

2-2 ETS-9 の通信システムの概要

2-2 Overview of the ETS-9 Communications System

三浦 周 辻 宏之

MIURA Amane and TSUJI Hiroyuki

本稿では、技術試験衛星 9 号機 (ETS-9) の通信システムの概要を紹介する。ETS-9 は、国際競争力の強化を目的に、次世代ハイスループット衛星 (HTS) 技術の実証を通じて、通信容量の拡張、通信リソースの柔軟な割当て、通信システムの統合的な運用制御を目指している。これに向けて、Ka 帯固定・可変ビーム、光フィーダリンク、Ka 帯フルデジタル通信ペイロード、共通部通信サブシステム及び地上セグメントの開発を進めている。これらの技術は Beyond 5G / 6G 時代のマルチオービット・地上統合型ネットワークの中核を担うことが期待されており、ETS-9 による実証を通じて次世代 HTS 技術の確立とユースケースの検証を目指している。

This paper introduces the overview of the communications system of Engineering Test Satellite-9 (ETS-9). Aimed at enhancing international competitiveness, ETS-9 seeks to demonstrate next-generation High Throughput Satellite (HTS) technologies, including increased communications capacity, flexible resource allocation, and integrated system control. To achieve these goals, the development of key components such as Ka-band fixed and variable beams, optical feeder links, Ka-band full digital communications payloads, common communications subsystems, and ground segments has been developed. These technologies are expected to play an important role in future multi-orbit and terrestrial-non-terrestrial integrated networks in the Beyond 5G / 6G era. ETS-9 will serve as an orbital testbed to validate these technologies and explore practical use cases for next-generation satellite communications.

1 まえがき

近年、スマートフォンなどの普及により、航空機や船舶、離島、災害地など、地上の通信ネットワークが利用できない場所でもブロードバンド通信への需要が高まっている。さらに、身の周りのあらゆるモノがインターネットにつながる IoT (Internet of Things: モノのインターネット) といった新しいユースケースが本格的に普及し始めている。こうしたニーズに応えるため、衛星通信の需要がますます高まっており、諸外国では研究開発やサービスの導入が進められている。例えば、静止衛星をマルチビーム化したハイスループット衛星 (High Throughput Satellite: HTS) と呼ばれる衛星 [1] や、低軌道 (Low Earth Orbit: LEO) の小型衛星群による“メガコンステレーション”を利用したブロードバンド通信サービス [2] により、衛星通信の大容量化と低コスト化が進んでいる。さらに、通信に不可欠な電波の周波数資源が逼迫^{ひっぱく}していることから、従来よりも周波数利用効率の高いシステムや、電波に

依存しない大容量通信の実現が求められている。このような背景から、通信・放送衛星分野での国際競争力の強化と最先端技術の獲得・保有を目指し、技術試験衛星 9 号機 (ETS-9) の計画が 2016 年から開始された [3]。次世代衛星バス技術、次世代衛星通信技術を開発・実証するにあたり、総務省及び NICT、関係機関は「次世代衛星通信技術」を担当し、技術目標として Ka 帯 (Ka 帯は 20-30 GHz) マルチビーム給電部、光フィーダリンクによる大容量化、Ka 帯広帯域デジタルチャネライザ・デジタルビームフォーマ (DBF) によるフレキシブル化、通信システムの統合的な運用制御による高効率化の目標を掲げて研究開発を進めている。さらに、2025 年度以降に ETS-9 の打上げを目指し、実証実験を通じて世界市場で競争力のある世界最先端の通信ミッション技術の獲得とユースケースの検証を目指している。本稿では、次世代 HTS に向けた ETS-9 の通信システムの概要を報告する。**2** では、開発の背景として HTS とその技術課題、次世代 HTS の姿と実現技術、ETS-9 計画での通信システム開発の位置づけ

について説明する。3 では、ETS-9 通信システムを構成する通信ミッションと地上セグメントの概要を紹介する。4 で本稿をまとめる。

2 開発の背景

近年、世界的に、HTS と呼ばれる静止軌道上のマルチビーム大容量通信衛星や Low Earth Orbit : LEO 衛星群によるメガコンステレーション、高高度プラットフォーム (High Altitude Platform Station : HAPS) 等、多様なプラットフォームが登場している。これにより従来の地上系通信から、衛星通信を含む非地上系ネットワーク (Non Terrestrial Networks : NTN) へと、通信ネットワークが三次元的に拡張されることが期待されている。

典型的な HTS は、ビット単価の低減を目的として大容量化を図るため、Ka 帯等の高周波数帯を用いた広帯域の確保、100 ビーム級のマルチビーム化と周波数再利用による周波数利用効率の向上、多数のゲートウェイ局によるフィードリンクの大容量化、といった特徴を持っている [1]。図 1 に、近年打ち上げられた、または計画されている HTS の通信容量の動向を示す。2004 年頃から Gbps 級の静止衛星 (Geostationary Orbit Satellite : GEO 衛星) の HTS の打ち上げが開始され、近年では数百 Gbps の通信容量にまで向上している。また、2023 年以降に Tbps 級の衛星の打ち上げを計画するオペレータも現れており、これらは Very High Throughput Satellite (VHTS) と呼ばれる。このように、HTS の導入により、衛星通信の通信容量が飛躍的に増大していることがわかる。

図 2 に HTS の代表的なユースケースを示す。航空機や船舶などの移動体向けのブロードバンド通信では、機内の乗客・乗員向けのブロードバンド通信サービスや、海洋資源調査のための大容量データ伝送等、高速

通信の利用が進んでいる。さらに、運行管理情報 (オートパイロットや機体のヘルスチェック) の伝送、自動管制や自律航行のための制御情報の伝送などの利用も想定されている。陸上通信では、災害時の臨時回線や通信事業者のバックホール回線としての利用、農業・インフラ監視等のセンサ情報収集 Machine to Machine (M2M) / IoT の利用、消費者向けブロードバンド、地方や遠隔地での医療、教育への活用等、多様な用途が考えられる。

従来の HTS は主に Ka 帯を利用しているが、より高周波の Q 帯や V 帯 (Q 帯は 33-50 GHz、V 帯は 40-75 GHz) を含む軌道・周波数の申請が国際電気通信連合 (International Telecommunication Union : ITU) に多数提出されており、将来的な電波資源の枯渇を見据えた大容量化が課題となっている。この課題に対して、次世代 HTS では、電波に比べて本質的に飛躍的な大容量化が可能な光通信技術の適用が鍵となる。特に大容量化が必要なフィードリンクに光通信を利用することが期待されている。

また、従来の HTS では、マルチビームの各ビームへの通信容量の割当てが固定的であることから、運用期間中に変化する通信要求の要求帯域や利用地域等に柔軟に対応できず、通信容量の不足や無駄が生じるという課題がある。これに対し、次世代 HTS では、通信資源を効率的に利用するための衛星中継器のフレキシブル化・デジタル化が鍵となる。具体的には、デジタルチャネライザ、デジタルビームフォーマ (DBF)、ビームホッピング等の技術が導入される。この衛星中継器のフレキシブル化・デジタル化により、衛星打ち上げ後の通信需要の変化に合わせて通信帯域やビームサイズやカバレッジを柔軟に変更可能となる。また、このようなデジタル化によって、時間・空間・周波数軸での通信資源の柔軟な割当て変更を実現する衛星通信システムが実現されつつある。このようなシステムは Software Defined Satellite (SDS) と呼ばれ、世界的に開発が進められている。

また、GEO だけでなく、LEO や中軌道 (MEO) 衛星においても、多数の衛星によるコンステレーションが

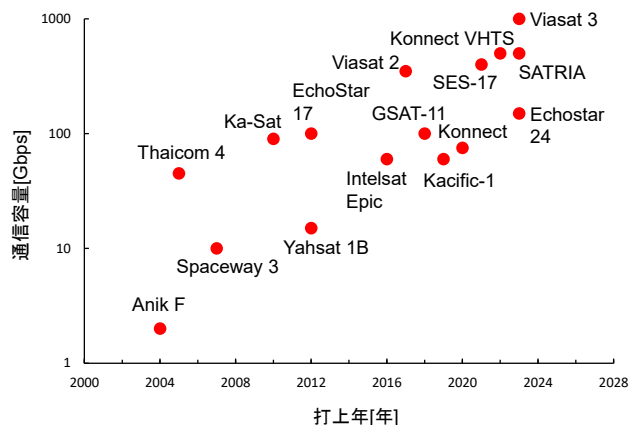


図 1 HTS の動向 [1]



図 2 HTS の典型的なユースケース [1]

構築され、サービスの提供が進んでいる。加えて、1 U (ユニット)が一辺 10 cm の立方体で複数のユニットを組み合わせることでサイズを拡張可能な、非常に小型の衛星である CubeSat も、低コストかつ迅速に開発・打ち上げ可能なため、研究機関や大学、企業等で広く利用されている。さらに高度約 20 km に定対空する HAPS (高高度プラットフォーム) の開発も進み、サービス提供が間近に迫っている。地上網との接続に関しても、HTS や、LEO 衛星群によるメガコンステレーション計画の登場により、高速・大容量化が低コストで実現することとなり、端末の小型低消費電力化も進み、地上系システムとの親和性が高まっている。これらの背景を受けて、衛星通信と第 5 世代移動通信 (5G) / Beyond 5G との連携が進められている。一方、移動通信の技術仕様を策定する第 3 世代パートナーシッププロジェクト (3GPP) では、衛星通信を含む NTN の標準化が進められており、2022 年 3 月に制定された Release17 において仕様化された [4]。現在は Release20 での 6G の標準化に向けて性能要求の検討が進んでいる。国内においても、2020 年 6 月の総務省の Beyond 5G 推進戦略懇談会において「拡張性」で衛星や HAPS とのシームレスな接続が取り上げられた [5]。また、スペース ICT 推進フォーラム [6] では、衛星と 5G / Beyond 5G の接続や NTN の議論が進められている。今後、通信サービスのカバレッジ拡大と柔軟な運用を実現するためには、NTN を複数の軌道で連携させるマルチオービットシステムへと進化させ、さらに地上系通信と統合することが不可欠と考えられる。GEO 衛星は、安定した大容量通信を提供できるという特性を活かし、LEO や HAPS のマルチオービット通信ハブとしての重要な役割を果たしていくと考えられる。

我が国では、2016 年 4 月に閣議決定された宇宙基本計画において、ETS-9 の検討と打上が明記された [7]。また、次期技術試験衛星に関する検討会 (2014 年 11 月～2015 年 4 月、2016 年 1 月～2016 年 5 月) で技術的な検討が行われ [8]、次世代の衛星バス技術と衛星通信技術の開発が進められることとなった。現在、2025 年度以降の打上を目指して [9]、文部科学省 (文科省) / 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構 (JAXA) が衛星バス及びフルデジタル通信ペイロード [10][11]、総務省 / NICT が通信ミッションの開発として固定ビーム系、可変ビーム系、光ファイダリンク系及び共通部通信ミッションの開発を推進している。

ETS-9 の通信ミッションにおいては、国際競争力強化の観点から、世界市場において競争力を有する世界最先端の通信技術の獲得が求められている。現在、衛星通信分野では、HTS による通信容量の拡大とビット単価低減が進展しており、これらの状況や前述の技術

課題を踏まえ、ETS-9 の通信ミッションでの実証技術の目標を、Ka 帯と光通信による衛星通信の大容量化、デジタルチャネライザ / DBF 技術による衛星通信のフレキシブル化、通信システムの統合的な運用制御の実現とすることが結論づけられた。これらの目標を達成するため、図 3 に示すように、ETS-9 による実証では、Ka 帯を利用した伝送速度 100 Mbps での大容量移動体通信の実証、ビーム可変 / 周波数可変によるトラフィック変動に対応するフレキシブルな中継技術の実証、レーザー光を用いた伝送速度 10 Gbps の光ファイダリンク回線の実証、Beyond 5G / 6G との連携技術の実証を目指して、通信サブシステム及び地上セグメントの開発を推進することとした。

近年、Beyond 5G / 6G 時代において、無線通信の利用領域が海から地上、空、宇宙へと拡大しているなか、通信サービスを提供においては、HAPS や低軌道衛星、静止衛星など、複数の軌道によるマルチオービット化が不可欠となっている。図 4 に示すように、ETS-9 で実証されるフルデジタル・SDS 技術は、マルチオー

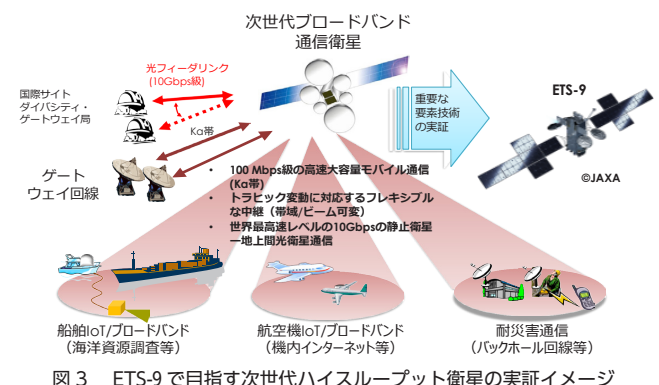


図 3 ETS-9 で目指す次世代ハイスループット衛星の実証イメージ

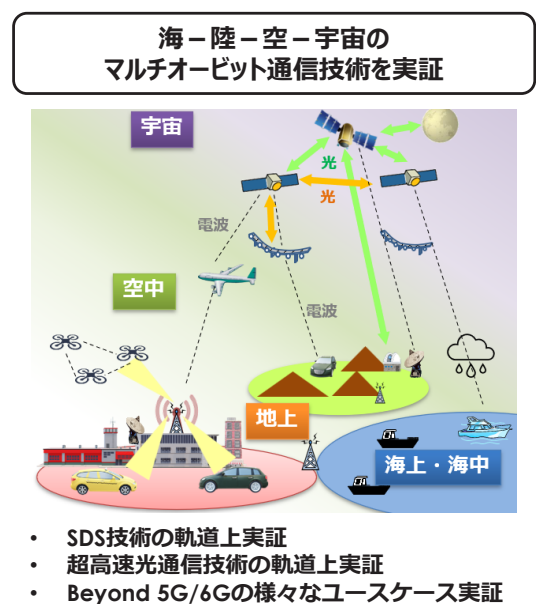


図 4 ETS-9 で目指すマルチオービット通信の実証イメージ

2 技術試験衛星 9 号機通信システム

ビット環境における柔軟な回線割り当てを可能にするコア技術であり、超高速光通信技術は、通信容量拡張に不可欠な技術であり、これらの技術の実証が ETS-9 の重要な目的の一つとなっている。さらに、NICT は ETS-9 を軌道上テストベッドとして活用し、軌道上での Beyond 5G / 6G の様々なユースケースの実証と新たなアプリケーションの創出を目指している。

上記の ETS-9 の通信システム技術の重要性は、2024 年度に改訂された内閣府の宇宙技術戦略 [12] においても示されており、衛星間や衛星と地上間における光通信ネットワークシステム、大容量かつ柔軟な通信を提供するためのペイロードの高度化、衛星の機能高度化と柔軟性を支える SDS 基盤技術が、重要項目として取り上げられている。

3 ETS-9 通信システムの全体構成

ETS-9 の通信システムは、衛星に搭載される通信ミッションと地上セグメントにより構成されている。通信ミッションにおいては、スケーラビリティを考慮したコア技術の実証に焦点を絞り、各省庁及び機関がそれぞれの役割に基づき技術開発を推進している。具体的には、総務省が固定ビーム通信サブシステムとして、広帯域チャネライザ・マルチビーム給電部技術を開発している。また、可変ビーム通信サブシステムとしては、広帯域 DBF 技術を開発する。一方、NICT は、光フィーダリンク通信サブシステムとして光衛星通信技術及びビーコン送信等を目的とした共通部通信サブシステムの開発を担当している。文部科学省/JAXA は、NICT との連携協力の下、フルデジタル通信ペイロードの開発を推進している。地上セグメントに関しても、各通信ミッションの目標を達成するとともに通信システムの統合的な運用制御を実証するため、各種地球局及び管制局等の開発が進められている。図 5 に通信ミッションの概要を示すとともに、以降では通信システムを構成する通信ミッション及び地上セグメントの概要を説明する。

3.1 固定ビーム・可変ビーム通信サブシステム

固定ビーム通信サブシステムは、Ka 帯で動作するデジタルチャネライザ・マルチビーム給電部及びフィーダリンクの実証を目標としている。そのため、250 MHz 以上/ポートかつ各ポートの帯域幅が可変可能、ポート数が将来システムに合わせて可変可能な広帯域なデジタルチャネライザ技術、周波数繰返し利用の実証を行う 5 ビーム(フィーダリンク 2 ビーム)かつ小型高密度実装を可能とするマルチビーム給電部技術、伝送速度最大 100 Mbps の実現を目標とする。

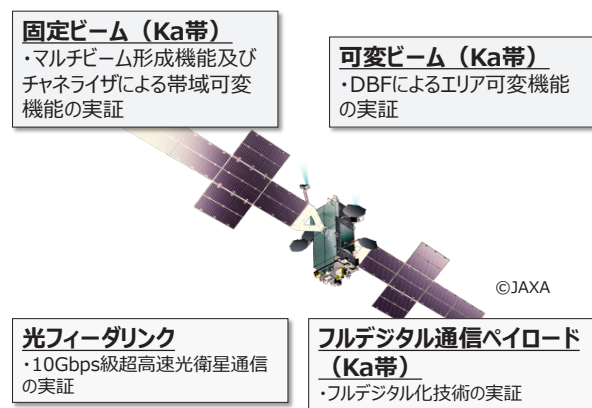


図 5 ETS-9 通信ミッションの概要 [1]

デジタルチャネライザは、広帯域化に伴う発熱量の増加に対応するため、低消費電力化アルゴリズムの開発及び筐体内の高速データ伝送のための高効率排熱技術の開発を行う。一方、マルチビーム給電部については、高密度なビーム配列を実現するため、小型一体化のための回路構造の一体化を行っている。

可変ビーム通信サブシステムは、Ka 帯で動作する DBF 技術の実証を目標としている。この技術では、100 MHz 以上/ポートかつ各ビームの形状が可変可能で同時形成ビーム数が 2、伝送速度最大 100 Mbps の可変ビーム技術を目標としている。可変ビーム通信サブシステムでは、その開発に向け全体構成の検討と総合評価を行うとともに、DBF プロセッサ部の開発、アンテナ・RF 部の開発が進められている。

3.2 光フィーダリンク通信サブシステム

周波数逼迫の課題を解決する手段として、レーザー光を使った最大 10 Gbps の世界最高レベルの通信容量を、静止軌道—地上局間にて実証する光衛星通信技術の確立を目標としている。ETS-9 に搭載される光通信システムを HICALI (High Speed Communication with Advanced Laser Instrument) と呼んでいる。HICALI では、地上の光通信ネットワーク用に開発された高速のデバイスを宇宙空間で運用するため、NICT の高度通信・放送研究開発委託研究を通じ、宇宙環境における環境耐性や信頼性を確保するためのスクリーニングプロセスの確立を目指している。HICALI を用いた静止軌道—地上間の光通信実験では、軌道上における光通信デバイスの動作確認、伝送速度 10 Gbps の高速光通信機能の確認、レーザー光の伝搬データの取得、気象条件に応じたサイトダイバシティ(複数の地上局を地理的に分散配置することで、気象条件等による通信品質の劣化に対し通信品質の良い地上局を選択することで通信を維持する技術)実験、補償光学を含む光地上局における新技術の検証を計画している。

3.3 共通部通信サブシステム

Ka 帯通信及び光通信の実証実験に必要な機能として、地球局における捕捉追尾や Ka 帯伝搬データ取得のためのビーコン信号の送信、レーザー光の伝搬データ等の蓄積データの地上への送信の実現を目標としている。

3.4 フルデジタル通信パイロード

通信衛星の市場動向として、フルデジタル化及び大容量化が急速に進展する中、国際的な競争力を確保するため、ETS-9 の成果を用いて衛星システムメーカーによる商用展開を視野に入れた次世代静止通信衛星の開発が進められている。この次世代静止衛星は、200 Gbps の通信容量を有し、デジタル化によるビーム照射地域や通信容量(周波数帯域幅)等の柔軟な機能変更が可能となる。その実現に向け、複数のアナログ機器で処理していた機能をデジタル化された機器で効率的に処理する技術を実証するフルデジタル通信パイロード (FDP) の開発を令和 3 年度から進めている [10][11]。

3.5 地上セグメント

通信ミッションと対向する地上セグメントは、Ka 帯地球局、光地上局及び管制機能等で構成されている。管制機能には、通信リソースの運用計画を作成するネットワーク管制機能と、この計画に基づいて通信ミッションを監視・制御する衛星管制機能が含まれる。特に本システムにおいて重要な点は、通信ミッションの持つ通信リソースの可変機能を有効に制御し、通信トラヒックを効率良く収容するネットワーク統合制御技術を、管制機能を通じて実証することである。前述のとおり、次世代 HTS では通信エリアや周波数、フィードリンクの選択が可変となる。しかしながら、トラヒック要求や回線条件は時々刻々と変化するため、通信リソースを適切に割り当てなければ、呼損や通信リソースの余剰が発生する。また、現在の衛星通信は地上系ネットワークと比較して性能差があるため、5G 等の地上網と接続する際には QoS (通信ネットワークのサービス品質) を維持する上で課題が生じる。例えば帯域制限による輻輳^{ふくそう}が生じやすいといった問題が挙げられる。このような課題を解決するため、衛星の通信リソース配分を最適化するための制御技術を確認する研究を行っている [13]。この制御技術の研究では、衛星地上接続(衛星 5G 接続)によって QoS の課題を克服し、予測に基づく運用計画により時間軸上で適切な通信リソース割当を行う。また、衛星通信機器のリソース制御を適切に行うことにより周波数利用効率の改善を図る。この制御技術の実証を通じて ETS-9 の各通信ミッションの目標を達成する地上セグメントとし

て、Ka 帯の各種地球局、光地上局、Ka 帯／光の回線条件を把握するために、Ka 帯の回線において伝搬損失の増加をもたらす降雨量や光回線において大きな伝搬損失をもたらす雲量といった気象データ等を収集するデータ収集システム、ネットワーク管制局 (Network Operation Center : NOC)、衛星管制局 (Satellite Operation Center : SOC) 等の開発を進めている。

4 まとめ

本章では、次世代 HTS の通信ミッションの技術課題と、課題解決のための ETS-9 を用いた通信システムの概要について報告した。今後は、ETS-9 による通信ミッションの開発技術であるフルデジタル技術・光通信技術・運用制御技術等の実証や、ETS-9 を軌道上テストベッドとして活用し、軌道上での様々な Beyond 5G / 6G のユースケースの実証と新たなアプリケーションの創出を目指している。

謝辞

本研究の一部は総務省「電波資源拡大のための研究開発 (JPJ000254)」の「ニーズに合わせて通信容量や利用地域を柔軟に変更可能なハイスループット衛星通信システム技術の研究開発」及び「多様なユースケースに対応するための Ka 帯衛星の制御に関する研究開発」で実施している。関係各位に深謝する。

【参考文献】

- 三浦 周, 大川 真, “ハイスループット衛星 (HTS),” 電子情報通信学会誌, vol.106, no.7, p.611, July 2023.
- <https://www.starlink.com/jp>
- 三浦 周, 久保岡 俊宏, 坂井 英一, “技術試験衛星 9 号機による次世代ハイスループット衛星の通信技術確立に向けた取組,” 電子情報通信学会誌, vol.102, no.12, pp.1080-1084, Dec. 2019.
- 3GPP TR22.822 V16.0.0 (2018-06), “Study on using satellite access in 5G,” June 2018.
- “Beyond 5G 推進戦略 (概要),” 総務省, 2020.
- “スペース ICT 推進フォーラム,” <https://spif.nict.go.jp/index.html>
- “宇宙基本計画 (平成 28 年 4 月 1 日 閣議決定),” 内閣府宇宙開発戦略本部, 2016.
- “次期技術試験衛星に関する検討会報告書,” 次期技術試験衛星に関する検討会, 2016.
- “宇宙基本計画工程表,” (令和 6 年 12 月 24 日宇宙開発戦略本部決定), 2024.
- “技術試験衛星 9 号機,” <https://www.satnavi.jaxa.jp/ja/project/ets-9/>
- 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構, “技術試験衛星 9 号機 (ETS-9) の開発状況について,” 科学技術・学術審議会研究計画・評価分科会宇宙開発利用部会 (第 61 回) 2021.
- “宇宙技術戦略,” (令和 6 年度改訂, 2025 年 3 月 25 日, 内閣府宇宙開発戦略推進事務局), 2025.
- 三浦 周, 辻 宏之, 吉村 直子, 森川 栄久, 久保岡 俊宏, 高橋 卓, 豊嶋 守生, 山本 周, 中尾 彰宏, 川本 雄一, 加藤 寧, 木村 紋子, 高山 泰一, 百束 泰俊, 内田 繁, 草野 正明, 須永 輝巳, 堀江 延佳, “多様なユースケースに対応するための Ka 帯衛星の制御に関する研究開発—研究開発全体の課題と計画—,” 電子情報通信学会 2020 年ソサイエティ大会, B-3-1, Sept. 2020.



三浦 周 (みうら あまね)

ネットワーク研究所
ワイヤレスネットワーク研究センター
宇宙通信システム研究室
室長

博士 (情報科学)
衛星通信システム、アンテナ

【受賞歴】

2017 年 日本 ITU 協会賞 奨励賞受賞

2016 年 電子情報通信学会通信ソサイエティ
活動功労賞

2016 年 電子情報通信学会通信ソサイエティ
優秀論文賞



辻 宏之 (つじ ひろゆき)

ネットワーク研究所
ワイヤレスネットワーク研究センター
宇宙通信システム研究室
上席研究員

博士 (工学)
宇宙通信システム、アレイアンテナ、信号処理

【受賞歴】

2014 年 日本 ITU 協会 国際活動奨励賞 功績
賞対象分野

2013 年 第 2 回アンテナ伝搬アジア太平洋会
議 (APCAP2013) ベストペーパー賞

2010 年 第 58 回電気科学技術奨励賞