

3-5 16APSK/16QAM-OFDM 3.2 Gbps RF 信号ダイレクト変復調装置を用いた WINDS 衛星伝送実験

鈴木健治 矢羽田将友 渡辺哲也 星 健一 奥居民生
荒川佳樹 浅井敏男 菅 智茂 高橋 卓 豊嶋守生

NICT では WINDS 衛星の非再生中継器の 1.1 GHz の帯域幅にこれまで高速バーストモデムによって 1.2 Gbps の信号を通した実験を行ってきた。我々は 16 APSK/16 QAM-OFDM 3.2 Gbps の多値変調周波数多重による RF 信号ダイレクト変復調装置を開発した。10 GbE インタフェースを介して 4K 超高精細映像を WINDS 衛星回線に通す伝送実験に成功したのでその概要について報告する。

1 まえがき

NICT は 2008 年に打ち上げられた超高速インターネット衛星「きずな」(WINDS) を用いた高速衛星通信の研究開発を行っている [1]。2010 年には WINDS 衛星の Ka 帯非再生中継器の 1.1 GHz 帯域幅を最大限使用して、単一搬送波による伝送速度 1.2 Gbps に成功した [2]。また、SRAM 型の FPGA を用いたソフトウェア無線機“再構成通信機”の Engineering Flight Model (EFM) (図 1) の開発を行ってきた [3]。これは、軌道上に打ち上げた後でも、地上から回路情報をアップロードすることで回路そのものの変更が可能な衛星搭載用中継器である。この再構成通信機を小型軽量化するため、“16 APSK 750 Mbps RF 信号ダイレクト変復調装置”を開発した [4]。近年、Inmarsat-5 [5]、KA-SAT [6]、Viasat-1、Echostar 17 などの高スループット衛星 (HTS) [7][8] において、1 衛星あたりの総容量は数 10 Mbps～数 100 Gbps となっている [9]。近い将来、各ユーザリンクのデータレートは、ダウンリンクの数 10 Mbps、アップリンクの数 Mbps が数 Gbps に増加すると考えられる。そのため本研究では、WINDS 衛星の Ka 帯の電力と周波数帯域幅の両方が制限された 1.1 GHz 帯域幅の中で最高のデータレートに挑戦し、再構成通信機の開発で培った技術を活用した 16 APSK RF 信号ダイレクト変調装置の技術を応用した多値変調周波数多重による 16 APSK-OFDM (16 値振幅位相変調・直交周波数多重方式) 及び 16 QAM-OFDM (16 値直角位相振幅変調・直交周波数多重方式) 3.2 Gbps RF 信号ダイレクト変復調装置を開発した。そして、群遅延ひずみ及び振幅ひずみの改善を行うことにより WINDS 衛星回線において 6.12×10^{-3} を達成した。これに LDPC 誤り訂正機能

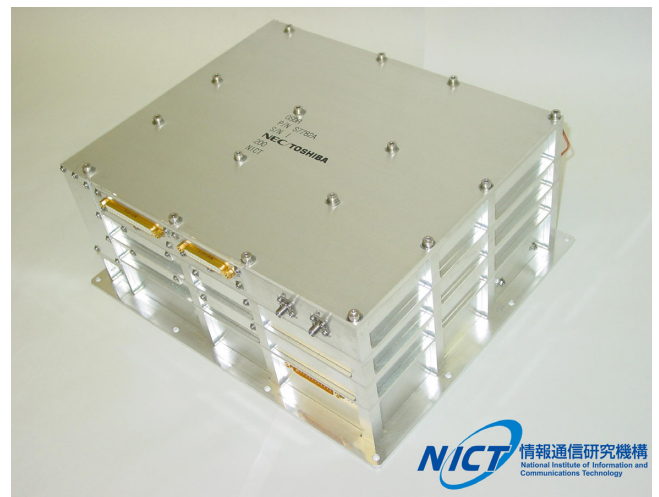


図 1 再構成通信機エンジニアリングフライトモデル (EFM)

を追加し準エラーフリーを実現し、データ伝送レート 3.2 Gbps 広帯域伝送に成功した。さらに、マルチチャネル映像伝送コーデックを接続した 10 GbE インタフェースを追加することで、4 K 超高精細非圧縮映像の UDP/IP 伝送に成功した [10]。

2 16APSK/16QAM-OFDM 3.2 Gbps 変復調装置

16 APSK/16 QAM-OFDM 3.2 Gbps 変復調装置の全体系統図を図 2 に示す。また、その諸元を表 1 に示す。図 3 に 16 APSK/16 QAM-OFDM 3.2 Gbps 変復調装置の変調器及び復調器の試作ボードの写真を示す。図 4 (a) に 16 APSK、図 4 (b) に 16 QAM の信号マッピングを示す。図 5 に示すように、16 APSK / 16 QAM 信号は 16 個の周波数 (サブキャリア: $f_0 \sim f_{15}$) に多重化し、3.2 Gbps のデータ転送速度を実現し

3 超高速衛星通信技術

ている。伝送路にひずみを生じさせる符号間干渉の影響を軽減するためのガードインターバルを考慮し、周波数間隔を 57.14 MHz、全帯域幅(等価雑音帯域幅)を 940 MHz としている。単一搬送波の 16 APSK

750 Mbps 信号では周波数帯域幅が広がり、地球局の通信装置や衛星回線、衛星中継器特性による群遅延の影響をキャンセルするため、イコライザ係数の調整等が必須であったが、OFDM では、1 波当たりの周波数帯域幅を狭くできるため、それらの影響を軽減することができた。

表 1 16APSK/16QAM-OFDM 3.2 Gbps 変復調装置の諸元表

	仕様
信号方式:	16APSK-OFDM, GI=2.5ns (radius ratio $\gamma=R2/R1=2.73205$), 16QAM-OFDM
信号マッピング:	DVB-S2準拠(16APSK) グレイコード(16QAM)
データレート:	3200Mbps =50Msps x 4bit/symbol x 16ch
誤り訂正符号:	LDPC符号(CCSDS 131.1-O-2, Shortened(8160,7136))
インターリーブ:	副搬送波間インターリーブ(8波ごと)
ランダムイズ:	生成多項式 $h(x)=x^8+x^7+x^5+x^3+1$ (CCSDS)
10GbE インタフェース:	10GbE SFP+ インタフェース Internet Protocol: UDP/IP ビットレート: 3200Mbps (誤り訂正付加後)

3 4K 超高精細映像 WINDS 衛星伝送実験

図 6 に WINDS 衛星伝送実験概念図を示す。衛星伝送実験では、地球局には 2.4 m アンテナを有する大型車載地球局を用い WINDS 衛星折り返し伝送実験を行っている。地球局送信側の FPGA では、衛星への過剰な入力を防ぐため、CF (Clip and Filtering) によるデジタルクリッピング (9 dB Back Off) している。地球局送信機の出力の飽和点が衛星への過剰な入力点よりも低いため、アナログ限界にも問題ない。図 7 は、WINDS 衛星を介した受信スペクトラムを示す。図 8 は、復調部における 16 波それぞれの I/Q コンスタレーションを示す。中継器の振幅周波数特性の影響により

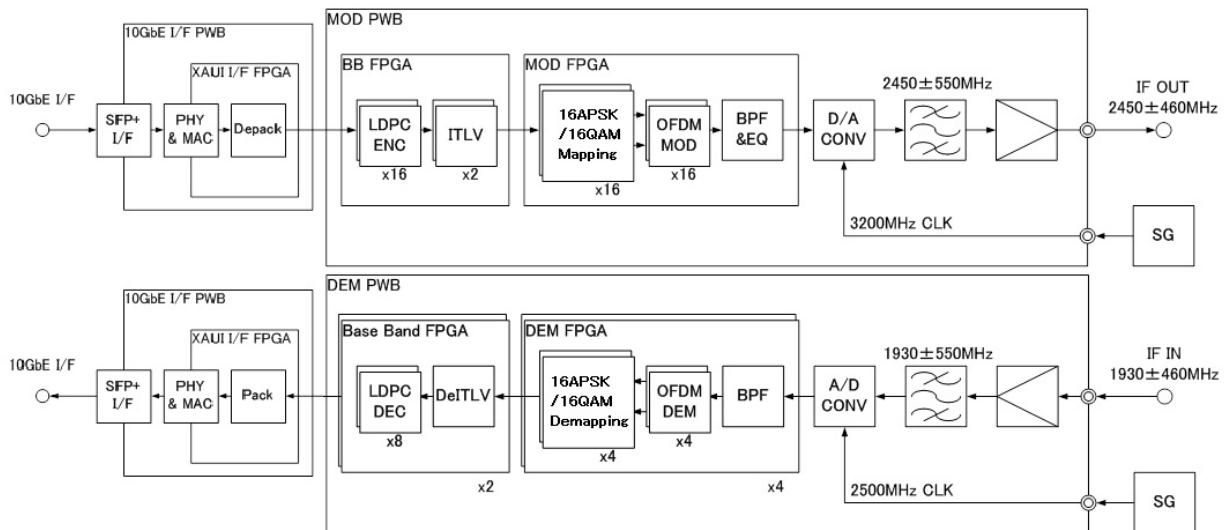


図 2 16APSK/16QAM-OFDM 3.2 Gbps 変復調装置の全体系統図

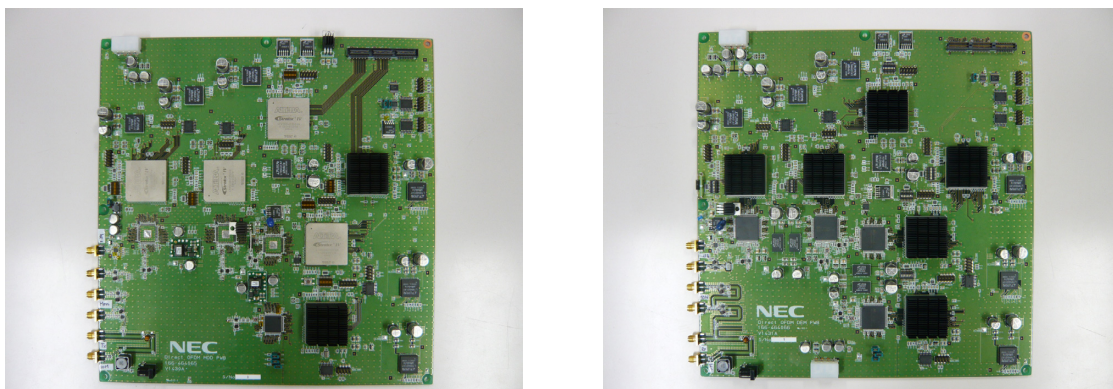
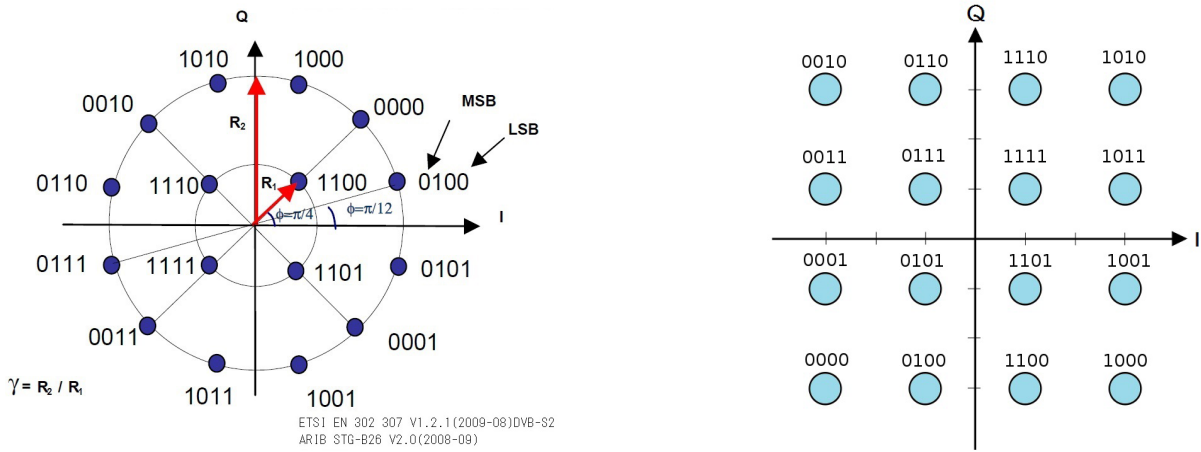


図 3 16APSK/16QAM-OFDM 3.2 Gbps 試作ボード (左: 変調器、右: 復調器)



(a) 16APSK 信号マッピング

(b) 16QAM 信号マッピング

図 4 信号マッピング (a) 16APSK 信号マッピング、(b) 16QAM 信号マッピング

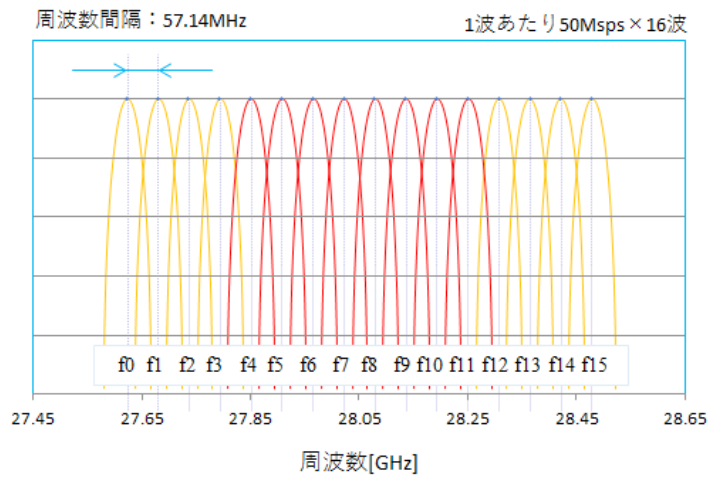


図 5 16APSK/16QAM-OFDM 周波数配列

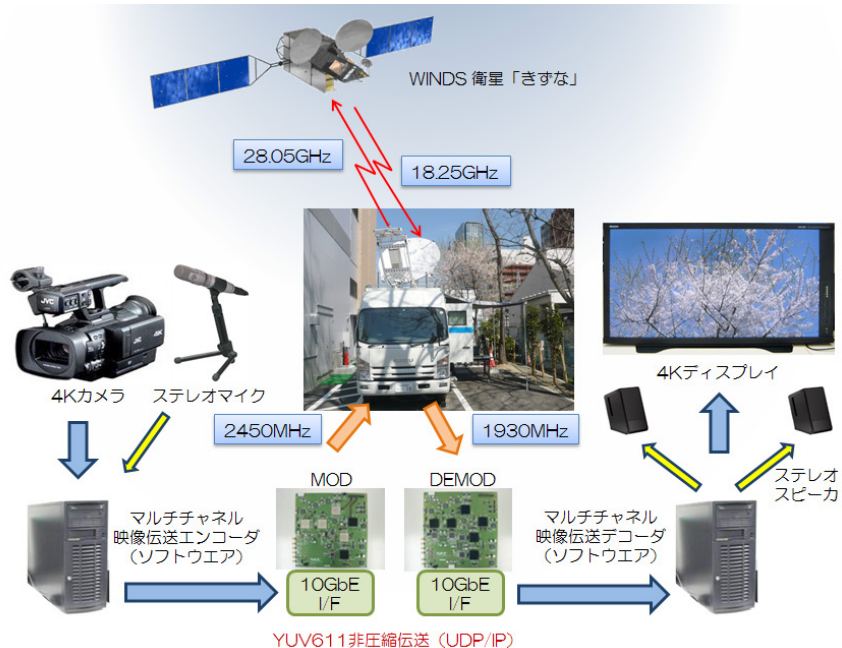


図 6 WINDS 衛星伝送実験概念図

3 超高速衛星通信技術

波ごとの E_s/N_0 が異なるため、復調特性に差が見られるが、16波がすべて正常に復調されていることが分かる。この時の誤り訂正前の BER は 6.12×10^{-3} となった。これに LDPC 誤り訂正によって準エラーフリー ($BER < 1.0 \times 10^{-11}$) を達成した。図9は、 E_b/N_0 が 14.5 dB の場合の 16 APSK と 16 QAM の f12 サブキャリアの I/Q コンスタレーションを示す。16 QAM は、エラー訂正前の BER が 16 APSK と比較して向上していることを確認した。図10は、良好なリンクバジェットの下で再測定された 16 APSK-OFDM 及び 16 QAM-OFDM の BER 特性の測定結果を示す。16 QAM の理論値からはかなりの劣化があるが、これは RF 機器の振幅周波数特性、群遅延特性による劣化、アンプの非線形性、バックオフの不足が考えられる。グラフから同じ BER を得るのに

16 QAM-OFDM は、16 APSK-OFDM よりも E_b/N_0 値で約 0.9 dB ほど有利であることが分かる。

4 K 超高精細映像非圧縮伝送実験では映像伝送コーデックとして、NICT が研究開発した「マルチチャネル映像伝送コーデック」[11] を使用した。このコーデックはすべてソフトウェアベースで構成され、マルチコア PC 上で超高速、マルチチャネルの並列処理を実現したものである。今回は情報量として、画素数をそのままにして色差成分を間引く方法により、4/9 倍 (YUV611) の情報転送レート約 2.65 Gbps としている。4チャンネルの映像 (ハイビジョン映像 × 4 枚) の同時同期伝送を行うことにより 4 K 超高精細非圧縮映像の UDP/IP 伝送を行い、パケットロスが発生しないことを確認した。図11に WINDS 衛星折り返し後の 4 K 超高精細映像表示例を示す。

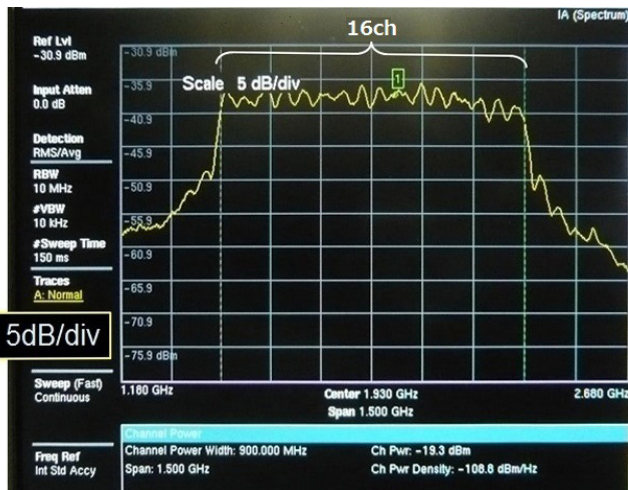


図7 受信スペクトラム

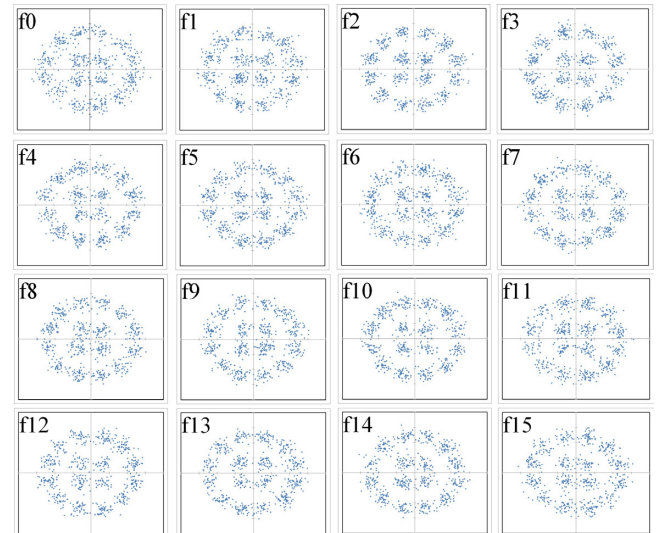
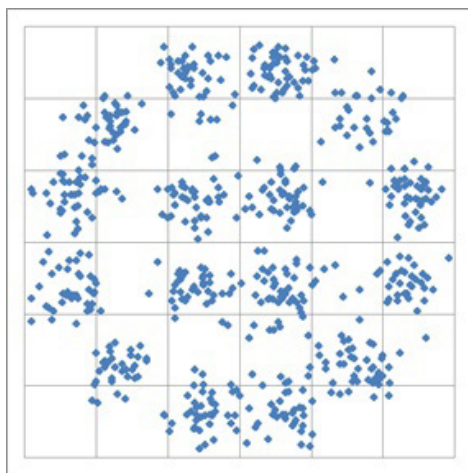
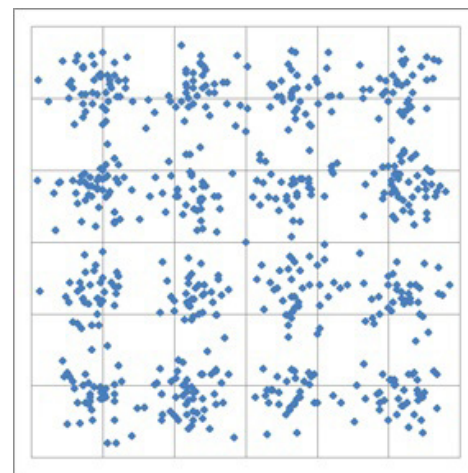


図8 16波16APSK-OFDM I/Q コンスタレーション



16APSK-OFDM (BER= 9.82×10^{-3})



16QAM-OFDM (BER= 8.30×10^{-3})

図9 f12 I/Q コンスタレーション比較 ($E_b/N_0=14.5$ [dB])

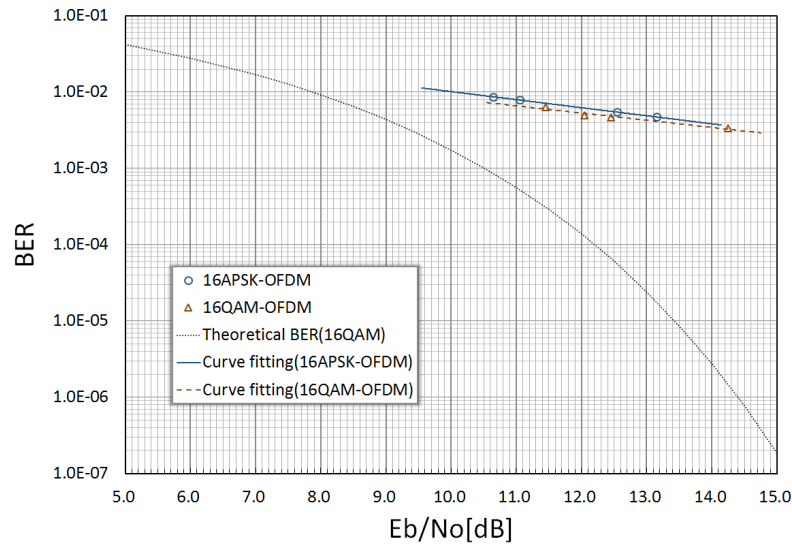


図 10 16APSK/16QAM-OFDM BER 特性



図 11 WINDS 衛星折り返し後の 4K 超高精細映像表示例

4 おわりに

WINDS 衛星の Ka 帯非再生中継器の 1.1 GHz 帯域幅に 16 APSK/16 QAM-OFDM RF 信号ダイレクト変復調装置を用いた WINDS 衛星伝送実験に成功した。3.2 Gbps の衛星伝送が可能となったことで、大型車載地球局により遠隔地の専門医に医療情報を的確に伝える遠隔医療への活用が期待され、また、万一災害が起きたときには、被災地の状況や負傷者の負傷箇所を 4 K 超高精細映像で迅速に災害対策本部等に高画質伝送することが可能となる。今後は、更なる広帯域伝送の可能性の検討を進める。将来的には、開発した技術の衛星搭載化を検討し通信衛星・観測衛星の広帯域フィードリンクとしての活用の可能性の検討を行う予定である。

謝辞

最後に、本研究を進めるにあたり日頃からご協力頂いている JAXA ほか WINDS 衛星関係各位に感謝致します。

【参考文献】

- 1 N. Kadowaki, R. Suzuki, T. Takahashi, N. Yoshimura, M. Nakao, and H. Wakana, "Broadband Satellite Communications Experiment Using "Kizuna" (WINDS)," IEICE Transactions on Communications, vol. J94-B, no.3, pp.325-332, March 2011.
- 2 M. Ohkawa, A. Akaishi, T. Asai, S. Nagai, N. Katayama, K. Kawasaki, and T. Takahashi, "622/1244Mbit/s TDMA Satellite Communication Experiments by using WINDS," 17th Ka and Broadband Communications, Navigation and Earth Observation Conference, pp.505-512, Oct. 2011.
- 3 鈴木健治, 西永望, 芳賀健二, 岡田英人, 米田誠良, 鈴木龍太郎, "再構成通信機の開発," 信学会 2010 年ソサイエティ大会, BI-1-8, pp.SS-69 ~ SS-70, Sept. 2010.

3 超高速衛星通信技術

- 4 M. Yahata, S. Yoshikawa, T. Okui, T. Watanabe, M. Kato, M. Yoneda, K. Suzuki, R. Suzuki, and M. Toyoshima, "Communication Experiment with WINDS by RF signal Direct-Processing Transmitter and Receiver in high- efficiency modulation for Reconfigurable Communication Equipment," 2013-j-13, 29 th ISTS, June 2013.
- 5 P. J. Hadinger, "Inmarsat Global Xpress: The Design, Implementation, and Activation of a Global Ka-Band Network," 33 rd AIAA ICSSC, AIAA 2015-4303, pp.1-8, Sept. 2015.
- 6 H. Fenech "HTS Systems Today and Tomorrow," 33rd AIAA ICSSC, ICSSC Colloquium 3, pp.1-30, Sept. 2015.
- 7 T. Nagoya, M. Sasanuma, Y. Morita, K. Murase, and H. Kobashi, "[Special Talk] Recent Trend of Satellite Communication Service," Technical Report of IEICE, vol.115, no.287, SAT2015-57, pp.51-56, Nov. 2015.
- 8 D. Ball, "HTS System Engineering," 33rd AIAA ICSSC, ICSSC Colloquium 2, pp.2-36, Sept. 2015.
- 9 H. Fenech, S. Amos, A. Tomatis, and V. Soumpholphakdy, "High Throughput Satellite Systems: An Analytical Approach," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol.51, no.1, pp.192-202, Jan. 2015.
- 9 H. Fenech, S. Amos, A. Tomatis, and V. Soumpholphakdy, "High Throughput Satellite Systems: An Analytical Approach," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol.51, no.1, pp.192-202, Jan. 2015.
- 10 K. Suzuki, M. Yahata, M. Kato, T. Watanabe, K. Hoshi, T. Okui, S. Yoshikawa, M. Yoneda, Y. Arakawa, T. Asai, T. Takahashi, and M. Toyoshima, "16APSK-OFDM 3.2Gbps RF Signal Direct-Processing Transmitter and Receiver Communication Experiment for Reconfigurable Communication Equipment Using WINDS Satellite," 20th Ka and Broadband Communications, Navigation and Earth Observation Conference (Salerno / Vietri (Italy)), vol.3/3, pp.827-832, Oct. 2014.
- 11 Y. Arakawa, "4K3D image and its transmission technologies," Journal of National Institute of Information and Communications Technology, vol.57 nos.1/2, pp.195-208 March/June 2010.



星 健一 (ほし けんいち)
NEC Corporation
衛星通信



奥居民生 (おくい たみお)
NEC Corporation
衛星通信



荒川佳樹 (あらかわ よしき)
グローバル推進部門
国際研究連携展開室
博士(工学)
画像処理



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



鈴木健治 (すずき けんじ)
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



菅 智茂 (かん ともしげ)
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



矢羽田将友 (やはた まさとし)
NEC Corporation
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



渡辺哲也 (わたなべ てつや)
NEC Corporation
衛星通信



豊嶋守生 (とよしま もりお)
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
室長
博士(工学)
光衛星通信