

3-8 航空機通信実験報告

菅 智茂 片山典彦 高橋 卓

衛星通信は地上の通信網が届かない航空機の飛行時において有効な通信手段である。航空機の飛行中においては、乗客のエンターテイメント利用のため、大容量な通信サービスが望まれる。また、災害時などにおいても、合成開口レーダで取得した高詳細、大容量な画像データのリアルタイム伝送が不可欠になっている。本稿では、情報通信研究機構 (NICT) が開発した WINDS 衛星用航空機地球局の概要及び開発した航空機地球局を実際に航空機に搭載して行った WINDS マルチビームアンテナ (MBA) のアンテナパターン特性、航空機地球局アンテナの追尾特性、飛行時のドップラ特性、データ伝送特性及び大容量ファイル特性の飛行実験の結果について述べる。本実験では飛行時において約 20 Mbps の速度でのファイル伝送に成功した。

1 まえがき

衛星通信は航空機の飛行時、洋上及び大規模災害が発生した場合、携帯電話等の地上系の通信インフラが使用不可の場所・場合において有効な情報通信の手段となる。特に一刻を争う災害時においては、動画、地形データ等の被災地の情報をリアルタイムで共有するなど大容量の通信が望まれる。また、平常時でも旅客機内でのエンターテイメント利用など、通信容量の増大化傾向は止まらない。

NICT では WINDS の研究を行っており [1]、移動体衛星通信の研究として衛星を自動捕捉、自動追尾可能なアンテナシステムを搭載しており、走行しながら WINDS 衛星との通信が可能な小型車載地球局 [2]、洋上での通信可能な船舶用地球局 [3] を開発し、実験・運用している。ここでは、飛行時の衛星通信の研究を行うため開発した航空機地球局の概要及び開発した航空機地球局を実際に航空機に搭載して行った飛行実験 [4]-[6] について述べる。

2 WINDS 航空機地球局

航空機地球局の諸元を表 1 に、構成図を図 1 に示す。アンテナは図 2 に示す開口径 45 cm のカセグレンアンテナを用いており、利得は送信 38.7 dBi、受信 36.1 dBi となっている。200 W クラスの大電力増幅器 (HPA)、低雑音受信周波数変換器 (LNC) 及び変復調器などで構成されている。

航空機地球局に搭載されているアンテナシステムは GPS 受信機から得られる自局の位置情報と慣性航法装置 (IRU) の情報から衛星と自局の位置関係を計算し、アンテナ制御部 (ACU) よりアンテナの指向方向

表 1 航空機地球局諸元

送信周波数	27.5-28.6 GHz
受信周波数	17.7-18.8 GHz, 18.9 GHz (Beacon を受信)
偏波	直線偏波 (V/H)
アンテナ	カセグレンアンテナ 開口径: 45 cm
アンテナ利得	38.7 dBi (送信) 36.1 dBi (受信)
大電力増幅器	200 W TWTA
G/T	13.2 dB/K
アンテナ駆動範囲	El: 25-65 deg Az: 無限回転
追尾精度	< ± 0.5 deg
データレート	再生中継方式 Tx: 1.5, 6, 24, 51 Mbps Rx: 155 Mbps
ユーザーインターフェース	Ethernet (1000 base-T)

を制御することで衛星を自動捕捉、自動追尾を行う。また、追尾誤差が大きくなった場合や衛星からの信号を受信できない場合には干渉対策のため送信を止める (インターロック) 機能を有している。

3 飛行実験

3.1 実験概要

WINDS 航空機地球局は図 3 に示すダイヤモンドエアサービス社の Gulfstream-III[7] に搭載した。機内には地球局のほかに受信レベル測定用のスペクトラムアナライザ及び伝送試験用 PC、ログ収集用 PC を設置した。図 4 に機内の地球局及び測定装置の設置状況を

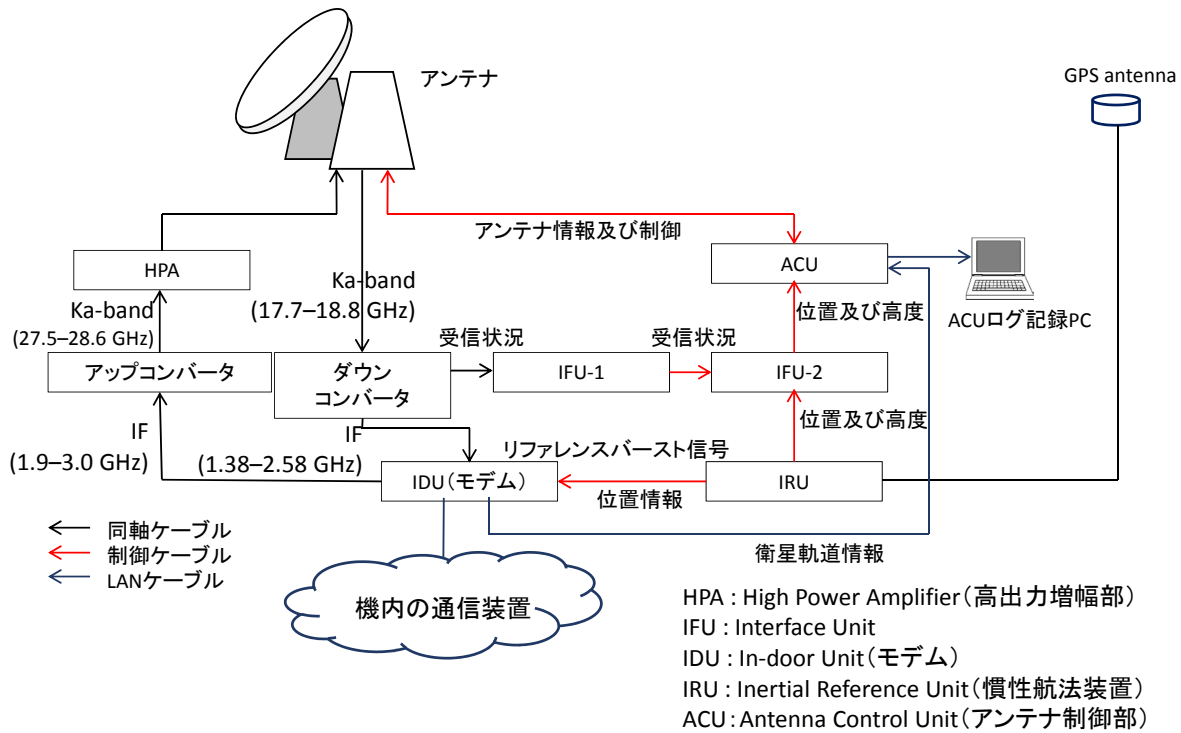


図1 航空機地球局構成図



図2 航空機地球局アンテナ外観



図3 実験に用いた航空機 Gulfstream-II

示す。図5に本実験で用いたネットワーク構成を示す。「航空機地球局」-「衛星」-「固定地球局(鹿島)」との間で衛星回線を結んだ。航空機は愛知県にある県営名古屋空港を発着として図6に示す WINDS マルチビームアンテナの中部ビームエリアの上空を飛行した。

飛行実験は (a) アンテナパターン測定: MBA 中部ビームのアンテナパターン検証のための伝搬測定実験、(b) アンテナ追尾特性: アンテナ追尾特性取得のための8の字飛行及び機体を傾けての飛行実験、(c) データ伝送: 飛行時の通信速度測定実験、(d) 大容量ファ

イル伝送: Pi-SAR[8]にて取得した画像データファイルの伝送実験、の4つを行った。

4 実験結果

(a) アンテナパターン測定

図7にMBA 中部ビームのアンテナパターン測定時の受信電力(飛行経路)を示す。高度5,300 mにおいて東から西へビーム中心を通るように飛行した。そのときの受信電力の時間変動を図8に示す。ビーム中心付近において受信電力はピークを記録し、受信電力が約-52 dBmとなる、ビーム中心より約172 km離れた地点で通信が途切れた。図9に横軸をビーム中心からの距離としたアンテナパターンの特性を示す。図中赤

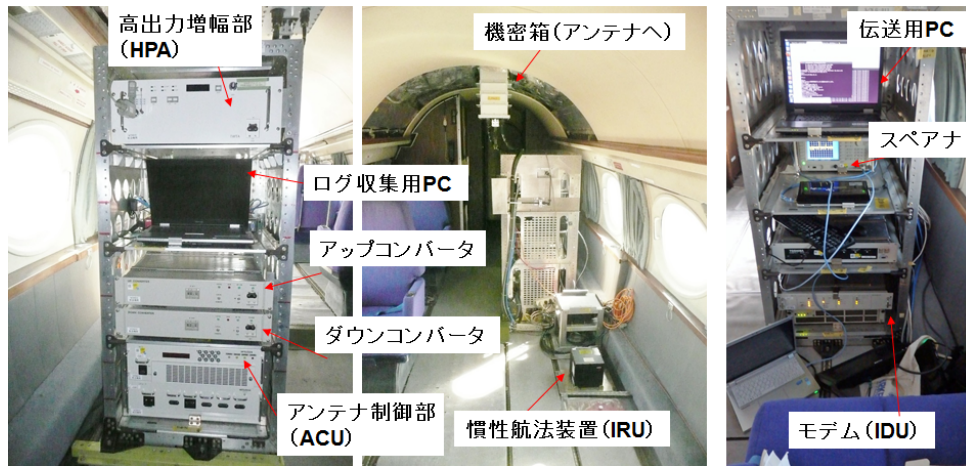


図4 航空機内に設置した地球局及び測定装置

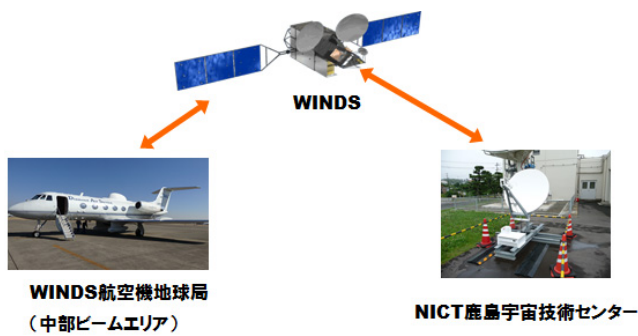


図5 ネットワーク構成図

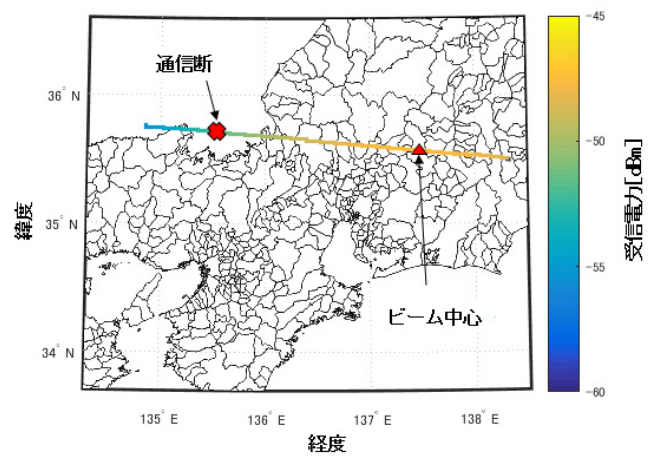


図7 直線飛行時の受信電力マップ

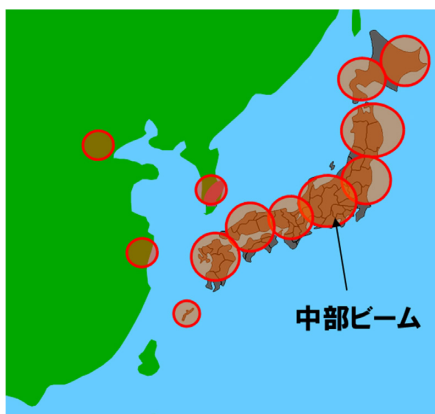


図6 WINDS マルチビームアンテナ照射エリア

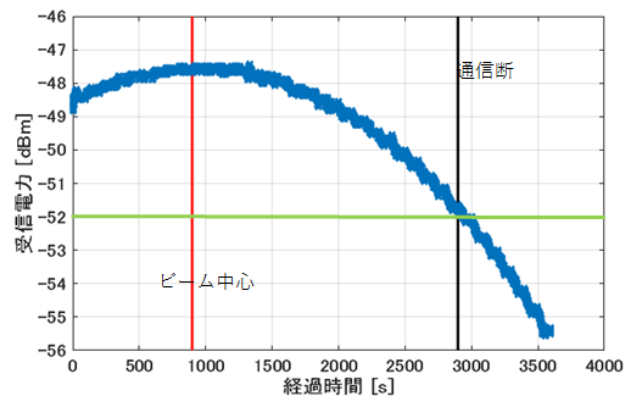


図8 直線飛行時における受信電力変動

線は初期チェックアウト時にアンテナビームパターンである。初期チェックアウトの測定では衛星の副反射鏡を動かすことによりアンテナビームを測定している。ビーム中心より 170 km の地点までは初期チェックアウトの値と今回の測定値とがよく一致し、240 km 地点においても誤差は約 0.5 dB となっている。WINDS の打上げから 8 年経過しているが今回の測定値と初期

チェックアウト時の値とが非常に一致していることがわかった。さらに、測定点を移動して測定を行った今回の測定と衛星の副反射鏡を駆動し一点の測定点で測定した結果がよく一致することも確認できた。

(b) アンテナ追尾特性

図 10 に 8 の字飛行を行った際の飛行経路 (受信電

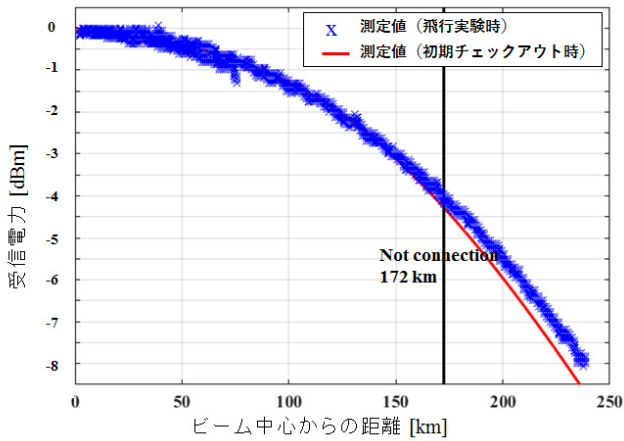


図9 MBA 中部ビームのアンテナパターン

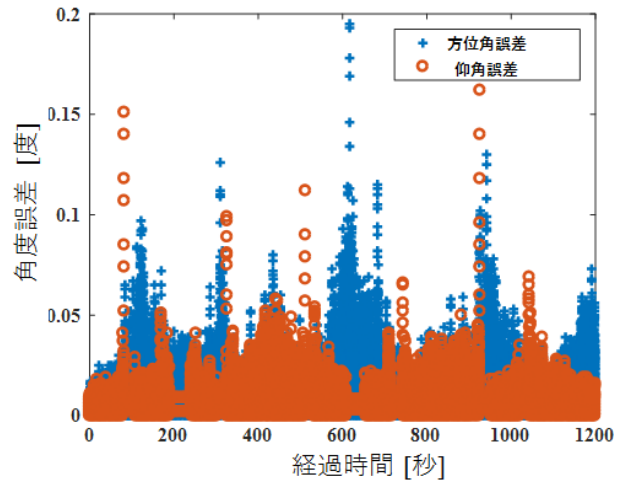


図11 8の字飛行時の角度誤差の時間変動

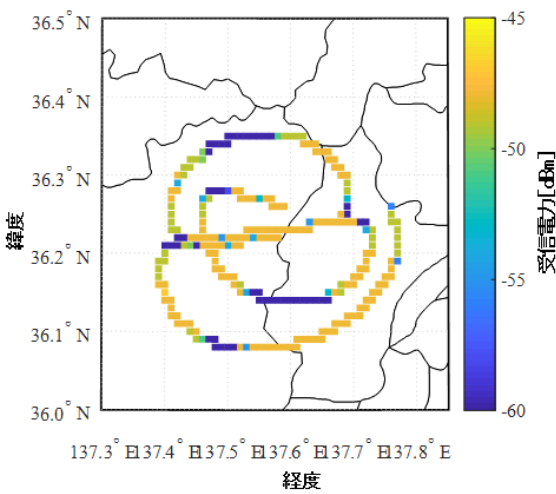


図10 アンテナ追尾特性試験時の飛行パターン(8の字飛行)

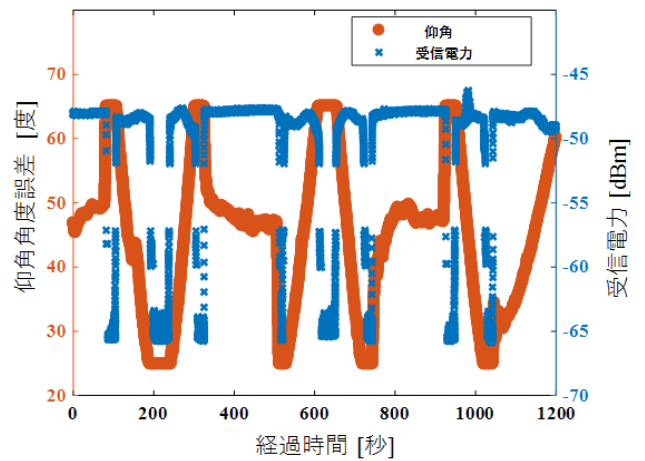


図12 8の字飛行時の仰角及び受信電力の時間変動

力マップ)を示す。図中青色の部分は受信電力が低下していることを示しており、東西方向機体が向いているときに表れていることがわかる。これは衛星が南方向に位置しているため、機体が傾いた際に東西方向への機体が向いているときに地球局アンテナの仰角の変動が大きくなるためである。図11に8の字飛行を行ったときの方位角及び仰角の誤差の時間変動を示す。図より誤差は最大でも0.2°以下となっており、追尾精度の±0.5°以下を満足していることがわかる。図12に8の字飛行を行ったときの仰角と受信レベルの時間変動を示す。仰角が追尾範囲を超える65°以上となる時及び25°以下となる際に受信電力の低下が見られるが、追尾範囲内においては受信電力が安定していることがわかる。なお、図中受信電力において-52 dBm から-57 dBmの間で値を表記していないのは、受信電力はリファレンスバースト信号の電力を読み取っているが、受信電力計測時のタイミングにより通信用信号の受信電力を計測してしまい、受信レベルが低く表示されてしまうのでその影響を除去しているためである。

以上より、開発した航空機地球局の追尾特性は飛行実験において諸元を満足することを確認できた

また、8の字飛行をした際のドップラ周波数の変動を図13に示す。このときの最大ドップラ周波数は7.9 kHzであった。時速720 kmで航空機が移動した際の最大ドップラ周波数の理論値は8.2 kHzとなる。理論値と測定値の誤差は約4%であり、ほぼ一致していると考えられる。この結果より、高速移動体のモデムの周波数追尾性能を設計する際に移動速度から導き出される最大ドップラ周波数を考慮することが有効であることを示した。なお、図中ドップラ周波数が4,000 Hz付近で値を表示していないのは、IDUのローカルリークによって受信信号の検出ができないためである。

(c) データ伝送

航空機地球局からのUDP(User Datagram Protocol)及びTCP(Transmission Control Protocol)の2つの通信プロトコルのアップリンクスループット特性の測

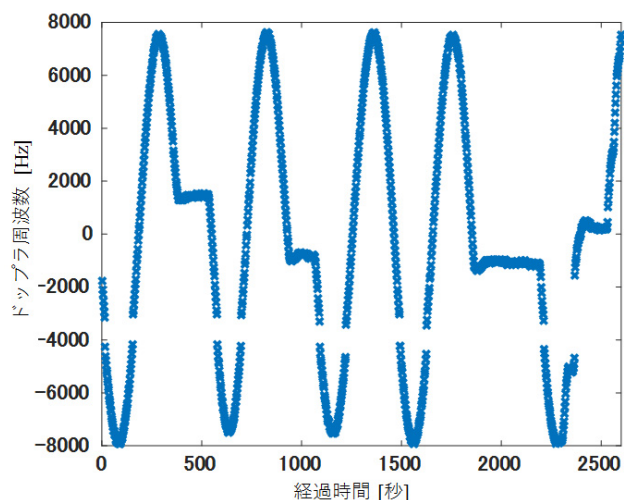


図13 8の字飛行時のドップラ周波数の時間変動

定を iperf [9] を用いて行った。測定は WINDS の再生中継方式の 51 Mbps モードを用いて安定した飛行状態のときに行った。UDP により通信を行った際のスループット特性を図 14 に示す。図よりデータレート 38 Mbps で安定した通信が行われたことがわかる。

TCP により通信を行った際のスループット特性を図 15 に示す。図より安定した通信状態において 31 Mbps の通信が行われたことがわかる。また、約 500 ms を超える遅延時間の環境においても瞬時的な通信断が発生しても通信速度が回復することを確認できた。

(d) 大容量ファイル伝送

大容量ファイル伝送実験として、航空機搭載合成開口レーダ (Pi-SAR) にて取得した高解像度の画像データファイルを航空機地球局より web サーバ上にアップロードし、アップロードに要する時間を測定した。このとき送信したファイルの容量は 192 MB であり、アップロードに掛かった時間は 1 分 18 秒であった。以上の結果より飛行時の航空機より約 20 Mbps の速度で通信を成功することができた。Pi-SAR において観測したデータを伝送データとして処理した後に地上へ送信できると同時に次の観測を行うことが可能となり、災害時において素早い状況判断、対応が可能となる。

5 むすび

Ka 帯衛星通信システムにおいて、開発した航空機地球局を航空機に搭載し飛行実験を行い、WINDS の MBA 中部ビームにおけるアンテナパターン及び開発した航空機地球局アンテナの追尾特性の検証を行った。

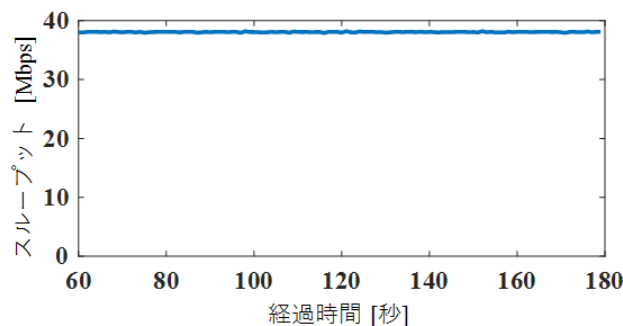


図14 UDP を用いた際のスループット特性

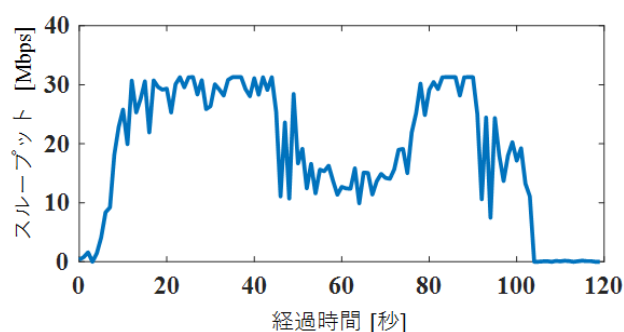


図15 TCP を用いた際のスループット特性

また、飛行時におけるデータ伝送特性及びファイル伝送特性の測定を行った。

測定の結果、MBA のアンテナパターンは WINDS の打ち上げ後に行われた初期チェックアウト時の測定値と非常によく一致することを確認できた。また、開発した航空機地球局のアンテナ追尾の精度は設計した諸元を満足するものであり、追尾範囲内において安定した通信を行えることを確認できた。データ伝送測定においては飛行時に UDP において 38 Mbps、TCP において 31 Mbps の速度で通信が行えることを確認できた。さらに、ファイル伝送実験では上空において 20 Mbps の速度で大容量ファイルの伝送に成功した。

航空機衛星通信に Ka 帯を用いることで数十 Mbps の高速な通信が行えることがわかり、災害時における被災地の情報共有や旅客機利用時のエンターテインメント利用における有効性を示した。

【参考文献】

- 1 情報通信研究機構, “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, 2007 年 12 月
- 2 Akira AKAISHI, Takashi TAKAHASHI, Mitsugu OHKAWA, Toshio ASAI, and Byeongpyo JEONG, “Ka-band Mobile Earth Station for WINDS,” 29 th ISTS, June 2013
- 3 片山 典彦, 赤石 明, 本田英貴, 高橋 卓, 川崎和義, 浅井敏男, 吉村直子, 豊嶋守生, “WINDS 船舶用地球局を用いた洋上での衛星通信実験,” 信学技報, vol.116, no.144, SAT2016-31, pp.107-112, 2016 年 7 月
- 4 Norihiko Katayama, et al., “Development of Aeronautical Earth Station for WINDS,” 30 th International Symposium on Space Technology and Science, 2015-j-10, 2015

3 超高速衛星通信技術

- 5 Takashi Takahashi, et al, "Development of Ka-band Aeronautical Earth Station for WINDS," 33 rd AIAA Internatinal Communications Satellite Systems Conference, AIAA 2015-4322, 2015.
- 6 Tomoshige Kan, et al, "Measurement of Propagation Characteristics for Ka-Band Aeronautical Satellite Communications Using WIND," 34 rd AIAA Internatinal Communications Satellite Systems Conference, AIAA 2016-5759, 2016.
- 7 ダイヤモンドエアサービス, "航空機," <http://www.das.co.jp/service/operation/aircraftspec/index.html>
- 8 灘井 章嗣, 浦塚 清峰, 梅原 俊彦, 小林 達治, 松岡 建志, 佐竹 誠, "サブメータ空間分解能を有する航空機搭載 X-band 合成開口レーダの開発," 信学技報, vol.109, no.13, SANE2009-7, pp.37-42, 2009年4月
- 9 <https://iperf.fr/>



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



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



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