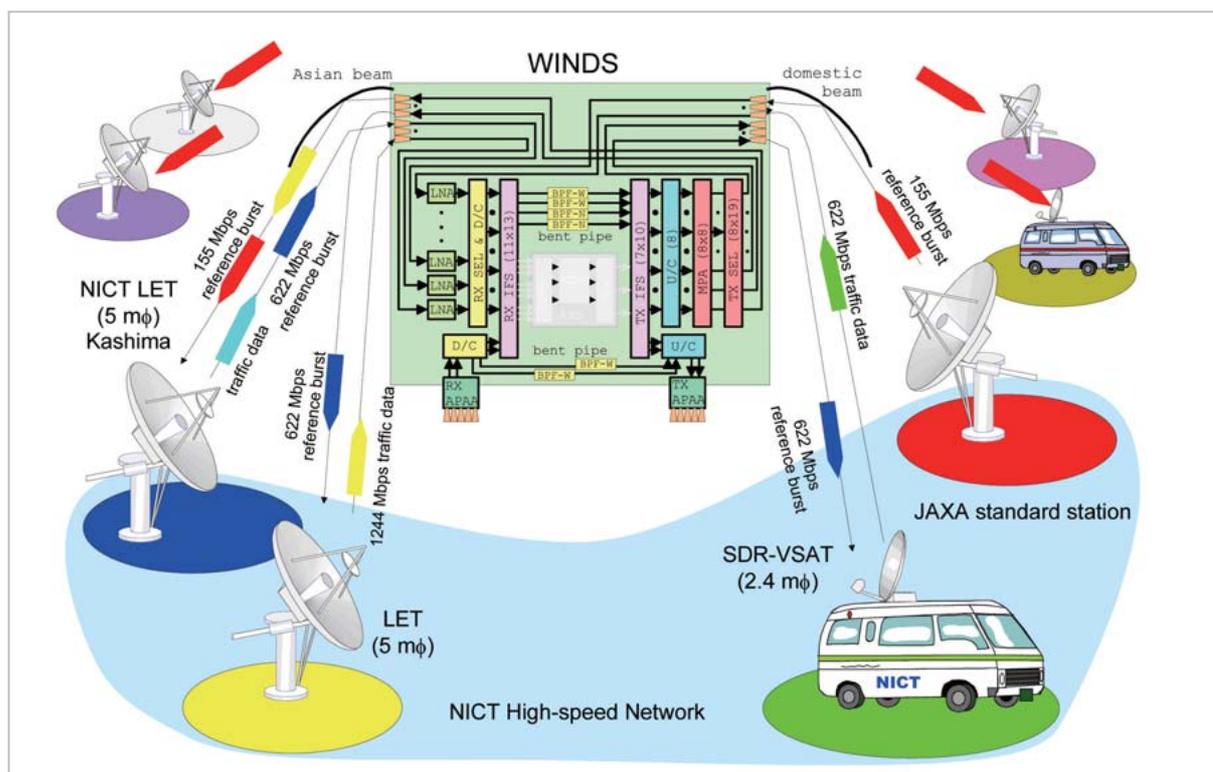


図2 高速ネットワーク概念図

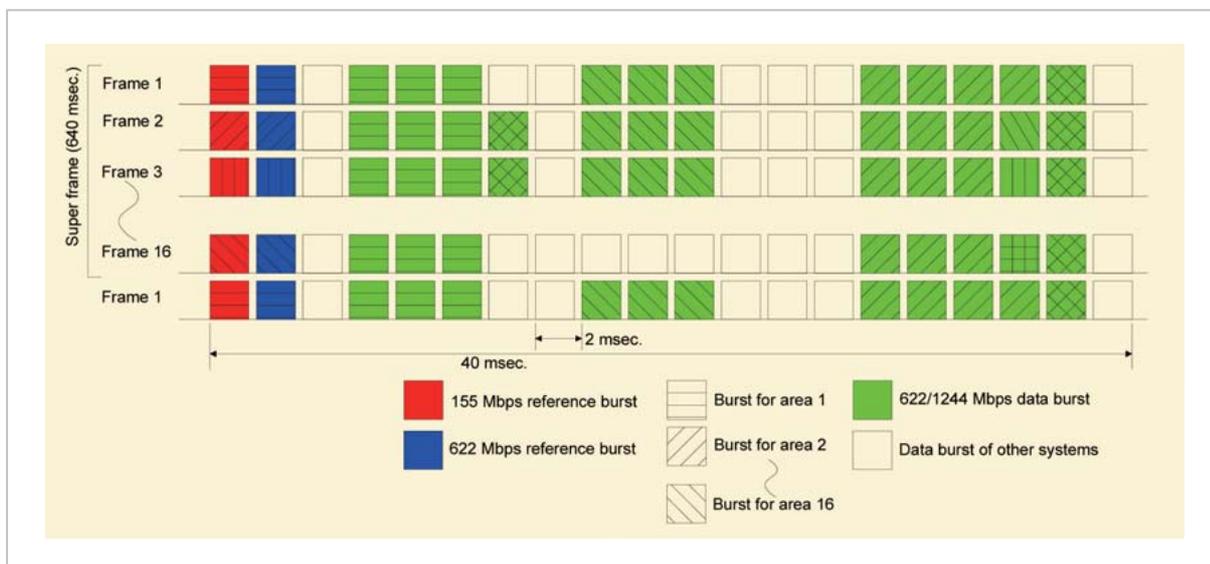


図3 フレームフォーマットの例

フレームごとにリファレンスバーストの送信ビームを切り替えるため、地球局で受信できるリファレンスバーストはスーパーフレームに一度となる。

リファレンスバーストでは次の情報が報知される。

- (1) 衛星軌道情報
- (2) リファレンスバーストビーム情報
- (3) スロット割当情報(6系統分)
- (4) 緊急運用情報

各情報の形式を表1に示す。報知情報は非再生報知情報として一つのブロックにまとめられ、各情報単位のサブヘッダの下に情報が収められている。各地球局はリファレンスバーストビーム情報により、リファレンスバーストのスロット位置を求め、リファレンスバーストの受信タイミングと衛星軌道情報から算出される遅延量からバースト送受信タイミングを取る。また、送受信スロットはスロット割当情報を見て自局に割り当てられたスロットを使用する。WINDS 非再生交換中継回線におけるフレームフォーマットや155 Mbps リファレンスバーストなどの情報は、JAXAによりまとめられて、エアインタフェース仕様書として実験参加者に配布される。

高速ネットワークは、非再生交換回線エアインタフェース仕様書を基に開発されてきたが、JAXA 基準局より送信される155 Mbps リファレンスバーストに加えて、高速ネットワーク独自の

表1 報知情報の内容

非再生報知情報ヘッダー	
衛星軌道情報及び緊急運用情報	
リファレンスバーストビーム情報	
スロット割当情報	系統1
スロット割当情報	系統2
スロット割当情報	系統3
スロット割当情報	系統4
スロット割当情報	系統5
スロット割当情報	系統6

622 Mbps リファレンスバーストとの二つのリファレンスバーストを使用する。622 Mbps リファレンスバーストは155 Mbps リファレンスバーストの次のスロットに同じビームを向けて送信することをデフォルトとしている。また、報知情報についても155 Mbps リファレンスバーストと同じ内容のほか、高速ネットワーク内用のメッセージを追加して送信する。

なお、WINDS 開発計画では再生交換中継及び非再生交換中継を混在して使用するモードも定義されており、この場合、155 Mbps (再生用)、155 Mbps (非再生用) 及び622 Mbps (高速ネットワーク用) と三つのリファレンスバーストを使用することになる。複数の実験を効率よく行うため、

複数のリファレンスバーストを利用することで通信のスループットを落とすことになったが、実用化する段階ではシステムが統合され、リファレンスバーストは共通化されるものと考えられる。

### 3 高速ネットワーク端末

高速ネットワーク端末は中心となる高速バーストモデムとその付加装置であるデジタルターミナル、ルータ及び TCP アクセラレータから構成される。鹿島局では、他に 155 Mbps リファレンスバースト受信機が加えられる。

図 4 に 622 Mbps/1244 Mbps 速度切替型高速バーストモデムの構成を示す。また、表 2 に高速バーストモデムの諸元を示す。

#### 3.1 高速バーストモデム

開発当初、1244 Mbps 伝送用変調器に使用可能なデジタル・アナログ変換器の制限から、ユー

ザデータ速度 622 Mbps のモデムを 2 式使用して、1244 Mbps 伝送を達成することを目標に開発を開始した[3][4]。622 Mbps モデムの開発と平行して、ボトルネックになっていたデジタル・アナログ変換器の開発を行い、2 G サンプル/秒の高速 MUX-DAC を開発した。開発された 622 Mbps モデム [5]-[7] を基に、622 Mbps/1244 Mbps 速度切替型高速バーストモデムへの改造を行った。この開発では、一組の変調器、復調器により、二つのユーザデータ速度 622 Mbps 及び 1244 Mbps の送受信を可能とするとともに、622 Mbps 伝送時は WINDS 中継帯域の上側又は下側周波数を、1244 Mbps 伝送時には帯域中心を使用して、スロット単位で周波数及び変調速度を変えて送受信できるように改造した。この改造では、高速 MUX-DAC 用に配線を変えた変調器基板を新規に制作したほか、3 周波数送受信に対応した RF 部を除き、変調部及び復調部の FPGA プログラムの変更のみで対応している。復号部については 1244 Mbps 伝送に対応したクロックが追加された以外に変更はない。

高速バーストモデムは、変調部、復調部、RF 部及び復号部で構成され、付加装置であるデジタルターミナルにより、TDMA バースト制御及びユーザデータ入出力を行う。

変調部、復調部、復号部及びデジタルターミナルは、それぞれアドバンスド・テレコミュニケーション・コンピューティング・アーキテクチャ (Advanced TCA) 規格の標準サイズである A 280×311 mm のボードに実装され、Advanced-

表2 高速バーストモデムの諸元

	622 Mbps/1244 Mbps 速度切替型	622 Mbps
IF 周波数	2726.4, 3000.0, 3273.6 MHz	2725.0, 3275.0 MHz
変調方式	QPSK	
接続方式	衛星交換・時分割多重接続方式	
ユーザデータ速度	622/1244 Mbps	622 Mbps
変調速度	824/1648 Mbps	824 Mbps
(誤り訂正前)	724.2/1448.4 Mbps	724.2 Mbps
誤り訂正方式	ターボプロダクト符号、4 ビット軟判定	
波形整形	ルート・ライズド・コサイン、ロールオフ率：0.35	
データインタフェース	ギガビットイーサ、ルータ及び TCP アクセラレータ外部接続	

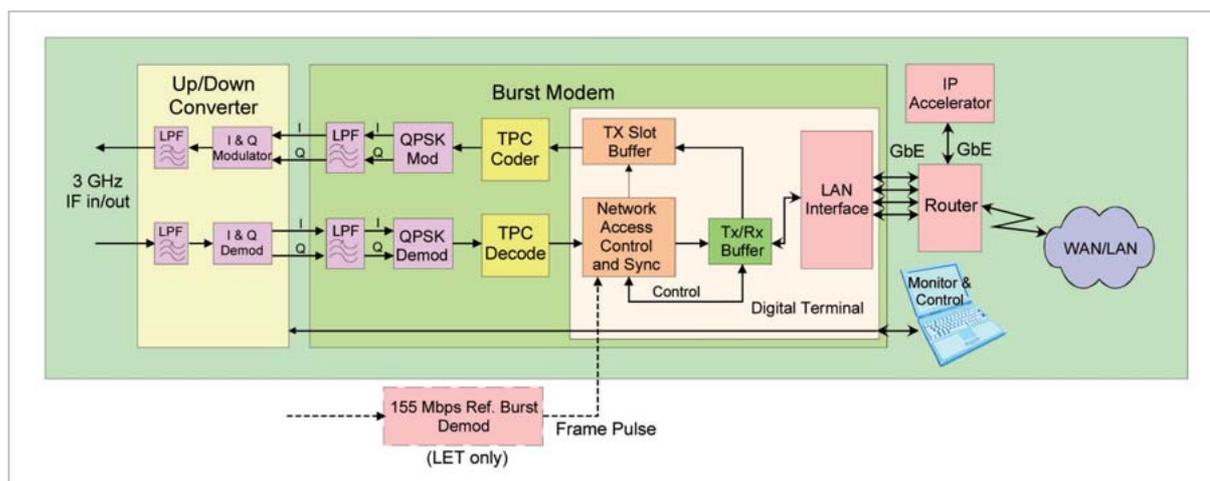


図4 622 Mbps/1244 Mbps 速度切替型高速バーストモデムの構成図

TCA ケースに収められている。FPGA には Xilinx 社製の Virtex-2 及び-4 シリーズを使用しており、ROM からプログラムを読み込み方式の FPGA のため、各機能は ROM データの書換えにより機能を修正することができる。この FPGA が持つ Rocket I/O Multi Gigabit Transceiver (MGT) と呼ぶ 2 Gbps の高速シリアルリンクにより、各部及び各 FPGA は接続されるとともにデータ交換を行う。変調速度が 1648 Mbps であるという高速のデータを処理するため各部は並列処理を多用して機能を実現している。

変調部、復調部、復号部及びデジタルターミナルの基板と高速 MUX-DAC を図 5 に示す。

### 3.1.1 変調部

変調部は、622 Mbps 及び 1244 Mbps の二つのユーザデータ速度をバースト単位で切り替えることが可能な 4 相位相 (QPSK) 変調器であり、

FPGA で構成されるデジタル方式となっている。機能ブロックを図 6 に示す。デジタルターミナルから通信データを受け、CRC-32 を計算するとともに 8 並列スクランブラーによりデータをスクランブルした後、ターボプロダクト符号 (TPC) 化される。符号化時に 2 次元符号化であるターボプロダクト符号化用メモリの読み出し順序を変えることにより、インターリーブを行う。プリアンブルデータを付加され、送信バースト用データになる。622 Mbps 用のデータは 4 倍サンプルに、1244 Mbps 用のデータは 2 倍サンプルの QPSK 変調用の直交した I 及び Q の直交信号データに変換される。622 Mbps 用データはプラス又はマイナス 273.6 MHz の NCO による局部発信信号によりベースバンドから中継器帯域の上側用又は下側用にデジタル信号のまま周波数オフセットされる。そして帯域制限用フィルタを通り

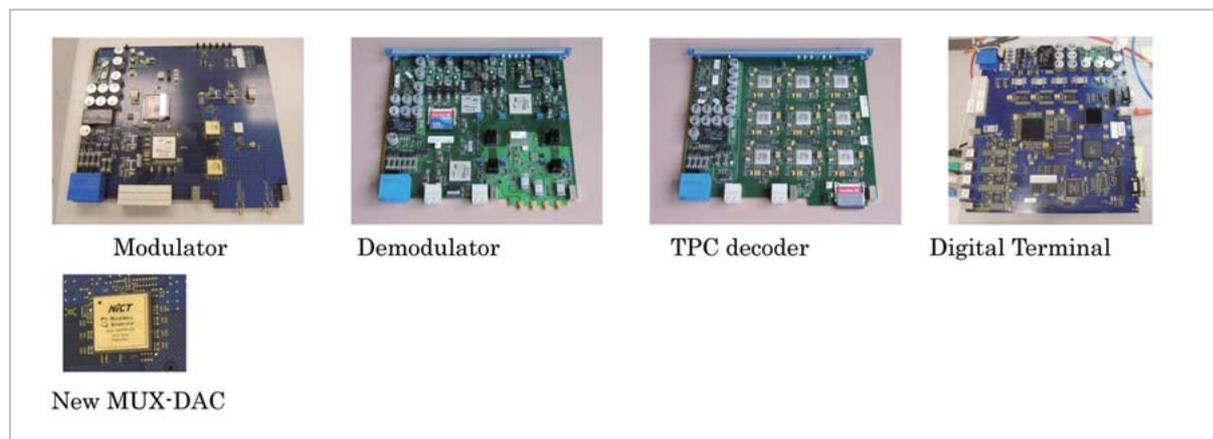


図5 622 Mbps/1244 Mbps 速度切替え型高速バーストモデムの各基板

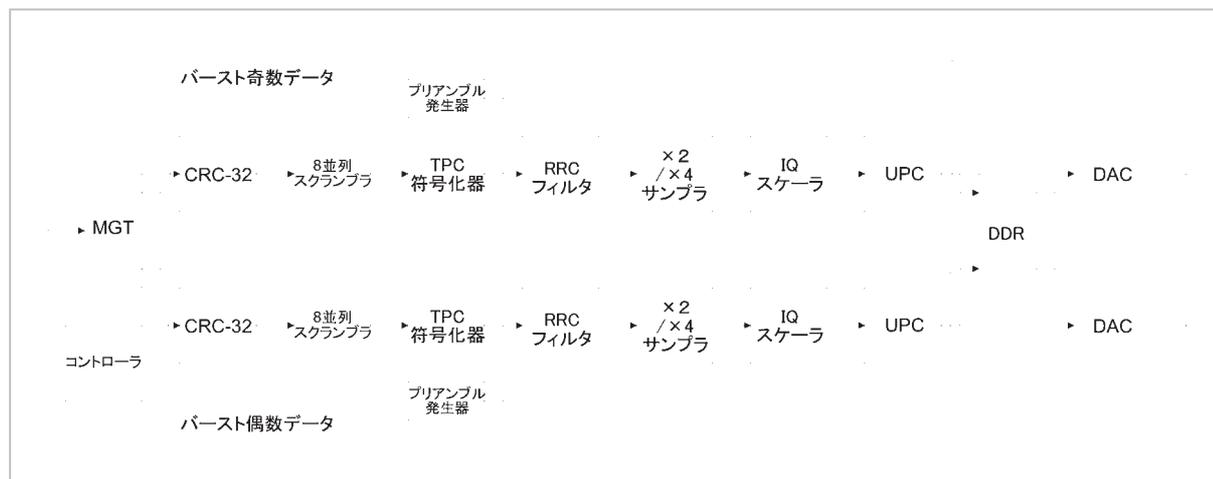


図6 変調器の機能ブロック

出力される。高速 MUX-DAC によりアナログ信号に変換され、RF 部に送られる。

ユーザデータ速度を 622 Mbps 又は 1244 Mbps とするため、リファレンスバーストやガードタイムなどで通信できない時間及びプリアンプルや誤り訂正で必要とされる余分なビットを加えて、変調速度はそれぞれ 412 M シンボル/秒(824 Mbps) 及び 824 M シンボル/秒(1648 Mbps)としている。

データ部は TPC の符号化単位である 14400/16384 ビットを 1 ブロックとして、1244 Mbps 時 192 ブロック、622 Mbps 時 96 ブロックとしている。CRC-32 データは最後のブロックに含まれる。

### 3.1.2 復調部

復調部も変調部と同様に、622 Mbps 及び 1244 Mbps の二つのユーザデータ速度をバースト単位で切り替えることが可能な 4 相位相 (QPSK) 復調器であり、FPGA で構成されるデジタル方式となっている。機能ブロックを図 7 に示す。RF 部から送られる I 及び Q 信号は 10 ビットアナログデジタル変換器 1648M サンプル/秒でサンプリングされる。受信信号が 1244 Mbps の場

合は大きな周波数オフセットはないが、622 Mbps 時はサンプリング信号が±273.6 MHz シフトしているため、NCO による局部発信信号とデジタルミキサによりベースバンドに変換する。その後、ロールオフファクタ 0.35 のルートライズコサインフィルタにより信号が切り出される。622 Mbps 時はこのフィルタは 4 倍サンプリングで動作し、1244 Mbps 時は 2 倍サンプリングで動作することにより同一回路が使用される。また、このフィルタの特性を変更することにより、回線等価器としての動作を加えることも可能である。バーストモデムでは、受信信号のプリアンプル部においてキャリア再生、クロック再生を行い、瞬時にデータの復調に備えることが重要となる。プリアンプル部は 968 シンボル (1936 ビット) であり、Barker 相関器によりバースト検出を行うとともにキャリア、クロックの粗調整を行う。キャリア再生及びクロック再生は逆変調用ループにより構成される。キャリア再生は、周波数・位相誤差を NCO で打ち消すことにより行われ、Barker 相関器からの周波数オフセット情報及び 4 シンボル分の逆

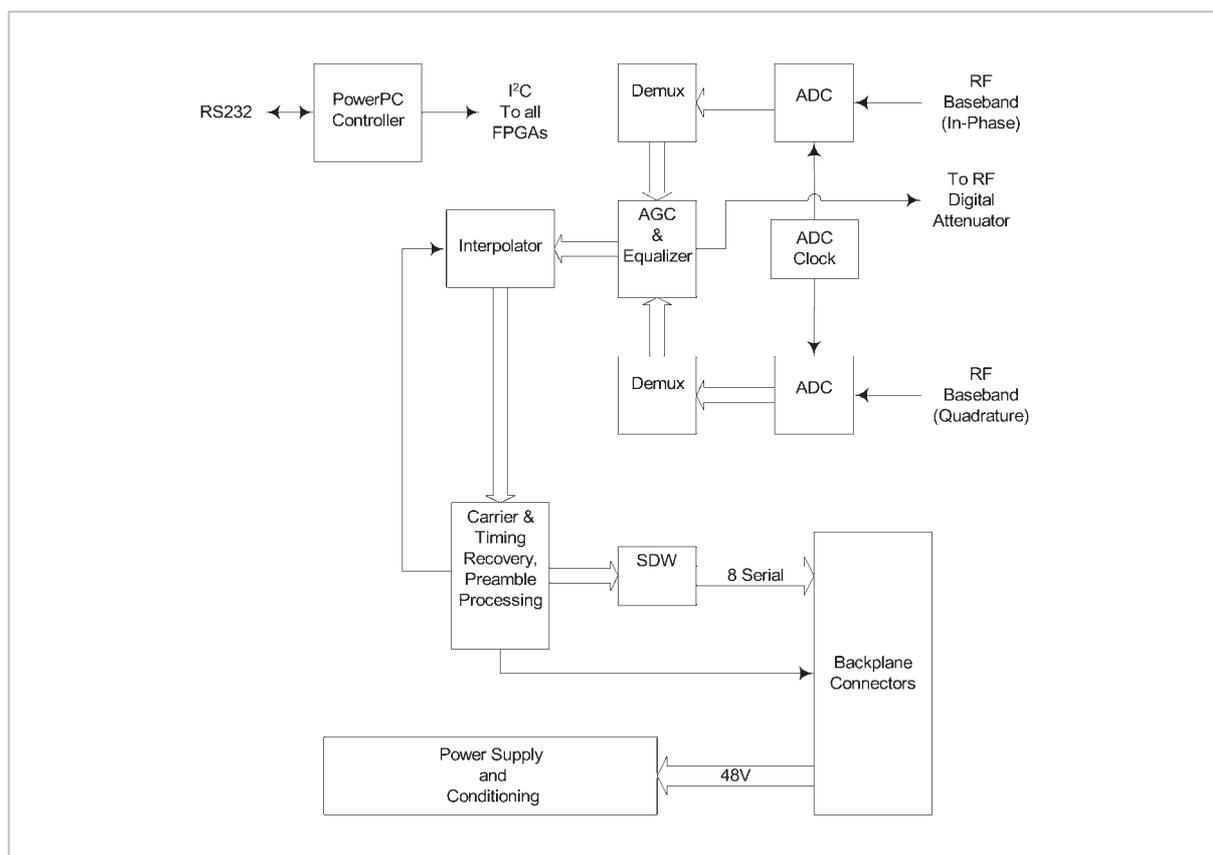


図7 復調器の機能ブロック

変調データの位相誤差を基に制御される。待ち受け時は広いループフィルタを用いロック後はループ大域を狭め、精度を上げている。クロック再生は同じく Barker 相関器からの相関周期を基にクロック初期値を設定し、8 サンプル分のデータより 0 クロス点を求め、2 次のフィルタにより平均化した誤差情報を基に制御される。

再生したデータからプリアンブル部のスタートデータワードを検出し、その後続く通信データを復号部に送る。

### 3.1.3 RF 部

RF 部は、変調部から送られる I 及び Q 信号を直交変調器により 3000 MHz 帯 IF に変換し、出力する。また、受信された 3000 MHz 帯 IF 信号を直交変調器によりベースバンドに変換し、復調部に送る。

周波数オフセットを持たない 1244 Mbps 時の IQ 信号は 3000 MHz 局部発信信号により 3000 MHz 中心とした信号となる。622 Mbps 時は IQ 信号に  $\pm 273.6$  MHz の周波数オフセットがあるため、それぞれ 2726.4 MHz 及び 3273.6 MHz を中心とした信号に変換される。

### 3.1.4 ターボプロダクト符号復号部

復調部から送られてくる 1648 Mbps  $\times$  4 ビット軟判定用データを処理するため、八つの FPGA による並列処理を行い、高速化を図っている。各 FPGA により分散処理されたデータは集合器に集められ、インターリブを戻され、スクランブルを解除された後、CRC-32 による誤り検査を受け、出力される。

使用しているターボプロダクト符号は、図 8 のようにデータ 120 ビットに 8 ビット分の訂正符号がついた 2 次元の符号であり、 $(128, 120)^2$  と表現される。符号化率は  $120^2 / 128^2$  であり、0.879 となる。

### 3.1.5 高速バーストモデムの試験結果

2006 年秋に 622 Mbps 高速バーストモデムを用いて、WINDS 衛星ミッション部、地球局 RF 部と組み合わせた総合試験を行った[8]。試験結果を図 10 に示す。誤り訂正後の BER 特性は、BER が  $10^{-10}$  のとき IF 折返し及び地球局折返し時に約 2 dB シミュレーションから劣化している。衛星回線による劣化は地球局折返しの値から 1 から 3 dB であり、 $E_b/N_0$  は 10 dB 以下となっている。

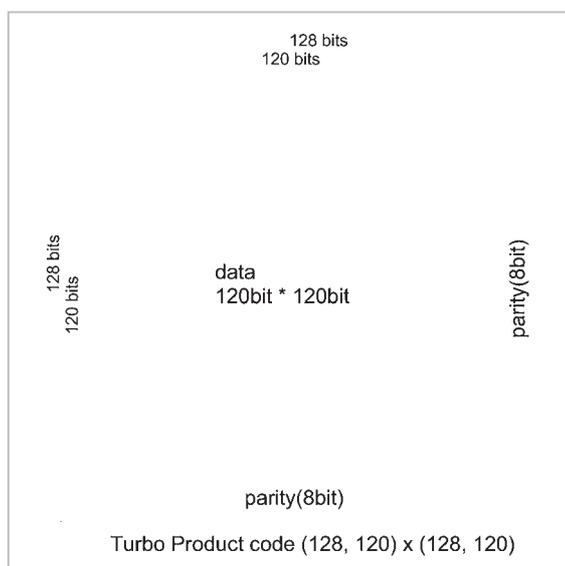


図8 ターボプロダクト符号

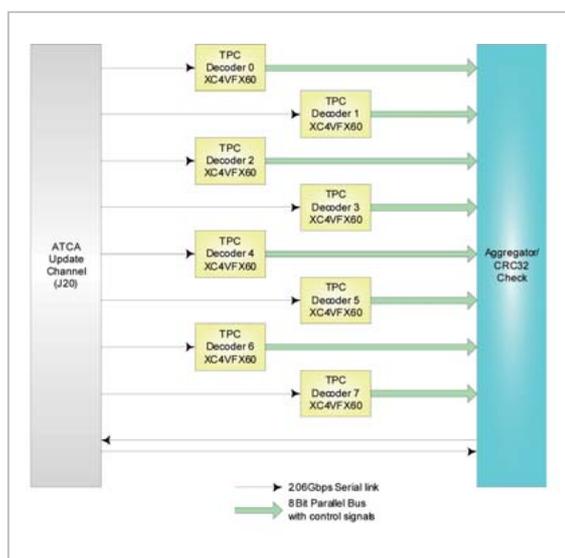


図9 ターボプロダクト符号復号部の構成

上下周波数帯を比較すると、上側周波数帯の信号劣化が大きく、2 波送信時には特に大きな値となっている。これは Ka バンドのミッションテレメトリである網情報回線に妨害を与えないよう、中継周波数帯上端で帯域制限をしているためと考えられる。地球局の IF 接続装置には振幅等価器を設けており、この調整により改善が見込まれるが、衛星中継器内のルートが複数あるため、平均的な特性に合わせるなど検討が必要となる。

622 Mbps / 1244 Mbps 速度切替型高速バーストモデム単体の BER 特性を図 11 に示す。622 Mbps 伝送時は 622 Mbps 高速バーストモデムとほぼ同

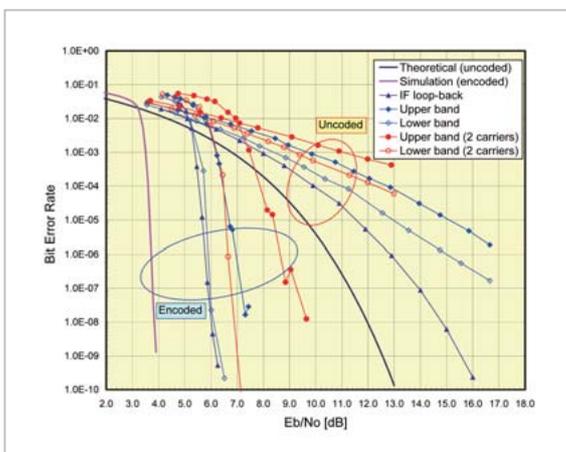


図10 ミッション組合せ試験結果

一の誤り率であり、1244 Mbps 伝送時でも若干の劣化は見られるが、 $10^{-10}$  の BER を得るための  $E_b/N_0$  は 7 dB 以下となっている。

### 3.2 デジタルターミナル

デジタルターミナルは、高速バーストモデムの付加装置として、バースト及び通信制御を行うとともにユーザデータインタフェースを行う。

#### 3.2.1 ハードウェア

デジタルターミナルの機能ブロックを図 12 に示す。四つの GbE インタフェースによりルータと接続され、外部実験機器であるサーバーなどのネットワーク機器に接続される。通信データはバッファメモリに蓄えられ、CPU の制御により、変調部へ向けて MGT へ送り出される。MGT から送られる受信データは、送信局ごとの GbE インタフェースへ送られる。100 BASE-T インタフェース又は RS232C インタフェースにより制御用 PC と接続され、Web ブラウザ又は Telenet により制御することができる。

鹿島局では JAXA 基準局より送信される 155 Mbps リファレンスバーストの受信機から報知情報を受けるため、100 BASE-T インタフェースで接続する。また、RS422 に準拠した電気レベルのフレーム同期信号を受けるインタフェースを持つ。622 Mbps リファレンスバーストの構成及び送信についてもデジタルターミナルで行う。

#### 3.2.2 ソフトウェア

デジタルターミナルでは、以下の制御を行う。

- (1) 四つの GbE インタフェースからの通信デー

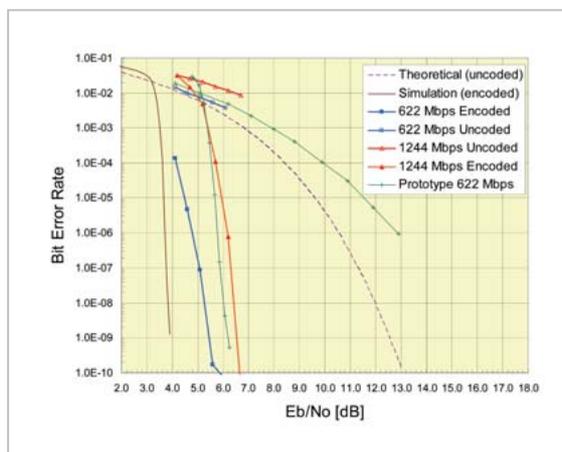


図11 622 Mbps/1244 Mbps 速度切替え型高速バーストモデム単体特性

タをそれぞれの相手局向けのバーストに乗せる。

- (2) 相手局からの通信データを局ごとに決められた GbE インタフェースに送る。
- (3) リファレンスバーストを受け、報知情報を取り出す。
- (4) 衛星位置情報から衛星までの距離を算出する。
- (5) ビーム情報を基にフレーム同期を取る。
- (6) スロット割当情報から送受信バースト位置を求め、相手局と GbE インタフェースの対応を取る。
- (7) 送受信タイミングに合わせて MGT インタフェースへ／からバーストデータを送受する。
- (8) 鹿島局の場合、155 Mbps リファレンスバースト受信機から報知情報を読み込み、622 Mbps リファレンスバーストを作成・送信する。
- (9) 鹿島局の場合、155 Mbps リファレンスバースト受信機からフレーム同期信号を受けて同期を取る。

これら機能は Web ブラウザによる監視及び制御が可能であり、一部情報を書き替えて試験することも可能である。

また、Telenet による制御も可能であり、自己同期動作、連続的バースト送信などの試験モードを使用することができる。

### 3.3 155 Mbps リファレンスバースト受信機

155 Mbps リファレンスバースト受信機は鹿島

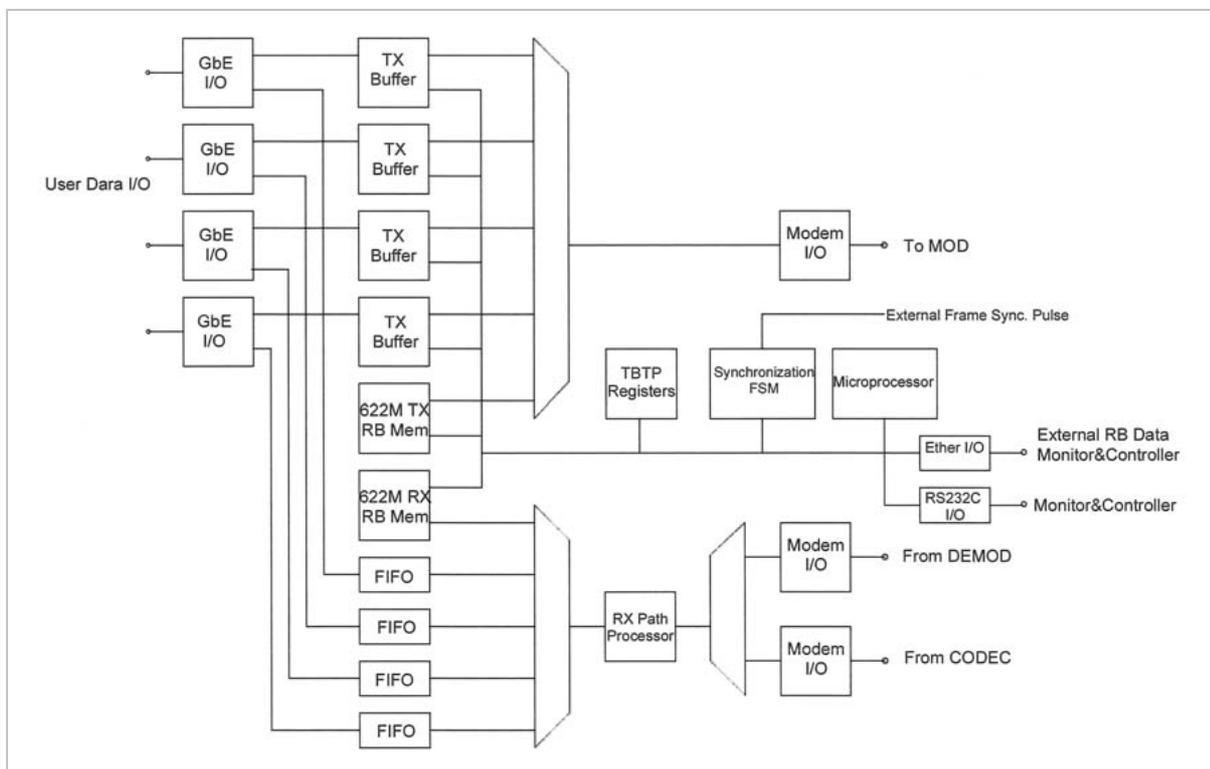


図12 デジタルターミナルの機能ブロック

局のみに設置され、JAXA 基準局から送られる 155 Mbps リファレンスパーストを受信し、フレーム同期信号及び報知情報を再生する。このフレーム同期信号及び報知情報は高速パーストモデムに送られる。

JAXA が基準局用設備として開発した 155 Mbps パースト復調装置と同等な装置を整備し、非再生交換中継回線の 155 Mbps リファレンスパースト用受信機として使用する。155 Mbps リファレンスパーストの地球局受信 IF 周波数である 3280 MHz から復調器入力周波数の 814 MHz に変換するため、周波数変換器を設ける。

パースト送信位置などを決めるフレーム同期信号は RS422 インタフェースの電気レベル信号により、リファレンスパーストで送られるスロット割当てなどの報知情報は、Ethernet 回線でデジタルターミナルに送られる。

### 3.4 その他構成装置

高速ネットワーク端末は、ユーザデータインタフェースとして 4 ポートのギガビットイーサネットを設けている。四つのポートは衛星回線を通して、それぞれ相手方地球局のポートと接続さ

れる。このため、ルータを用いて通信の相手方に応じた四つのポート内一つを選択して、通信を行うこととしている。また、ルータでは回線の情報量を監視し、割り当てた回線容量を超えないよう、情報量を制御する。

TCP/IP では、情報を決められたウィンドウサイズごとに転送し、応答を受けて正しく送られることを保証しているが、衛星回線では応答が帰るまでに 500 ms 程度の時間がかかるため、広帯域回線ではウィンドウサイズによってスループットの上限が決まってしまう。スループットは、

$$\text{スループット} [\text{bit}/\text{sec}] = \frac{\text{ウィンドウサイズ} [\text{bit}]}{\text{応答時間} [\text{ms}]}$$

で計算され、パーソナルコンピュータで一般的なウィンドウサイズ 64 kB とすると

$$65535 \times 8 [\text{bit}] / 500 [\text{ms}] = 1048560 [\text{bit}/\text{sec}]$$

となり、10 Mbps の衛星回線でもスループットが 10.5% を超えることはないと言える。WINDS 高速ネットワークでは 622 Mbps 伝送時の 1 スロットのみで 1944 kbps となるため、54% 以上のスループットを得ることができない。

ウィンドウサイズを大きくすることによりスループットを上げることは可能であるが、TCP

で通信するすべての機器で対応する必要があるほか、ウィンドウサイズに従ったメモリを確保する必要が生じるため、極端に大きくすることはできない。

また、イントラネットで多く使用されているサーバー・メッセージ・ブロック (SMB) プロトコルによるファイル共有では別途短い転送サイズを決めており、TCP のウィンドウサイズを長く変更しても効果がない。このため、TCP 及び代表的なアプリケーションに対応した TCP アクセラレータ/PEP (Performance Enhancing Proxy) により、高速ネットワーク端末の入出力を終端し、衛星回線とイーサネットと異なるウィンドウサイズやプロトコルを使用することが有効となる。

TCP アクセラレータの機能としては

- (1) 衛星回線用代替プロトコル (SkyX-XTP、SCPS など)
- (2) TCP ウィンドウサイズの最適化
- (3) TCP の終端
- (4) ファイル共有プロトコル等の終端
- (5) データ圧縮
- (6) バッファリング
- (7) SSL 終端

などがあり、これらを組み合わせてスループットの改善を図ることができる。また、衛星回線側の情報を暗号化してセキュリティを向上させる付加機能を持つものもある。

なお、近年セキュリティの強化により VPN の利用などで普及が進む IPsec など暗号化パケッ

トでは、パケットの中身やヘッダを含むパケット全体が暗号化されるため、TCP アクセラレータで処理することが困難であり、このようなアプリケーションでは UDP を使用するなどアプリケーションレベルで衛星回線遅延に対応する必要がある。

なお、高速衛星回線では遅延対策が必須であり、実用化に向けて TCP アクセラレータ機能及びルータ機能を高速バーストモデム装置内に組み込んでいくことが必要とされる。

## 4 まとめ

高速ネットワーク端末を構成する機器として、高速バーストモデム及びデジタルターミナルの開発を行った。また、155 Mbps リファレンスバースト受信機は JAXA が基準局用として開発したものを使用する。ルータ及び TCP アクセラレータについても調査の結果、市販の装置を使用可能であることが判明し、すべての構成品の調達について目途をつけることができた。

622 Mbps 伝送については 2006 年 11 月にプロトタイプの 622 Mbps 高速バーストモデムを使用した WINDS 衛星、地球局との組合せ試験を行い、 $E_b/N_0$  が 10 dB 以下で  $10^{-10}$  の BER を得ることができるという良好な結果を得ている。また、622 Mbps/1244 Mbps 速度切替型バーストモデムにおいても 2007 年秋に WINDS 衛星との組合せ試験を行う予定である。

## 参考文献

- 1 Kuramasu R., et al., "Research and Development of Wide Band Inter Networking Engineering Test and Demonstration Satellite (WINDS)", AIAA-2003-2400, Yokohama, Japan, Apr. 2003.
- 2 Suzuki R., et al., "Development of Communication Subsystem for the WINDS", Proc. of AIAA ICSSC, I000159, Rome, Italy, Sep. 2005.
- 3 Gedney R., et al., "High Speed Burst Modem for WINDS", Proc. of AIAA ICSSC, I000233, Rome, Italy, Sep. 2005.
- 4 Ogawa Y., et al., "622Mbps High Speed Satellite Communication System for WINDS", Proc. of IAF IAC, IAC-05-B3.4.01, Fukuoka, Japan, Oct. 2005.
- 5 Hashimoto Y., et al., "Development of High speed Network for WINDS", Proc. of ISTS, ISTS 2006-j-16, Kanazawa, Japan, 2006.
- 6 Hashimoto Y., et al., "Development of High-Speed Network for WINDS", Proc. of IAF, IAC-06-B3.5.01, Valencia, Spain, Oct. 2006.

- 7 橋本ほか, 「WINDS 超高速通信ネットワークの開発」, 3D10, 宇宙科学技術連合講演会, 北九州, 2006年11月.
- 8 Takahashi T., et al., "Development of High-Data-Rate Burst Modem for WINDS", Proc. of AIAA ICSSC, AIAA 2007-3159, Seoul, Korea, Apr. 2007.



はしもと ゆきお  
橋本幸雄

新世代ワイヤレス研究センター宇宙通信ネットワークグループ主任研究員  
衛星通信