

## 3-4 622/1244 Mbit/s デュアルレート高速バーストモデム TDMA 衛星通信実験

大川 貢 赤石 明 浅井敏男 片山典彦 川崎和義 高橋 卓

超高速インターネット衛星「WINDS」が、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) と情報通信研究機構 (NICT) により開発され、2008 年 2 月 23 日、H-IIA ロケット 14 号機によって打ち上げられた。WINDS の非再生中継回線を用いる 622/1244 Mbit/s 高速ネットワークシステムを構築するため、622/1244 Mbit/s 速度切替型高速バーストモデム、大型固定地球局 (LET: 4.8 m 径)、超高速小型地球局 (SDR-VSAT: 2.4 m 径) を開発した。WINDS 打上げ後、NICT は、高速バーストモデムを使用した 622/1244 Mbit/s 伝送実験を実施した。本稿では、WINDS 衛星回線における BER 特性、UDP/TCP パケットエラーレート (PER) の実験結果を示す。また、本モデムを使用し、622 Mbit/s モードにて、3 端末間において TDMA 衛星通信システムとして動作することを確認した。また、本システムにより、3 D, 4 K-HDTV 伝送実験に成功した。

### 1 まえがき

宇宙航空研究開発機構 (JAXA) と情報通信研究機構 (NICT) は、政府 IT 戦略の「e-Japan 重点計画」における高度情報ネットワーク形成の研究開発の一環として、超高速インターネット衛星「WINDS」を開発した [1]-[3]。WINDS は、JAXA 種子島宇宙センターから 2008 年 2 月 23 日、H-IIA ロケット 14 号機によって打ち上げられた。

WINDS の非再生中継回線を用いる 622/1244 Mbit/s 高速ネットワークは NICT が開発した。NICT 鹿島宇宙技術センターに設置した大型固定地球局 (LET) と超高速小型地球局 (SDR-VSAT) 2 機の 3 つの地球局が、622 /1244 Mbit/s 高速ネットワークを構築するために開発された。また、622/1244 Mbit/s デュアルレート高速ネットワーク端末のための (128, 120)<sup>2</sup> ターボ積符号 (TPC) を使用した高性能 FEC を持つ高速バーストモデムを開発した。

WINDS 打上げ後、NICT は、622/1244 Mbit/s デュアルレート高速バーストモデムの 622/1244 Mbit/s 伝送実験を行い、BER 特性、UDP/TCP パケットエラーレート (PER) の測定を実施した。また、622 Mbit/s モードにて、3 端末間において TDMA 衛星通信システムとして動作することを確認した。また、本システムにより、3 D, 4 K-HDTV 伝送実験に成功した。

本稿は、622 /1244 Mbit/s TDMA 衛星通信システムの構成と性能及び高速バーストモデムを使用した 622 /1244 Mbit/s TDMA 衛星通信実験の結果について述べる。

### 2 WINDS 高速ネットワークシステム

#### 2.1 高速ネットワーク

デジタルデバインド解消、インターネット基幹回線のバックアップ、通常は高速回線を有していない場所での可搬型地球局設置による臨時回線の利用を目的として、衛星回線による高速ネットワークの開発が進められた。WINDS の非再生 TDMA モードで動作する高速ネットワークは SS (Satellite Switched) -TDMA システムである。図 1 にシステム構成を示す。WINDS では、多数の 4 GHz 帯アナログスイッチから構成されるスイッチマトリクス (SWMTX) を搭載し、受信ビーム/送信ビームの接続組合せパターンを時間的 (最小時間間隔 2 ミリ秒) に切り替える方式を採用している。

搭載 SWMTX と高速バーストモデムの同期は、JAXA 基準局で生成する 155 Mbit/s リファレンスバースト (JRB) により維持される。この JRB は、再生中継で使用されるものと同様な 155 Mbit/s、QPSK、誤り訂正符号は RS (255, 223) となっている。NICT 局の 1 つが、受信した JRB に同期した 622 Mbit/s 非再生中継用リファレンスバースト (Winds RB: WRB) を送信する。他の地球局は、SWMTX と同期するために 622 Mbit/s WRB のみを使用する。JRB は、再生中継 TDMA のスロット割当情報を含み、WRB は、622/1244 Mbit/s TDMA のためのスロット割当情報を含んでいる。図 2 に TDMA フレーム構成を示す。

WRB 及びデータバーストの送信タイミングは、衛星と地球局の位置情報から伝搬遅延時間を計算し、

### 3 超高速衛星通信技術

SWMTX と同期するように補正される。TDMA のスロット長は、ガードタイム  $75 \mu\text{s}$  を持つ  $2 \text{ ms}$  である。1 フレームは、20 スロット、1 スーパーフレームは、16 フレームである。マルチビームアンテナ (MBA) に対する最大ビーム数は 8 であり、JRB と WRB は、フレームの先頭に配置され、通信を確立するビームに対して送信可能である。

#### 2.2 衛星中継器と地球局

WINDS の搭載中継器は、 $2.4 \text{ m}$  アンテナ径の 2 つの MBA とアクティブフェーズドアレイアンテナ (APAA: 送受各 128 素子)、Tx/Rx-IF スイッチマトリックス (IF-SWMTX)、搭載再生交換サブシステム (ABS: ATM Baseband Switch subsystem)、マルチポートアンプ (MPA) から構成される。MBA は、19 の固定スポットビームで日本本土と東南アジアの都市に通信回線を確立し、APAA は 2 つの電子走査スポットビームで地球上見通し範囲内に通信回線を確立する。固定ビームは、隣接するビームは偏波 (垂直、水平)

で分離し、APAA は、垂直偏波である。周波数は、同じ周波数帯域を使用可能であり、SS-TDMA により、各ビームに TDMA スロットを送信できる。

WINDS には、再生中継モードと非再生中継モードがある。表 1 に、WINDS 中継器の諸元を示す。高速バーストモデムを使用した  $622/1244 \text{ Mbit/s}$  の高速データ通信は非再生 TDMA モードを使用する。

再生中継モードと非再生中継系モードは、どちらもインターネット IP 接続を可能にする SS-TDMA システムである。

表 1 WINDS の諸元

軌道	GEO (東経 143 度)
重量	約 2,700 kg (軌道上)
サイズ	$2 \text{ m} \times 3 \text{ m} \times 8 \text{ m}$ (太陽電池パドル展開時: 21.5 m)
設計寿命	5 年 (目標)
発生電力	5,200 W 以上
姿勢制御	3 軸姿勢制御
周波数	18.25 GHz / 28.05 GHz (1.1 GHz BW)
アンテナ	MBA: $2.4 \text{ m}$ 径 APAA: 128 素子 (TX, RX)
EIRP	MBA: 68 dBW 以上 APAA: 55 dBW 以上
G/T	MBA: 18 dB/K 以上 APAA: 7 dB/K 以上
通信モード	再生中継モード (ABS & IFS) 非再生中継モード (IFS)
サービスエリア	MBA: 日本 9 ビーム、 アジア都市 10 ビーム APAA: アジア太平洋地域 2 ビーム
ロケット	H-IIA
打上げ	2008/2/23

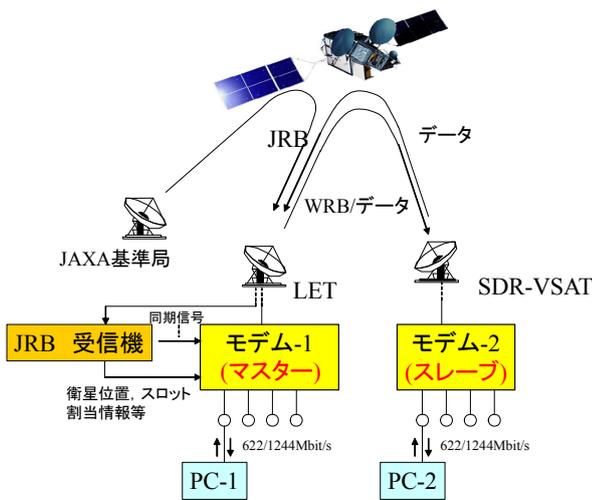


図 1 SS-TDMA 衛星通信のシステム構成

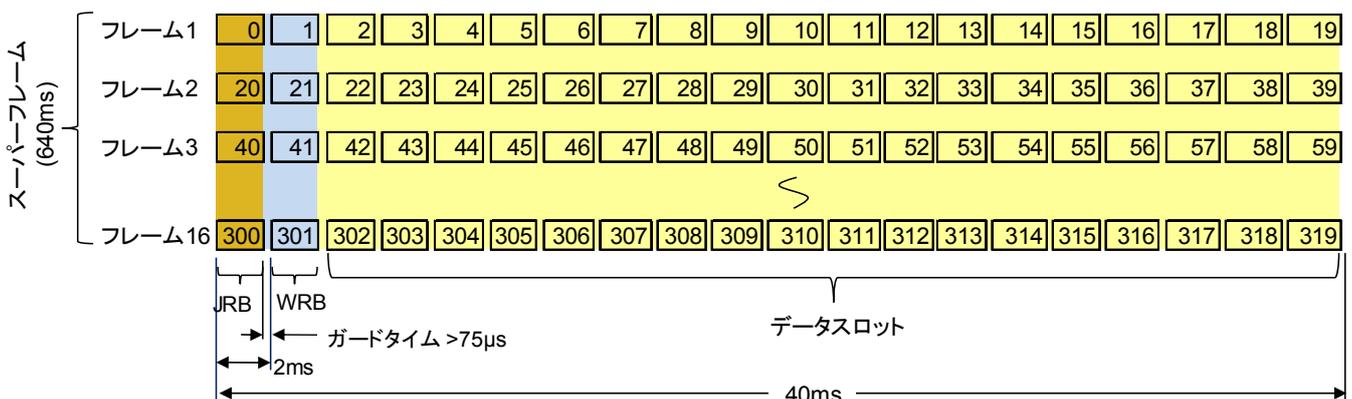


図 2 TDMA フレーム構成

WINDSは、非再生 TDMA モードにおいて、6つの経路が存在する。送受信間で広帯域のバンドパスフィルタを通過する経路が4系統、狭帯域のバンドパスフィルタを通過する経路が2系統ある。

WINDS 通信経路 MBA-LNA/RX (or APAA) から MPA-MBA/TX (or APAA) において、バンドパスフィルタ (BPF-W1, W2, W3, W4, U1, U2) を通過する6つの経路がある。BPF-W1 から BPF-W4 までの BPF は 1100 MHz の全帯域を通過するが、BPF-U1 と BPF-U2 は 1100 MHz 帯域幅の上側 600 MHz の帯域を通過する。再生中継モードと混在で使用するとき、上側帯域 (upper band) を非再生中継モードで使用し、下側帯域 (lower band) を再生中継モードで使用することができる [3]。

高速ネットワーク構築のため、SDR-VSAT と LET を開発した。SDR-VSAT は、車載地球局 (SDR-VSAT1) と可搬型地球局 (SDR-VSAT2) である。LET は、鹿島宇宙技術センターに固定地球局として構築した。図3、4、5に各々、LET、SDR-VSAT1、SDR-VSAT2の外観を示す。

表2 地球局諸元

	LET	SDR-VSAT1	SDR-VSAT2
アンテナ	4.8 m カセグレンリフレクタアンテナ	2.4 m オフセットフィードカセグレンリフレクタアンテナ	2.4 m オフセットフィードアンテナ
アンテナ利得	Tx: 60.2 (dbi) Rx: 56.5 (dBi)	Tx: 53.9 (dbi) Rx: 50.2 (dBi)	Tx: 54.7 (dbi) Rx: 51.8 (dBi)
周波数	Tx: 28.05 GHz $\pm$ 550 MHz Rx: 18.25 GHz $\pm$ 550 MHz		
HPA 出力	215 W		
EIRP	79.3 dBW	73.1 dBW	74.0 dBW
G/T	32.7 dB/K	26.3 dB/K	27.0 dB/K
平坦度	RF ループバック : 2.55 dBp-p (1.1 GHz BW)		
スプリアス	< -60 dBc		

表2に、3つの地球局の諸元を示す。LET と SDR-VSAT1 のアンテナトラッキングは、ミッションテレメトリ信号の残留キャリアを使用している。SDR-VSAT2 は、アンテナトラッキングシステムを持っていない。トラッキングによるレベル変動への影響は大きくなく、短時間での実験ではトラッキングによるレベル変動への影響はない。HPA の最大出力は、215 W である。通過帯域幅は 1100 MHz で、IF 中心周波数は、3000 MHz である。

表3は、非再生 TDMA モードの回線設計例である。LET と SDR-VSAT1 間の通信において、通信形態により、C/No マージンは、4.1 dB から 13.3 dB となっている。ここで、エラーフリー ( $<10^{-10}$ ) となる所要 Eb/No の設計目標は、Eb/No=10 dB としていた。(後述の実測値では、1244 Mbit/s モードでは、所要 Eb/No は 13 dB 必要となった。)

### 2.3 622 Mbit/s/1244 Mbit/s デュアルレートバーストモデム

高速ネットワーク端末を構築するため、高速バーストモデムを開発した。622 Mbit/s のユーザデータレートで動作するプロトタイプのパーストモデムを開発し [4]-[7]、さらに、1244 Mbit/s のユーザデータレートで動作するようにアップグレードした。

図6に、622/1244 Mbit/s デュアルレートバーストモデムの構成を示す。図7に、外観 (2セットの写真)、表4に諸元を示す。バーストモデムは、変調ボード、復調ボード、ターボ積符号 (TPC) 復号ボード、制御ボードの4つのボードで構成される。全てのボードは、FPGA を使用したデジタル回路で構成される。これらのボードは、ATCA (Advanced Telecommunication Computing Architecture) バックプレーンに実装されている。

RF ユニットでは、4 値変調ベースバンド信号を IF



図3 LET



図4 SDR-VSAT1



図5 SDR-VSAT2

### 3 超高速衛星通信技術

周波数帯信号に変換する。FECとして、4ビット軟判定のターボ積符号(TPC： $(128, 120)^2$ )を使用している。符号化率0.879でBER= $10^{-10}$ に対してシミュレーションによる符号化利得は9 dBである。1244 Mbit/sのユーザデータレートでのQPSK変調の伝送ビットレートは1648 Mbit/s(824 Msymbol/s)となる。622 Mbit/sのユーザデータレートでは、824 Mbit/s(412 Msymbol/s)となる。

1244 Mbit/sのデータレートに対応するため、変調器において4×1マルチプレクサの2 Gsample/sのD/Aコンバータを開発した。I, QのQPSKベースバンド信号発生のため、1244 Mbit/s信号を送信する場合は、0 Hzキャリアを使用し、622 Mbit/s信号を伝

送する場合は、+273.6 MHzと-273.6 MHzのキャリアを使用する。これらの信号は、RFユニットにより、3000 MHz帯IF信号に変換される。

復調器と符号復号化器のボードは、プロトタイプモデムボード(622 Mbit/s用初期開発ボード)のFPGAプログラムから修正している。

制御ボードは、Webアプリケーションやtelnetにより、制御することができる。ルータは、経路選択に用いられる。そして、TCP Acceleratorが伝搬遅延の影響を抑圧するために用いられる。本稿に示した実験では、Hybla/Renoでウィンドウサイズを広げる方式を実施している。

表3 回線設計例

		LET ⇒ LET		LET ⇒ SDR-VSAT1		SDR-VSAT1 ⇒ LET		SDR-VSAT1 ⇒ SDR-VSAT1		備考
アップリンク										
周波数	GHz	28.05		28.05		28.05		28.05		
データレート	Mbps	622	1244	622	1244	622	1244	622	1244	
EIRP	dBW	79.3		79.3		73.1		73.1		地球局 3 dB バックオフ
ポインティングロス	dB	0.5		0.5		0.5		0.5		
自由空間損失	dB	212.8		212.8		212.8		212.8		
大気損失	dB	0.5		0.5		0.5		0.5		
G/T	dB/K	18.0		18.0		18.0		18.0		衛星
アップリンク C/N <sub>0</sub>	dB/Hz	112.1		112.1		105.9		105.9		
ダウンリンク										
周波数	GHz	18.25		18.25		18.25		18.25		
EIRP	dBW	68		68.0		68.0		68.0		衛星 4 dB バックオフ
自由空間損失	dB	201.9		201.9		201.9		201.9		
大気損失	dB	0.5		0.5		0.5		0.5		
G/T	dB/K	32.7		26.3		32.7		26.3		地球局
ダウンリンク C/N <sub>0</sub>	dB/Hz	126.4		120.0		126.4		120.0		
総合										
総合 C/N <sub>0</sub>	dB	111.9		111.4		105.9		105.7		
伝送レート	Mbps	824	1648	824	1648	824	1648	824	1648	QPSK FEC 符号化率 =0.879
要求 C/N <sub>0</sub>	dB/Hz	98.6	101.6	98.6	101.6	98.6	101.6	98.6	101.6	Eb/N <sub>0</sub> =10 dB
マージン										
C/N <sub>0</sub> マージン	dB	13.3	10.3	12.8	9.8	7.3	4.3	7.1	4.1	

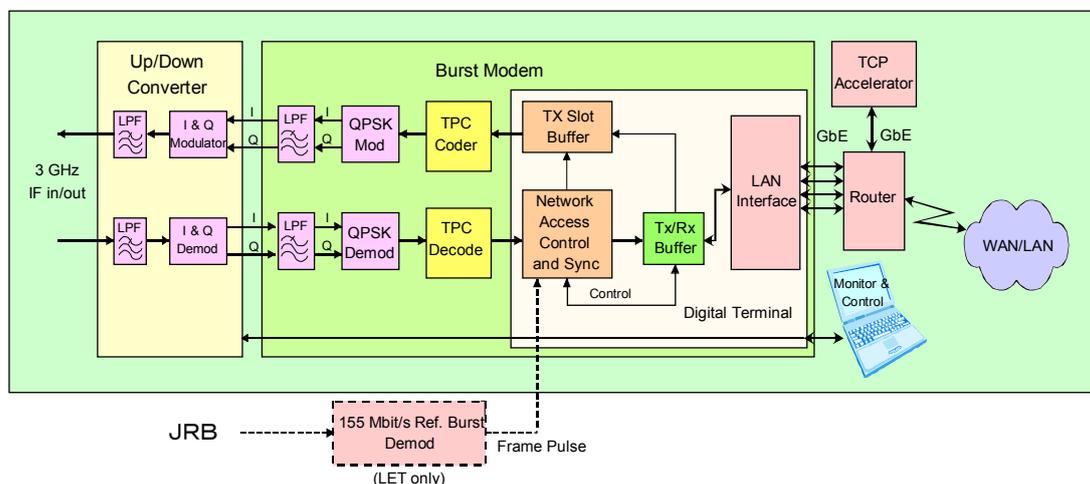


図6 622/1244 Mbit/s 高速バーストモデムの構成



図7 622/1244 Mbit/s 高速バーストモデムの外観

表4 622/1244 Mbit/s 高速バーストモデムの諸元

ユーザデータレート	622 Mbit/s	1244 Mbit/s
IF 周波数	2726.4, 3273.6 MHz	3000.0 MHz
変調方式	QPSK	
アクセス方式	SS-TDMA	
誤り訂正前レート	724.2 Mbit/s	1448.4 Mbit/s
伝送レート	824 Mbit/s	1648 Mbit/s
誤り訂正	ターボ積符号 (128, 120) <sup>2</sup> 4 ビット軟判定	
ロールオフ率	ルートレイズドコサイン ロールオフ率 = 0.35	
データ I/O	ギガビットイーサネット ルータ、TCP アクセラレータ接続	

### 3 衛星通信実験の結果 [8]-[11]

#### 3.1 622 Mbit/s 伝送実験

##### (1) 関東ビーム 622 Mbit/s 1波伝送

図8には、622 Mbit/s 1波連続伝送におけるビット誤り率 (BER) 特性を示す。1波連続伝送とは、モデム TDMA 全フレームを使用すると同時に、衛星のサテライトスイッチが動作しないモード (通常のバンドパイプ) での伝送である。Eb/No が 10 dB 以上で BER が  $10^{-10}$  以下を達成した。地上試験 (IF loop back) の測定結果に対して、 $10^{-10}$  の測定結果は、1 ~ 3 dB 程度の劣化を示している。なお、理想状態のガウス雑音チャネルにおける本モデムの BER 特性のシミュレーション値は、Eb/No が 4 dB で  $10^{-9}$  である [3]。

衛星回線での劣化は、受信レベルの変動、中継器の周波数特性、非線形特性が考えられる。LET での受

信信号は、1 dBp-p 程度変動し、622 Mbit/s 信号伝送 (412 Msymbol/s) は、550 MHz 帯域幅内で 2 dBp-p 程度の周波数特性偏差を持つ。MPA は、原則は、線形領域で動作する。最大動作時で 4 dB の出力バックオフを取っているため、1波 TDMA 信号への非線形特性の影響は大きくないと推定される。したがって、BER 特性の劣化の主要な原因は、地球局を含めた衛星回線の周波数特性偏差と受信信号レベルの不安定であると推定している。受信レベル変動の原因としては、アップリンク 28 GHz、ダウンリンク 18 GHz 周波数帯の通信信号に対して、測定時間の短期間においても雲の変化等、天候の変化が 1 dB 程度の受信レベルの変動を及ぼすと推定される。

##### (2) 関東ビーム 622 Mbit/s TDMA 通信実験

図1の構成で 622 Mbit/s TDMA 通信実験を実施した。MBA 関東ビームエリアの鹿嶋で LET、SDR-VSAT1 間で実施した。JAXA 基準局からリファレンスバースト (JRB) が送信され、LET で JRB 受信機を経て受信される。LET のモデムは、マスターモデムとして動作し、衛星位置、スロット割当、同期タイミング情報を JRB 受信機から得た後、高速バーストモデムより WRB を送出する。JRB、WRB ともに衛星位置、スロット割当、同期タイミング情報を含んでいる。SDR-VSAT1 は、WINDS からの WRB を受信する。そして、2つのモデムは、TDMA 通信を確立するために、WRB によって運ばれる衛星位置、スロット割当、同期タイミング情報に基づきバースト信号を送信する。バースト信号の送信タイミングは、衛星位置と地球局位置より、遅延時間を計算することにより、構成される。PC1 と PC2 はモデム 1 とモデム 2 に、各々、LAN インターフェースで接続する。

表5は、ネットワークスループットとパケットロス率を測定するためのフリーソフト iperf を使用した

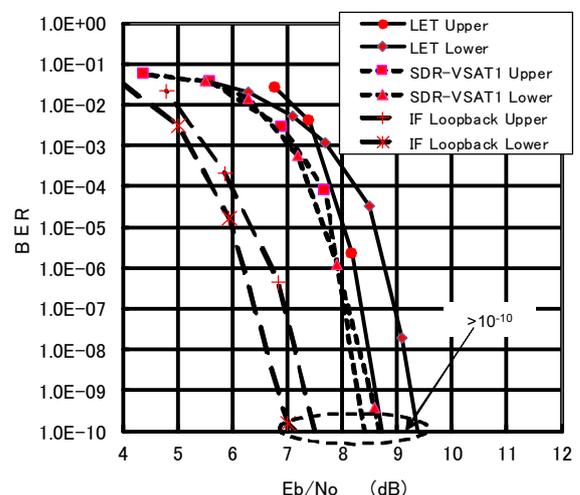


図8 622 Mbit/s 1波連続伝送の誤り率特性

### 3 超高速衛星通信技術

UDP パケットロス率の測定結果を示す。図 2 の TDMA フレーム構成において全スロットに連続的に通信信号を割り当てたフルスロット割当とデータスロット列を 9 スロット列ずつ半分に分けて TDMA 通信信号を割り当てたハーフスロット割当の場合の結果である。ケース (a) は、フルスロット割当における TDMA でない連続波動作で片方向 100、400 及び 622 Mbit/s でパケットロス率 0 % を実現した。ケース (b) は、双方向で、ハーフスロット列で割り当てた場合において、相互に 100、200 及び 300 Mbit/s のパケットロス率 0 % の伝送を実現した。

表 6 は、TCP に対する iperf の試験結果を示す。図 9 は、パケットロス率 0 % の TCP スループットの時間変化を示す。図 10 は、パケットロス率 0.002 % 程度の場合の TCP スループットの時間変化を示す。図 9 において、hybla の方が reno より、最大帯域幅に達する立ち上がりが早く、ウィンドウサイズを大きくした場合は、更に立ち上がりは早い。図 10 において、パケットロスが存在する場合は、reno は、時間が経過に対して帯域幅が低いが、hybra は、変動はあるが帯域幅は、上昇する。

パケットロスがない場合、ウィンドウサイズが 64 MB と 128 MB に対して hybla と reno とともに 250

～ 290 Mbit/s の帯域幅を達成している。パケットロス率 0.002 % 程度の場合には、hybla では、200 ～ 260 Mbit/s の帯域幅を達成するが、reno では、6 ～ 36 Mbit/s と低いスループットにとどまっている。hybla は reno に比べて、パケットロスが発生しても早くウィンドウサイズを増加させ、高遅延環境下で高い性能を持っている。

#### (3) 3 地球局間 TDMA 通信実験

SDR-VSAT2 を開発し、3 地球局間 TDMA 通信実験を実施できる構成を構築した。図 11 は、3 地球局間 TDMA 通信実験の構成を示す。衛星回線を十分良い条件下で (ビット誤りが発生しない条件下で) 実験を実施した。各地球局のモデムの LAN ポートに PC を接続し、PC 間で iperf 試験を実施した。図 12 は、3 地球局間 TDMA 通信実験の TDMA スロット割当を示す。PC1 台に対して、片方向 3 スロット列で 100 Mbit/s、双方向 6 スロット列 200 Mbit/s で通信する。表 7 は、UDP に対する iperf の試験結果を示す。6 系

表 5 ハーフバンド UDP iperf 試験

(a) Iperf 試験 (フルスロット割当・片方向)

	Eb/N <sub>0</sub>	100 Mbit/s	400 Mbit/s	622 Mbit/s
SDR-VSAT1 ⇒ LET (Upper Band)	14.9 dB	Loss 0 %	Loss 0 %	Loss 0 %
SDR-VSAT ⇒ LET (Lower Band)	15.1 dB	Loss 0 %	Loss 0 %	Loss 0 %

(b) Iperf 試験 (ハーフスロット割当・TDMA)

	Eb/N <sub>0</sub>	100 Mbit/s	200 Mbit/s	300 Mbit/s
SDR-VSAT1 ⇒ LET (Upper Band)	17.1 dB	Loss 0 %	Loss 0 %	Loss 0 %
LET ⇒ SDR-VSAT1 (Upper Band)	13.8 dB	Loss 0 %	Loss 0 %	Loss 0 %

表 6 ハーフバンド TCP iperf 試験

	時間 (sec)	ウィンドウサイズ (Mbytes)	帯域 (Mbit/s)	プロトコル
LET ⇒ SDR-VSAT1	301	64	256	hybla
	302	128	293	hybla
	302	64	257	reno
	301	128	261	reno
SDR-VSAT1 ⇒ LET (UDP パケットロス 約 0.002 % に対して)	301	64	200	hybla
	306	128	57	hybla
	374	64	36	reno
	478	128	6	reno

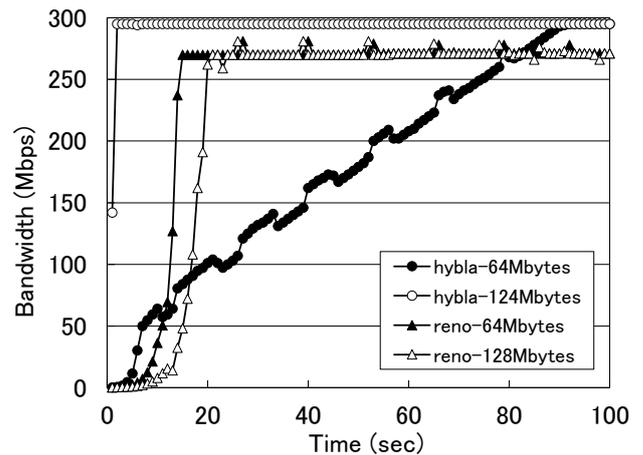


図 9 TCP スループットの時間変化 (パケットロス率 0 %)

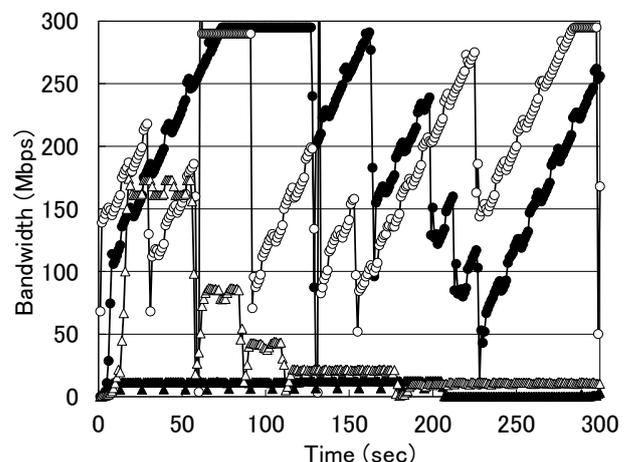


図 10 TCP スループットの時間変化 (パケットロス率 0.002 %程度)

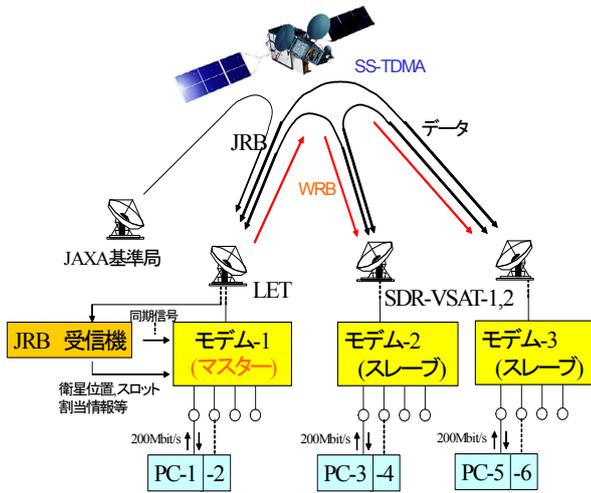


図 11 3 地球局間 TDMA 通信実験

0		1	1	1	2	2	2	3	3	3	4	4	4	5	5	5	6	6	6	
1	JRB	WRB	1	1	1	2	2	2	3	3	3	4	4	4	5	5	5	6	6	6
2			1	1	1	2	2	2	3	3	3	4	4	4	5	5	5	6	6	6
3			1	1	1	2	2	2	3	3	3	4	4	4	5	5	5	6	6	6
4			1	1	1	2	2	2	3	3	3	4	4	4	5	5	5	6	6	6
5			1	1	1	2	2	2	3	3	3	4	4	4	5	5	5	6	6	6
6			1	1	1	2	2	2	3	3	3	4	4	4	5	5	5	6	6	6
7			1	1	1	2	2	2	3	3	3	4	4	4	5	5	5	6	6	6
8			1	1	1	2	2	2	3	3	3	4	4	4	5	5	5	6	6	6
9			1	1	1	2	2	2	3	3	3	4	4	4	5	5	5	6	6	6
10			1	1	1	2	2	2	3	3	3	4	4	4	5	5	5	6	6	6
11			1	1	1	2	2	2	3	3	3	4	4	4	5	5	5	6	6	6
12			1	1	1	2	2	2	3	3	3	4	4	4	5	5	5	6	6	6
13			1	1	1	2	2	2	3	3	3	4	4	4	5	5	5	6	6	6
14			1	1	1	2	2	2	3	3	3	4	4	4	5	5	5	6	6	6
15			1	1	1	2	2	2	3	3	3	4	4	4	5	5	5	6	6	6

1:LET>SDR-VSAT1      2:SDR-VSAT1>LET      3:SDR-VSAT1>SDR-VSAT2  
 4:SDR-VSAT2>SDR-VSAT1      5:SDR-VSAT2 > LET      6:LET > SDR-VSAT2

図 12 3 地球局間 TDMA 通信実験の TDMA スロット割当

統の片方向 100 Mbit/s の通信に対してパケットロス率 0 %を確認した。622 Mbit/s TDMA 衛星通信システムにより、メッシュ型ネットワークとして、3 地球局間でパケットロス率 0 %の TDMA 通信ができることを確認した。

### 3.2 1244 Mbit/s 伝送実験

#### (1) 関東ビーーム 1244 Mbit/s 1 波伝送

図 13 は、1244 Mbit/s 1 波連続伝送におけるビット誤り率 (BER) 特性を示す。WINDS-BPF-W1 経路における LET-LET 間、SDR-VSAT1-SDR-VSAT1 間の特性である。Eb/No が 13 dB 以上で BER が  $10^{-10}$  以下を達成した。BER が  $10^{-10}$  におけるモデム IF 折返しの特性に対して、4 dB 程度の劣化を確認した。1244 Mbit/s の伝送では、824 Msymbol/s に及ぶ広帯域通信となるため、衛星回線と地球局の周波数特性の偏差と受信レベルの変動のため、信号品質が劣化する。実験当時 (2010 年)、1 搬送波 1244 Mbit/s データ伝送は、RF 衛星通信においては、世界最高速であった。

#### (2) 関東ビーーム 1244 Mbit/s TDMA 通信実験

図 14 に示すように、1244 Mbit/s TDMA 通信実験に対しては、図 1 で示す構成にモデムを 1 台追加し、

表 7 3 地球局間 iperf 試験 (UDP)

LET ⇄ SDR-VSAT1	Eb/No	100 Mbit/s	備考
Modem-1 ⇒ Modem-2	16 dB-17 dB	Loss 0 %	3 スロット / フレーム
Modem-2 ⇒ Modem-1	16 dB-17 dB	Loss 0 %	3 スロット / フレーム
LET ⇄ SDR-VSAT2			
Modem-1 ⇒ Modem-3	16 dB-17 dB	Loss 0 %	3 スロット / フレーム
Modem-3 ⇒ Modem-1	16 dB-17 dB	Loss 0 %	3 スロット / フレーム
SDR-VSAT1 ⇄ SDR-VSAT2			
Modem-2 ⇒ Modem-3	16 dB-17 dB	Loss 0 %	3 スロット / フレーム
Modem-3 ⇒ Modem-2	16 dB-17 dB	Loss 0 %	3 スロット / フレーム

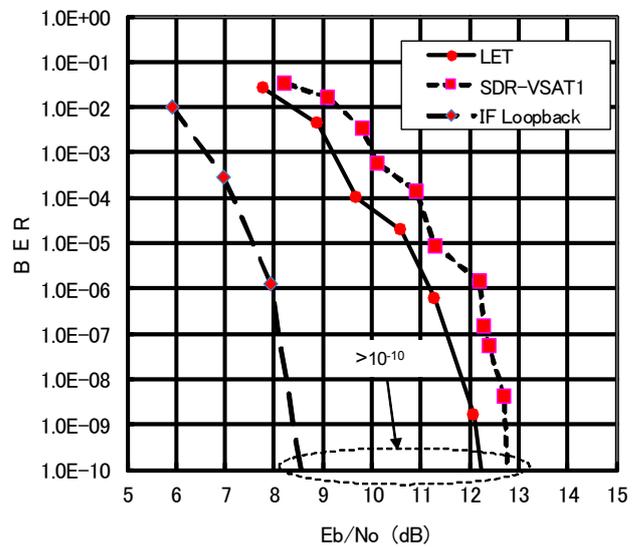


図 13 1244 Mbit/s 1 波連続伝送における BER 特性

構成した。モデム 1 とモデム 2 の双方を SDR-VSAT1 に接続し、同時に動作させた。図 15 に、iperf 試験に対する TDMA スロット割当を示す。スロット 1 は、モデム 2 からモデム 3 へのルートであり、スロット 2 は、モデム 3 からモデム 2 へのルートである。表 8 は、UDP における iperf 試験の結果である。結果より、iperf のオーバーヘッドのため、1244 Mbit/s より少ないが、双方向 1178 (片方向  $589 \times 2$ ) Mbit/s でパケットロスなしで伝送できることが確認された。表 9 は、UDP のパケットロス率が 0.01 %程度の場合に対応した TCP における iperf 試験結果を示す。hybla において、ウィンドウサイズが 4 MB から 64 MB に増加すると帯域幅は、50 Mbit/s から 200 ~ 300 Mbit/s に改善された。ウィンドウサイズを増加することは、帯域幅改善効果を期待できる。

### 3.3 3D,4K-HDTV アプリケーション伝送実験 [12][13]

関東-近畿ビーム間 622 Mbit/s-1 波 TDMA 通信モードを使用して、立体 (3D) 4K-HDTV 映像伝送実験を実施した。図 16 に、2010 年 11 月に行われた NICT けいはんなフェアにおけるデモンストレーションの構成を示す。奈良県で開催された奈良平城京遷都 1300 年記念のイベントとして実施された。LET のある NICT 鹿島宇宙技術センター(茨城県鹿嶋市)とけいはんなプラザは研究開発用広帯域ネットワーク JGN2 plus で接続している。TDMA スロット割当は、関東(LET)からは、1 slot 列(約 30 Mbit/s)、近畿(SDR-VSAT1)からは、13 slot 列(約 400 Mbit/s)で送信している。SDR-VSAT から LET で 400 Mbit/s 及び LET から SDR-VSAT で 30 Mbit/s の通信でパケットロス 0% を確認した。立体 (3D) 4K-HDTV カメラで撮影した映像をマルチチャネル映像伝送システム 8 チャネルで 200 ~ 300 Mbps に帯域圧縮し、400 Mbit/s の衛星回線を使用して 3D, 4K-HDTV の映像を LET で受信し、LET から上映会場までは地上ネットワーク (JGN2 plus/VLAN) で伝送し、高品質

で上映することに成功した。

## 4 まとめ

WINDS の開発が終了し、打上げが成功した。現在、WINDS を使用して、様々な実験が行われている。NICT では、高速ネットワーク実験のため、SDR-VSAT1, 2, LET に装備する 622/1244 Mbit/s デュアルレートバーストモデムを開発した。

非再生中継における BER 特性においては、622 Mbit/s で Eb/No が 10 dB 以上で BER が  $10^{-10}$  以下となることを確認した。また、1244 Mbit/s では、Eb/No が 13 dB 以上で BER が  $10^{-10}$  以下となることを確認した。結果として、IF 折返し時の BER 特性と比較して、622 Mbit/s に対して、2 dB 程度、1244 Mbit/s に対しては、4 dB 程度の劣化が生じた。また、Ka 周波数帯 1 搬送波による 1244 Mbit/s (2010 年時点で、世界最高速度) でのデータ通信に成功した。

622/1244 Mbit/s TDMA 通信実験が、WINDS ベンドパイプモードにおいて成功した。JRB フレームパルスに同期した WRB フレームパルスを用いることで正確に TDMA スロットにトラヒックバーストを送信することに成功している。Iperf-UDP 試験では、300 Mbit/s と 589 Mbit/s の双方向通信が確認され、フルスロットの片方向通信では、622 Mbit/s を確認した。hybla TCP を用いた 622/1244 Mbit/s に対しては、200 ~ 300 Mbit/s の帯域幅が達成された。

また、アプリケーション実験として、関東-近畿ビーム間 622 Mbit/s-1 波 TDMA 通信モードを使用して、

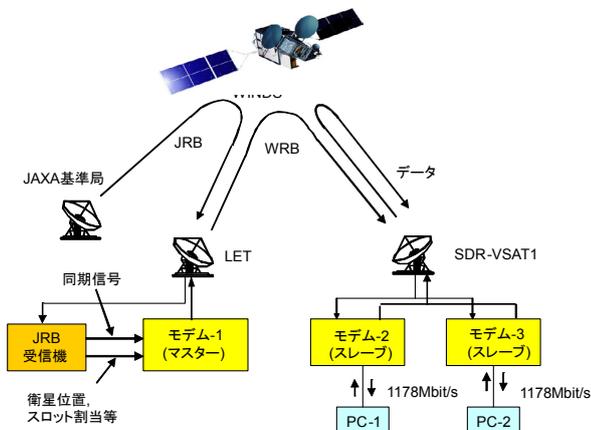


図 14 1244 Mbit/s TDMA 通信実験

表 8 iperf 試験 (UDP)

SDR-VSAT1 ⇄ SDR-VSAT1	Eb/No	589 Mbit/s	備考
Modem-2 ⇒ Modem-3	13 dB-14 dB	Loss 0 %	9 スロット / フレーム
Modem-3 ⇒ Modem-2	13 dB-14 dB	Loss 0 %	9 スロット / フレーム

表 9 hybla TCP スループット

時間 (sec)	ウィンドウサイズ (Mbyte)	帯域幅 (Mbit/s)
180	4	50
180	32	206
		264
		210
		244
180	64	213
		226
		176
		274

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
0		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
1	JRB WRB	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
2		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
3		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
4		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
5		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
6		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
7		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
8		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
9		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
10		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
11		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
12		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
13		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
14		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
15		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2

1:SDR-VSAT1 (MODEM2)⇒SDR-VSAT1 (MODEM3)  
2:SDR-VSAT1 (MODEM3)⇒SDR-VSAT1 (MODEM2)

図 15 iperf 試験に対する TDMA スロット割当て

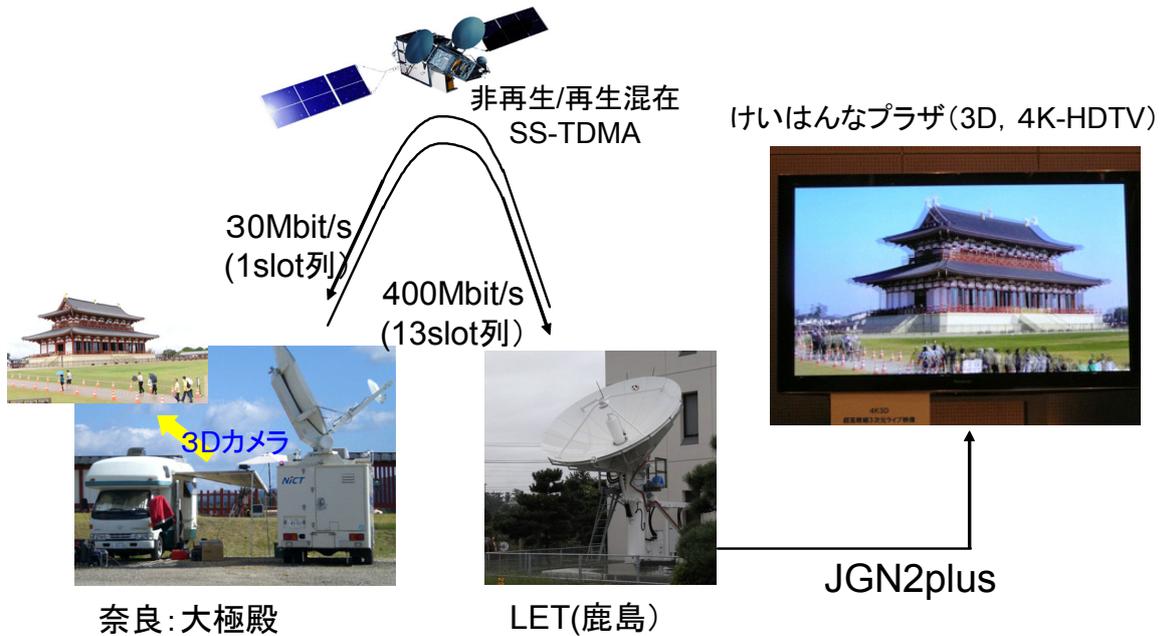


図 16 3 D, 4 K-HDTV 伝送実験

立体 (3 D) 4 K-HDTV 映像伝送実験を実施し、成功した。

## 謝辞

WINDS の実験に携わった関係各位に謝意を表します。高速バーストモデム開発に、尽力いただいた株式会社ジェピコと ViaSat Inc. 関係各位に謝意を表します。3 D, 4 K-HDTV 映像伝送に携わられた関係各位に謝意を表します。

## 【参考文献】

- 1 R. Suzuki, N. Yoshimura, Y. Hashimoto, Y. Ogawa, T. Kuroda, T. Takahashi, and M. Shimada, "Development of Communication Subsystem for the WINDS," Proc. of AIAA ICSSC, I000159, Rome, Italy, Sept. 2005
- 2 島田, 黒田, 小川, 鈴木, 高橋, 鳥海, 細田, 大島, "超高速インターネット衛星 (WINDS) の通信システム実験概要," 第 50 回宇宙科学技術連合講演会, 3 D 02, 2006-11.
- 3 "超高速インターネット衛星 (WINDS) 特集," 情報通信研究機構季報, vol.53, no.4, Dec. 2007.
- 4 橋本, 高橋, 吉村, 鈴木, G. Richard, and D.Mike, "WINDS 超高速通信ネットワークの開発," 第 50 回宇宙科学技術連合講演会, 3 D 10, 2006-11.
- 5 T. Takahashi, Y. Hashimoto, N. Yoshimura, R. Suzuki, T. Kuroda, Y. Ogawa, T. Ogawa, and I. Hosoda, "Development of High-Data-Rate Burst Modem for WINDS," Proc. of AIAA ICSSC, AIAA 2007-3159, Seoul, Korea, April 2007
- 6 Y. Hashimoto, M. Ohkawa, T. Takahashi, R. Gedney, and M. Dollard, "1244 Mbps High-Speed Network for WINDS Bentpipe-relay Mode," Proc. of IAF, IAC-08-B2.1.11, Glasgow, Scotland, 2008.
- 7 M. Ohkawa, A. Akaishi, T. Takahashi, H. Tsuji, S. Kitazume, S. Dave, A. Dugar, and R. Gedney, "1244 Mbps High-Speed Network for WINDS Bentpipe-relay Mode," 15 th Ka Band & Broadband Conference, Cagliari, Italy, Sept. 2009.
- 8 大川, 赤石, 浅井, 川崎, 橋本, 鈴木, 高橋, "WINDS 非再生中継モードにおける 622/1244 Mbps 高速 TDMA 通信システムの開発とその性能," 電子情報通信学会論文誌 B, J94-B, no3, pp392-401, March 2011.

- 9 M. Ohkawa, A. Akaishi, T. Asai, S. Nagai, N. Katayama, K. Kawasaki, and T. Takahashi, "622/1244 Mbit/s TDMA Satellite Communication Experiments by using WINDS," 17th Ka Band & Broadband Conference, Palermo, Italy, Oct. 2011.
- 10 A. Akaishi, M. Ohkawa, T. Asai, S. Nagai, N. Katayama, K. Kawasaki, and T. Takahashi, "High-Speed Satellite Network Experiments using 622/1244 Mbps Modems," Proc. of AIAA ICSSC, AIAA 2011-8044, Nara, Japan, Nov. 2011.
- 11 M. Ohkawa, A. Akaishi, T. Asai, S. Nagai, N. Katayama, K. Kawasaki, and T. Takahashi, "Three Terminals Communication and TCP Performance Experiments by WINDS 622/1244 Mbit/s TDMA System," 18 th Ka Band & Broadband Conference, Ottawa, Canada, Sept. 2012.
- 12 Y. Arakawa, "4K3D Image and its Transmission Technology," Proc. of 5 th International Universal Communication Symposium (IUCS), Gumi, Korea, Oct. 2011.
- 13 "超臨場感コミュニケーション特集," 情報通信研究機構季報, vol.56, nos.1/2, March 2007.



大川 貢 (おおかわ みつぐ)

ワイヤレスネットワーク総合研究センター  
宇宙通信研究室  
主任研究員  
博士 (工学)  
衛星通信システム



赤石 明 (あかいし あきら)

ワイヤレスネットワーク総合研究センター  
宇宙通信研究室  
技術員 (当時)  
衛星通信システム



**浅井敏男** (あさい としお)

ワイヤレスネットワーク総合研究センター  
宇宙通信研究室  
衛星通信システム



**片山典彦** (かたやま のりひこ)

ワイヤレスネットワーク総合研究センター  
宇宙通信研究室  
研究員  
博士(工学)  
衛星通信、電波伝搬、ネットワーク



**川崎和義** (かわさき かずよし)

ワイヤレスネットワーク総合研究センター  
宇宙通信研究室  
主任研究員  
衛星通信



**高橋 卓** (たかはし たかし)

ワイヤレスネットワーク総合研究センター  
宇宙通信研究室  
副室長  
衛星通信