

3-9 衛星通信路の非線形歪み補償実験

中台光洋 谷島正信

JAXA では地球周回衛星－地上局間の伝送システムの高速化のために、Ka 帯 (26 GHz 帯) の利用を計画している。本稿では、衛星搭載を前提としたデジタルプリディストーション (DPD) 技術によって衛星通信路に存在する非線形性を抑圧し、伝送特性が改善できることを実験的に示す。また、DPD 技術の適用によって、地上局内折返し通信路と 28 GHz 帯の衛星折返し通信路において 1.8 Gbps 伝送時の BER 規定値における 1 ビット当りの信号電力対雑音電力密度比 (Eb/No) の差を 0.4 dB 程度にまで小さくできる結果が得られたので報告する。

1 まえがき

昨今、気候や地表の変化をとらえる地球観測衛星では観測領域が広範囲かつ高分解能化されていることに加え、発災時における即時緊急観測が重要視されるようになってきており、短時間で大容量の観測データを伝送することが求められている。JAXA ではこの大容量データ伝送要求にこたえるために、地球観測衛星－地上局間の伝送システムに Ka 帯 (26 GHz 帯) 周波数を適用することを計画している [1]。Ka 帯周波数 (25.5–27 GHz) は、これまで地球観測衛星で使用されてきた X 帯周波数 (8.025–8.4 GHz) に比べて割当て可能帯域幅が 4 倍あり、飛躍的な伝送速度向上が期待できる。しかしながら Ka 帯周波数は降雨による減衰が大きく、常に回線を成立させるためには衛星の送信性能 (実効等方放射電力: EIRP) の向上が必要となる。一方で、地球周回衛星においては時間の経過とともにアンテナの指向方向の制御が必要であり、EIRP の向上に効果が大きい大形アンテナは、観測しながらデータを同時に伝送する際の制約を生じさせやすいことから採用が難しい。そこで EIRP の向上に寄与する大電力増幅器の採用が不可欠である。しかしながら衛星搭載機器は消費電力量と発熱量が厳しく制限されることから、電力効率の高い非線形領域での動作が必要となり、高速伝送に有効な多値変調方式を使用した場合に伝送特性の劣化が生じる問題がある。そこで我々は、伝送特性の劣化要因である増幅器の非線形性を衛星側で事前に線形化する信号歪み補償技術の適用を検討している。

本稿では、衛星搭載を前提とした信号歪み補償技術によって衛星通信路に存在する非線形性を抑圧し、伝送特性が改善できることを実験的に確認した結果を報告する。

2 非線形歪み補償回路の種類

歪み補償方法には大きく分けてフィードバック方式とフィードフォワード方式が存在する。フィードバック方式はフィードバックループの群遅延特性の影響により動作帯域幅が制限されることから、広帯域信号を扱う Ka 帯通信システムには適さない。一方、フィードフォワード方式は広帯域性に優れる。フィードフォワード方式をアナログ回路によって実現する場合、歪み補償用増幅器自身による伝送特性の劣化を避けるため、補償用増幅器は線形動作する必要がある。電力増幅器全体の電力効率が低くなるといったデメリットがある。また補償対象の増幅器及び補償用増幅器自身の特性の経年変化に応じて、歪みの補償特性を最適化する必要がある。良好な伝送特性の維持が難しいというデメリットがある。

フィードフォワード方式によってデジタル的に非線形性を補償する手段として、デジタルプリディストーション (DPD: Digital pre-distortion) 技術がある。DPD は補償対象となる増幅器の非線形性を測定等によりあらかじめ入手しておき、増幅器に入力する信号に逆の非線形性を与えることによって、増幅器の出力信号から歪み成分を取り除く技術である。DPD のメリットは、デジタル的に生成される送信信号に対して補正係数を乗算するだけで任意の歪み補償特性を容易に表現でき、また時間に対して不変であることや、歪み補償特性データを記録素子に書き込む方式とすることによって、必要に応じて歪み特性を簡単に修正できることにある。これらの特長により、衛星打上げ後であっても最適な特性を安定的に維持することができる。DPD の補正係数の表現には、多項式による近似や LUT (Look-up Table) を参照する方法などがあり、一般に、処理の複雑度は増幅器の特性と実現される歪み補償の性能に依存する。増幅器の周波数依存性が十

分に小さい場合には、比較的少ない演算量で十分な歪みの補償が可能であるため、衛星搭載用の歪み補償技術として有望である [2]。図 1 に DPD による歪み補償の概念図を示す。一方で、DPD で補償可能な信号帯域幅はデバイスの動作クロックに依存するため、広帯域信号に対する補償では高速動作が必要であり、実際には帯域外領域に生じる歪み成分(スペクトラムリグロース)を全て除去することは難しい。そこで DPD による歪み成分の除去だけでなく、増幅器とアンテナの間に位置する帯域制限フィルタ(BPF)等によって帯域外放射成分を減衰させることが必要である。

3 実験構成と概要

衛星通信路における DPD 回路による非線形歪み補

償の性能を確認するため、地球観測衛星の割当て周波数帯域と異なるが、同じ Ka 帯の衛星回線として超高速インターネット衛星「きずな」(以下、WINDS)のマルチビームアンテナ(MBA: Multi-beam antenna)を用いたベントパイプ回線を使用して実験を行った。このときの実験系統図を図 2 に示す。また、DPD 機能を搭載した変調試作ボードの外観写真を図 3 に示す。変調試作ボードから出力された変調信号は 3 GHz 帯の信号にアップコンバートされ、茨城県鹿嶋市にある NICT 鹿島宇宙技術センターの大型地球局 [3] (以下、鹿島局)の IF パッチの入力ポートに接続される。局内ではアップコンバータによって 3 GHz 帯の信号を 28 GHz 帯にアップコンバートし、高出力増幅器(HPA)によって増幅した後アンテナから衛星に向けて信号を送信する。WINDS では受信した 28 GHz 帯

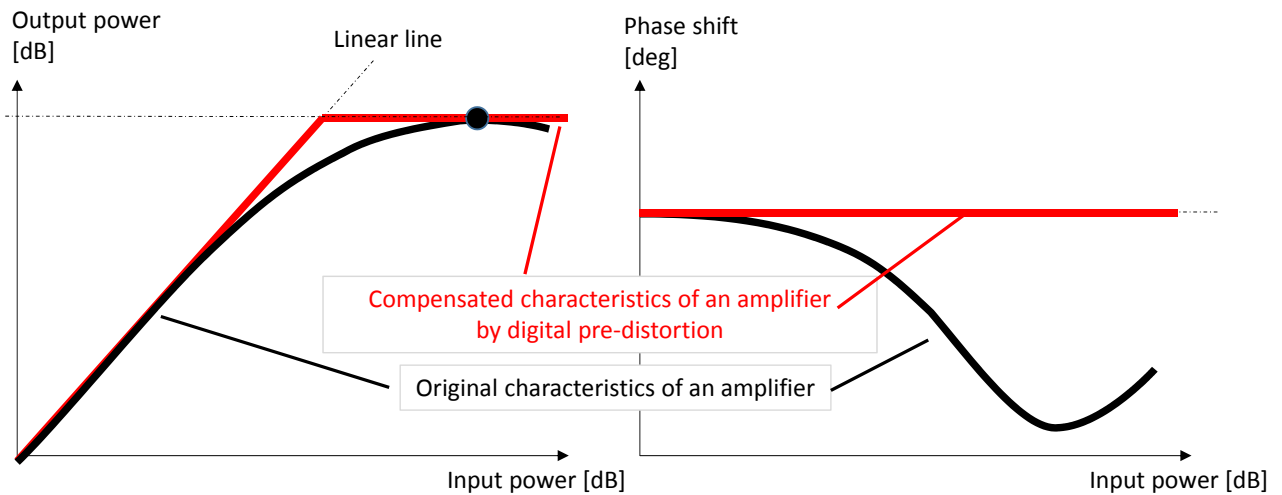


図 1 デジタルプリディストーション (DPD) による増幅器の線形化概念図

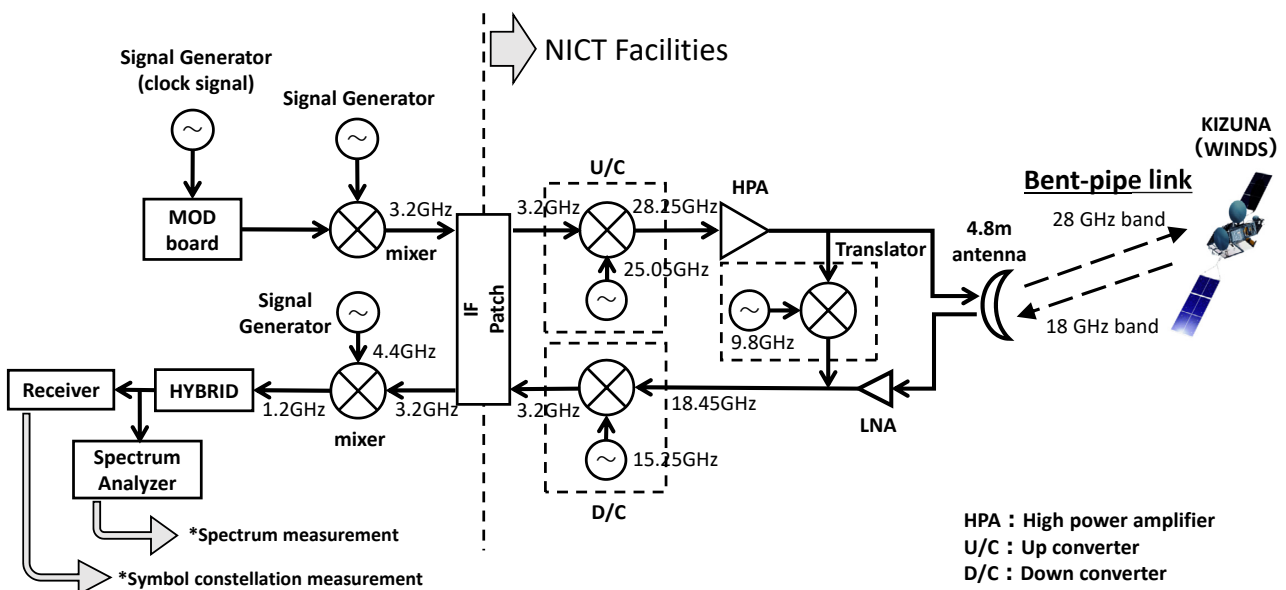


図 2 WINDS 実験系統図

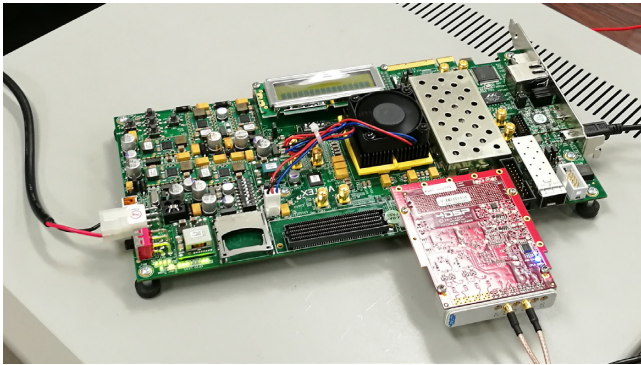


図3 非線形歪み補償回路を備えた変調試作ボード外観

の信号周波数を 18 GHz 帯に周波数変換し、信号電力を増幅した後に NICT 鹿島局に向けて信号を折返し送信する。鹿島局では WINDS から受信した 18 GHz 帯の信号を 3 GHz 帯にダウンコンバートし IF パッチから出力する。また、鹿島局には衛星を介さない経路としてトランスレータ経路がある。トランスレータ経路は局内においてアップコンバートされた 28 GHz 帯の信号を 18 GHz 帯にダウンコンバートし、受信経路に接続する経路である。WINDS 経路とトランスレータ経路はスイッチで切り替えることができる。この 2 つの異なる経路を通った信号の違いをみることで、衛星通信路の影響を評価することができる。

3 GHz 帯の受信信号は 1.2 GHz に周波数変換された後、受信機に入力される。受信機には地球観測衛星の受信機として使用可能な Zodiac Data Systems 社製の高速復調器 (Cortex High Data Rate Receiver) を使用した [4]。DPD 回路による非線形歪み補償性能は復調器の BER (Bit Error Rate) によって評価した。また、WINDS 経路は鹿島局と衛星に高出力増幅器がそれぞれ存在することや、雲などによる電波の減衰により増幅器の動作点の変動するため、あらかじめ衛星通信路の非線形性を把握できない。そこで衛星通信路の非線形性は復調器における受信コンステレーション分布により推定し、その推定結果に基づき DPD の補正係数を決めることとした。送信するデータ列は誤り訂正符号を含まない 15 段の擬似乱数 (PRN15) とし、BER 測定は受信機がビット同期した後にビットカウンタを初期化 (ゼロリセット) してから計測した。このとき 1 ビット当りの信号電力対雑音電力密度比 (E_b/N_0) は、受信機入力端の信号を方向性結合器によって分配しスペクトラムアナライザによって測定される信号電力及び雑音電力密度から計算することで求めた。衛星折返し系ではノイズ量を自由に制御することができないため、本実験では HPA の出力電力を変えることで E_b/N_0 を変化させながら BER 特性を取得した。本実験の主要パラメータを表 1 に示す。WINDS の MBA 回

表 1 実験主要パラメータ

パラメータ	値	備考
シンボルレート	340, 450 Msps	選択可能
データパターン	PRN (Pseudo-Random Noise)	15-stage
ロールオフ率	0.4	送受ともに Squared Root Raised Cosine filter
変調方式	16 QAM	

線は 1.1 GHz の帯域幅があり、本実験で必要な十分に広い帯域幅を有している。

4 実験結果

4.1 DPD による BER 特性評価

DPD による BER 改善の効果を確認するため、Gbps を超える伝送レートで最も非線形性が明瞭に確認できるシンボルレート 350 Msps (データレート 1.36 Gbps) において DPD 実施時の BER を取得した。衛星折返し通信路では、地上局の増幅器と衛星搭載増幅器の非線形性が全体の非線形性に現れることから、最も広いダイナミックレンジで BER の特性が確認できるように衛星中継器利得を適切に設定し試験を実施した。実験結果を図 4 に示す。局内折返し経路のトランスレータ経路の測定結果は E_b/N_0 が大きくなるにつれて、BER が改善される様子が見られる (図 4 緑: 実線)。また BER が小さくなるほど、所要 E_b/N_0 が増大していく様子が見られる。地上局 HPA の出力電力が 47.2 dBm を超えたあたりからエラーフロアが生じる様子が見られる。この結果よりトランスレータ経路においては、地上局の HPA の非線形性の影響が生じるのは出力電力が約 47 dBm であることがわかる。次に衛星折返し経路で測定した結果 (図 4 青: 破線)

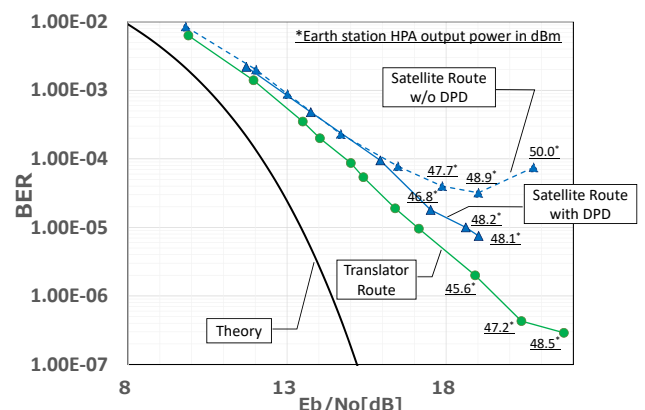


図 4 デジタルプリディストーション (DPD) による BER 特性の変化

では、トランスレータ経路と同様に、Eb/Noが大きくなるにつれてBERが劣化していく様子がみられるが、Eb/Noが18 dBを超えたあたりからエラーフロアが見えはじめ、その後Eb/Noの上昇とともにBERが上昇する様子がみられる。これは増幅器の飽和特性により信号が歪み、ビット誤りが確定的に生じはじめる傾向と一致する。トランスレータ経路の結果と比較すると、BERの劣化がより顕著であることから地上局のHPAだけでなく衛星搭載増幅器の非線形性による影響が加算されたと推測できる。これら非線形性による影響を抑圧するためにDPDを有効にした(図4青：実線)。衛星搭載増幅器の入出力特性が不明であることから、DPDはBERが最小となるようにLUTの係数の調整を行った。なお、通信路の非線形性と歪み補償特性が一致しないことによるBERへの影響については4.2において評価を行った。測定の結果、DPDなしではBERの最良値が 3.2×10^5 (Eb/No=19 dB)であったが、DPDによって、 7.5×10^6 (Eb/No=19 dB)となり、HPAの出力を上げてBERの劣化は見られなかった。Eb/Noが16 dB以下となる領域では、DPDの有無でBERに有意な変化はなく、ガウス雑音によるビット誤りが支配的であることが推測される。

4.2 増幅器特性と歪み補償量の不一致によるBERへの影響評価

我々が提案する衛星搭載用DPDでは、LUTにより増幅器の非線形性を補償することから、LUTによって作られる逆歪みを含む信号が増幅器の非線形性と一致する必要がある。経年劣化等により増幅器への入力レベルの変動もしくは増幅器のゲインの変動が生じた場合、歪み特性と補償特性が一致しないことからDPDの効果低下が予想される。そのため、LUTを最適点から0.5 dBずつ増減させたときのBER劣化の確認を行った。図5にDPD感度測定結果を示す(図5赤：実線)。入力電力を0.5 dBだけ減少及び増加させたとき受信電力の変化量、すなわちEb/Noの変化量は、それぞれ-0.18 dBと+0.51 dBであった。入力電力の変化に対する出力電力の変化が線形に変化しない要因は、通信路上の増幅特性に依存するためである。各Eb/Noにおいて最適なDPDが行われたときのBERと比較すると、LUTを理想的な動作状態から0.5 dBだけ変化させたときのBERは悪化する様子が見られ、入力電力を増加させた場合と減少させた場合で違いが見られた。これは入力電力の変化だけでなく、補償されなかった増幅器の入出力特性の非線形性の違いが劣化量の差として生じているものと推測される。これらの結果より、実際の運用においては、増幅器入力点に

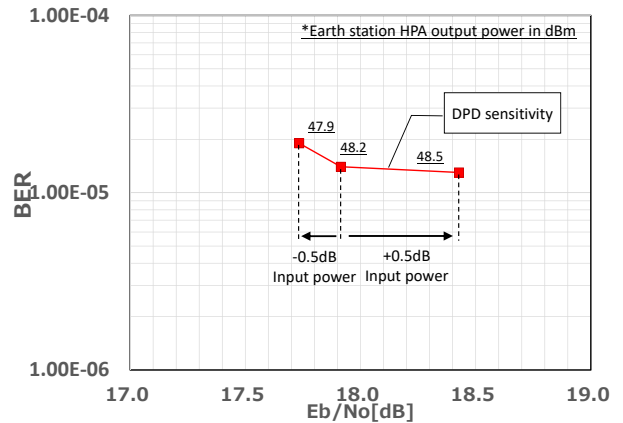


図5 デジタルプリディストーション (DPD) の補償感度の検証

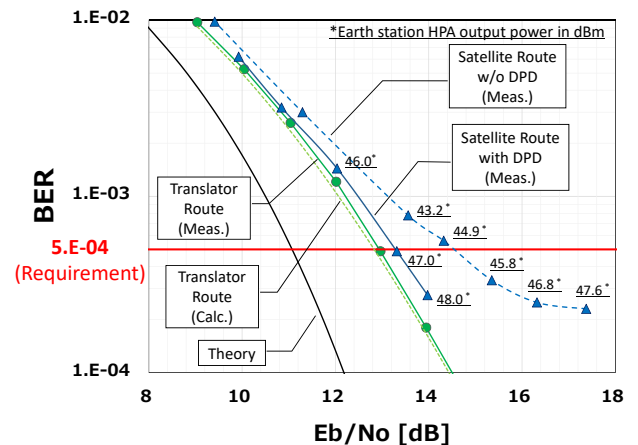


図6 伝送速度 1.8 Gbps におけるデジタルプリディストーションの効果

における信号及び増幅器特性の安定性を考慮して、BERの評価を行う必要があることがわかった。

4.3 1.8 Gbps 伝送システムにおけるDPDによるBER特性の改善

最後に、次期地球観測衛星で実現が望まれるデータ伝送速度 1.8 Gbps においてDPDによるBERの改善の効果確認するため、シンボルレート 450 Msps、ロールオフ率 0.4 の 16 QAM 信号を用いて衛星折返し経路によるBER測定を行った。4.1の実験結果では非線形性以外の伝送路特性によるBER劣化も存在し、伝送レートの増加とともに大きくなることから、本項の測定の前に、ケーブル等による伝送ロスを低減させ、実験系全体のBER劣化量の低減を図った。BER測定実験結果を図6に示す。リファレンスとなるトランスレータ折返し経路のBER特性(図6緑：実線)は4.1の実験時よりも改善されている。また、地上局で使用される装置の特性から求められるトランスレータ経路のBER特性の予測結果(図6緑：破線)と比較して、十分に近い特性が得られており、想定どおりの実験系

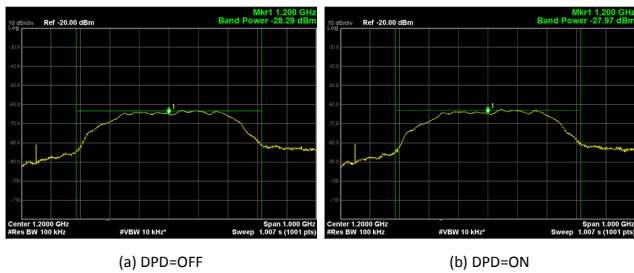


図7 伝送速度 1.8 Gbps におけるデジタルプリディストーション適用時のスペクトラム

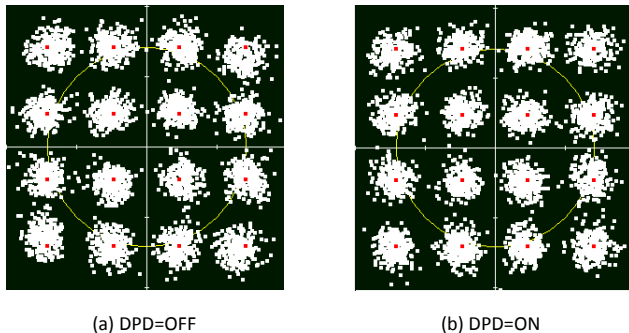


図8 伝送速度 1.8 Gbps におけるデジタルプリディストーション適用時のコンステレーション

が構築できていることがわかる。衛星折返し経路で取得した DPD 適用前の結果(図6 青：破線)と DPD 適用後の結果(図6 青：実線)を比較すると、増幅器の非線形性によって生じていたエラーフロアが DPD の適用によっておおむね解消されていることが確認できる。また、地上の HPA 出力電力が 48.0 dBm のときの DPD 適用前後の受信スペクトラム及び受信コンステレーションを図7、8に示す。受信スペクトラムからは DPD による有意な変化は見られない。これは DPD によって低減されているリグロス成分が熱雑音に埋もれてしまっているためである。一方、受信コンステレーションからは、通信路上の電力圧縮及び位相回転の影響が DPD によって解消されている様子が確認できる。衛星折返し経路において取得した DPD 適用後の結果(図6 青：実線)とトランスレータ折返し結果(図6 緑：実線)を比較すると、衛星システムが要求する誤り訂正復号前の BER 規定 5×10^{-4} における所要 Eb/No の差は約 0.4 dB と小さく、DPD の適用によって、衛星通信路における伝送ロスを十分に小さくすることができる結果が得られた。

5 まとめ

本実験では、衛星通信路上に存在する電力増幅器の非線形歪みによって生じる伝送特性の劣化を、衛星搭載を前提とした DPD 技術によって改善することを目的に実験を行った。実験の結果、1つの LUT を用い

た DPD によって、衛星通信路に存在する非線形性を効果的に補償し、伝送特性が改善できることを実験的に確認できた。また送信機の出力変動や増幅器の経年変動による伝送特性の劣化を考慮しておくことで、LUT の更新頻度を抑えることができることに加え、受信コンステレーションが最適な配置となるように LUT を修正するだけで容易に更新が行えることから、実用上非常に有効な手法であることを明らかにした。

謝辞

本実験にあたっては JAXA の関係部署及び NICT に多くのご支援を頂いた。とりわけ NICT のワイヤレスネットワーク総合研究センター 宇宙通信研究室の高橋 卓鹿鳥宇宙技術センター長、菅 智茂研究員、浅井敏男氏には親身になってご支援頂いた。この場を借りて御礼申し上げる。

【参考文献】

- 1 Y. Tashima, K. Inaoka, M. Yajima, N. Ando, S. Tani, and A. Fujimura, "Performance Evaluation of a Ka-band Satellite Communication Subsystem Using Pre-distortion Techniques," AIAA International Communications Satellite Systems Conference 2015, Sept. 2015.
- 2 M. Yajima, M. Nakadai, Y. Tashima, N. Ando, S. Tani, and A. Fujimura, "Performance Evaluation of Ka-band Satellite Communication Subsystem Using a Digital Pre-Distorter," 7th ESA International Workshop on Tracking, Telemetry and Command Systems for Space Applications, Sept. 2016.
- 3 橋本幸雄, 高橋 卓, 吉村直子, "実験地球局(超高速小型地球局、大型地球局)," 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, pp.61-65, 2007.
- 4 <http://www.zodiacaerospace.com/en/products-services/aerosystems/data-systems/space-applications/earth-observation-remote-sensing/cortex-hdr-xxl-high-data-rate-receiver>, June. 26, 2017.

中台光洋 (なかだい みつひろ)

宇宙航空研究開発機構
研究開発部門 第一研究ユニット
研究開発員
衛星通信、広帯域通信

谷島正信 (やじま まさのぶ)

宇宙航空研究開発機構
研究開発部門 第一研究ユニット
研究領域主幹
衛星通信、アレーアンテナ