

3-4-2 光フィーダリンクペイロードの開発

3-4-2 Development of the Optical Feeder Link Payload

宗正康 小竹秀明 白玉公一 Kolev Dimitar 久保岡俊宏

MUNEMASA Yasushi, KOTAKE Hideaki, SHIRATAMA Koichi, KOLEV Dimitar, and KUBO-OKA Toshihiro

NICT 宇宙通信システム研究室では、衛星 – 地上間双方向大容量データ伝送のニーズに応えるための光通信による衛星–地上間フィーダリンク通信システム技術の開発を実施してきた。本稿では、ETS-9 搭載光フィーダリンク通信サブシステム (HICALI 宇宙セグメント) の各コンポーネント概要及び開発経過について述べる。

The NICT Space Communication Systems Laboratory has been developing bidirectional satellite-to-ground feeder link communication system technology for meet the needs of large-capacity data-transmission by laser communication. In this paper, the outline of each component of the ETS-9 optical feeder link communication subsystem (HICALI Space Segment) and its development status are described.

1 まえがき

NICT では、衛星–地上間の通信において、光帯域 (レーザ光) による通信システムの研究開発及び実証実験を長年行っており、ETS-9 通信ミッションでは、利用可能な電波帯域が逼迫しつつある中、Beyond5G (6G) 時代の本格的な普及が予想される NTN (Non-Terrestrial Network、非地上系ネットワーク) における中核となるハブ衛星に必要な通信システム技術の実証を目指すべく、光通信による衛星–地上間双方向大容量データ伝送のニーズに応えるための通信衛星–地上間フィーダリンク通信システム技術の実証実験が計画されており、宇宙通信システム研究室では HICALI (High Speed Communication with Advanced Laser Instrument、超高速先進光通信機器) プロジェクトとして、実施してきた。

本稿では、HICALI プロジェクトのうち、前報告に引き続き、ETS-9 搭載光フィーダリンク通信サブシステム (HICALI 宇宙セグメント、以下、HICALI) の各コンポーネントの概要及び開発経過について述べる。

2 各コンポーネントの概要

2.1 光学部 (OHA : Optical Head Assembly)

OHA の基本的な機能は、光地上局から射出されるビーコン光を受信することで、捕捉追尾を行うとともに通信光ビームを精密に指向し、送受信光を光ファイ

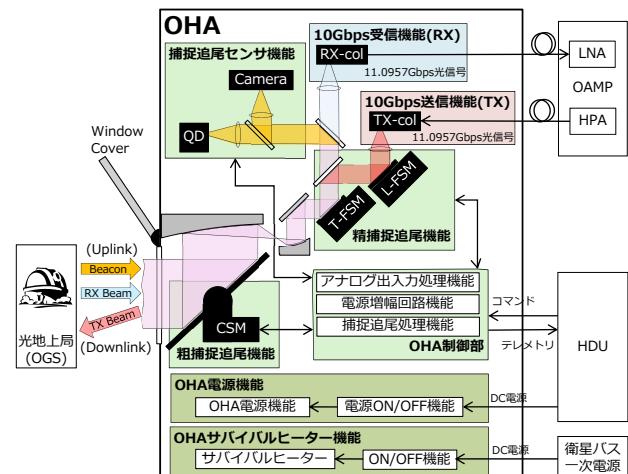


図 1 OHA (光学部) 機能ブロック図

バと結合させる機能である。図 1 は、OHA の機能ブロック図を示している。大まかな機能としては、粗／精捕捉追尾、光ビームの入射方向を検知するセンサに関する機能及びこれらを制御する機能、内部に電源を供給する機能、温度を維持する機能がある。

外観を図 2 に示す。衛星構体外の地球指向面に取り付けられ、衛星内部にある OAMP とは光ファイバを介して接続される。また、衛星バス構体から伝わる振動及び衛星打上げ時振動の影響を軽減するため、サスペンション構造を備えた 4 本の脚で衛星構体に取り付けられている。形状は、およそ 560 mm (縦) × 410 mm (横) × 340 mm (高さ) の箱状で、直径 150 mm の円形



図 2 OHA (光学部) 外観

の光学ウィンドウを通して通信光の送受信を行う。内部には、粗／精捕捉追尾を行う 3 つのステアリングミラー（角度を変えることにより反射方向軸が変化する反射鏡）である、粗捕捉追尾鏡 (CSM : Coarse Steering Mirror)、精捕捉追尾鏡 (T-FSM : Tracking Fine Steering Mirror)、光行差補正鏡 (L-FSM : Lead-ahead Tracking Fine Steering Mirror) が Tracking Fine Steering Mirror (FPM : Fine Pointing Mechanism) が格納されている。また、光ファイバから放射された送信光信号を平行ビームに変換して出力する送信コリメータ (Tx col: Transmission collimator)、受信ビームを光ファイバに結合する受信コリメータ (Rx col : Reception collimator)、そして送受信ビームを拡大／縮小することにより、送信光放射強度と受信電力利得を高める光アンテナ(望遠鏡部)で構成されている。さらに、光学ウィンドウは、ビーコン光及び通信波長以外の太陽光などを反射する機能を有しており、打上げ後のロケットフェアリング分離後から静止軌道投入までの間、光学ウィンドウ及び内部センサの劣化を防ぐため、ウィンドカバーで閉じる構造として、静止軌道到達後に火工品を用いないロック解除機構を地上からのコマンドを用いて、ウィンドカバーを開放する仕組みとした。

CSM は、レーザの方向を約 ± 10 deg. 変化させることができ、赤道上空約 36,000 km の静止衛星軌道から見た地球の半球面を全てカバーできるだけでなく、角度範囲的には低軌道衛星との光通信もできる。T-FSM は精捕捉追尾機能を備えており、CSM と連携して、通信相手の光地上局を指向して、光地上局から送信され

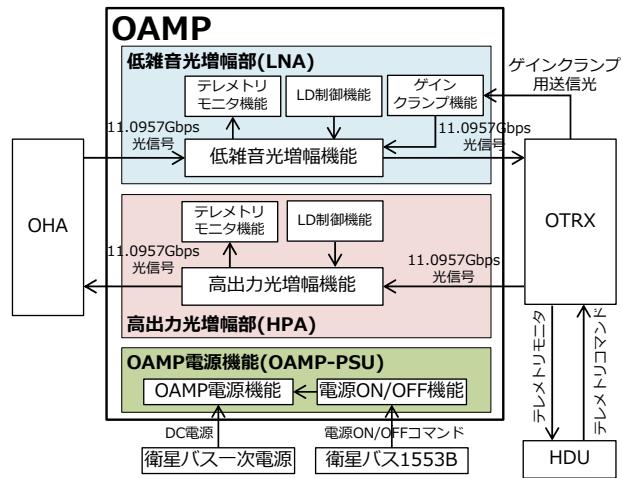


図 3 OAMP (光増幅部) 機能ブロック図



図 4 OAMP (光増幅部) 外観 (左: 本体、右: PSU (電源ユニット))

たビーコン光の光軸方向を検出するカメラ及び 4 分割受光器 (QD : Quadrant Detector) による入射方向の情報により、閉ループ制御を行い、衛星バス構体からの振動擾乱の影響が無視できる場合、1 μ rad (約 0.0000057 度) 以下という角度の精度での送受信方向を調節することが可能である。また、L-FSM は、送信光の光行差 (衛星と光地上局が宇宙空間内でそれぞれ移動しているため生じるずれ) を補正する機能を有しており、光地上局からのアップリンクのビーコン光を受けて、ダウンリンクの通信光レーザをこの L-FSM にてわざかに光軸をずらし送信することにより、光地上局との間での光通信リンクを確立させる方式としている。

2.2 光増幅部 (OAMP : Optical AMPlifier)

OAMP の主な機能は、送受信光信号の増幅を行うコンポーネントであり、OHA と後述する OTRX と送受信光の光ファイバによるインターフェースを持ち、さらに OTRX と光通信データ処理装置 (HDU) とコマンド及びテレメトリーのインターフェースを持つ機器である。図 3 は、OAMP の機能ブロック図を示している。図 4 は外観図であり、光増幅部 (左図、HPA/LNA : High Power Amplifier / Low Noise Amplifier) と電源部 (右図、OAMP-PSU:OAMP-Power Supply Unit) の

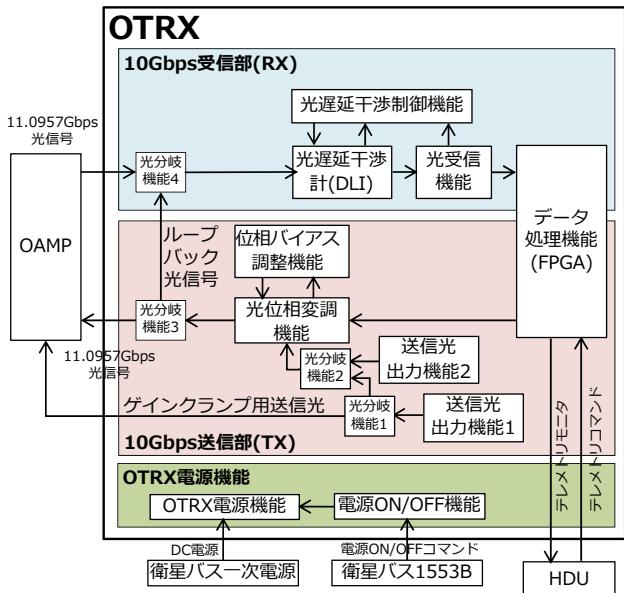


図5 OTRX(光送受信部)機能ブロック図

2つの筐体で構成される。機能としては、受信した微弱な光信号を増幅させる低雑音増幅部(LNA)、送信する光信号を光地上局に届く程度までに増幅する高出力光増幅部(HPA)及びLNAとHPAに電源を供給する機能に分かれ、光増幅方式としては、利得、効率及び雑音特性などが良好な希土類元素ドープファイバを増幅媒質とした光ファイバ増幅方式を採用しており、励起レーザダイオード(LD)を制御する回路、光信号、LDの動作、温度等のテレメトリモニタリング機能も具備しており、HDUを経て軌道上の動作状態を地上に送信することができる。

本プロジェクトでは、送信側は、2.5 W以上という高光出力を実現させるため、高出力特性が期待できる、Er(エルビウム)、Yb(イットリビウム)共添加ファイバアンプ増幅器(EYDFA: Erbium Ytterbium Co-Doped Fiber Amplifier)とし、逆に、受信器側は、低雑音増幅を期待するため、Er添加ファイバアンプ(EYDA: Erbium Doped Fiber Amplifier)を採用した。

また、OHAからの受信通信光が急激にLNAに入力された際に、光サージが発生し、OTRXに内蔵されているバランスド光レシーバに影響を及ぼす可能性があるため、対策として、OTRXの送信光の一部を分岐しLNAへ入力するゲインクランプ機能も有している。

2.3 光送受信部(OTRX: Optical Transceiver / Receiver)

OTRXの主な機能は、受信した光信号を電気信号に変換し、復号化を行う受信機能、送信するデータを符号化し光信号に変換する機能を有するコンポーネントである。また、OTRXはOAMPと送受信光の光ファ



図6 OTRX(光送受信部)外観

イバによるインターフェースを持ち、さらにOAMPとHDUとコマンド及びテレメトリのインターフェース、OHAとLNA受信レベルのインターフェースを持つ機器である。図5は、OTRXの機能ブロック図を示している。図6は外観図であり、信号処理を行うFPGA(Field-Programmable Gate Array)によって構成されるデータ処理機能、10 Gbpsの光送信処理、光受信処理を行う機能、内部で使用する二次電源電圧を生成する電源機能から構成されている。また、本プロジェクトでは、10 Gbps級の通信速度を実現するため、地上系光ファイバ通信用光デバイス及び高速エレクトロニクスデバイスをCOTS(Commercial Off-The-Shelf)品として活用することとした。さらに、地球大気を伝搬した通信レーザ光は、大気揺らぎに伴う強いフェージングの影響が想定されるため、幅広い受信ダイナミックレンジを確保する必要がある。そこで、通信方式としては、従来の強度変調-直接検波(IM/DD: Intensity Modulation/Direct Decision)方式よりも高感度化が期待できる差動位相偏移変調(DPSK: Differential Phase Shift Keying)方式の適用、光海底ケーブル伝送システムに用いられているA-FEC(Advanced Forward Error Correction, ITU-T G.975.1 I3)の誤り訂正機能の適用による高感度化と搭載オンボード計算機の計算負荷低減を図っている。[5]

送信部には、ダウンリンク通信用波長(送信光出力機能1、波長:1541.349 nm)と、軌道上の自己検証用である送受信ループバック用波長(送信光出力機能2、波

3 ETS-9 の衛星搭載通信システム

長:1558.173 nm) の 2 波長の分布帰還型半導体レーザ (DFB-LD : Distributed Feed Back Laser Diode) が実装され、自動温度制御と自動電流制御により、送信光の出力強度及び波長の安定化を図っている。光分岐機能 1 では、一部の光を前述の OAMP-LNA への送信し、ゲインクランプ機能を実現している。光位相変調機能では、光分岐機能 2 で合波された光を MZ 変調器データ処理機能から出力された 11.0957 GHz NRZ (Non-Return Zero) 電気信号を 11.0957 GHz NRZ-DPSK (Differential Phase Sift Krying、差動位相偏移変調) 光信号を生成し、位相バイアス調整機能では、光変調器にかけるバイアス電圧のドリフトを防止している。OAMP に出力された送信光は、HPA で増幅され、OHA から光地上局へと放射される。

受信部には、入力光信号と 1 ビット遅延した光信号を光遅延させることができる干渉計 (DLI : Delay Line Interferometer)、2 つの入力光の小さな違いを検出し、電気信号を出力するバランスドレシーバを含む光受信機能のほか、カプラで構成される光分岐機能、各種高周波部品、各種制御回路で構成される光遅延干渉制御機能から構成されている。OHA に入力された受信光は、LNA 経由して、ループバック光信号も合波する光分岐機能 4 に入力される。この光信号は、光遅延干渉計に入力され、隣り合うビット間で干渉させ、カプラで分岐される。片方の光は主信号検出用のバランスドレシーバに入力され、11.0957 Gbps 電気信号に変換される。もう片方の光はピーク信号検出用のバランスドレシーバに入力され、DLI ヒータ制御に必要なピーク信号を出力する。11.0957 Gbps 電気信号は各種高周波部品を介して FPGA へと受け渡され、ピーク信号は FPGA を介して、光遅延干渉計のヒータへとフィードバック制御される。

なお、FPGA は、受信したデータを復号処理する機能のほか、アップリンク／ダウンリンクデータ切り換え、光回線折り返し伝送機能が実装されているほか、10 Gbps 光送信部、10 Gbps 光受信部、LNA、HPA の各種制御回路との制御、収集したテレメトリモニタ情報を HDU へと受け渡す機能、異常を検出する機能も実装されている。

2.4 データ処理装置 (HDU : HICALI Data Unit)

HDU の主な機能は、ETS-9 の 1553B データバスとの間で地上のミッション衛星運用センターから送受信された HICALI 各コンポーネントの制御に関するコマンド、テレメトリに関する通信を行い、各コンポーネントへのコマンドを配信する機能及びテレメトリの収集を行う機能のほか、OHA への電源供給を行う機能を有している。図7は、HDU の機能ブロック図を、図8

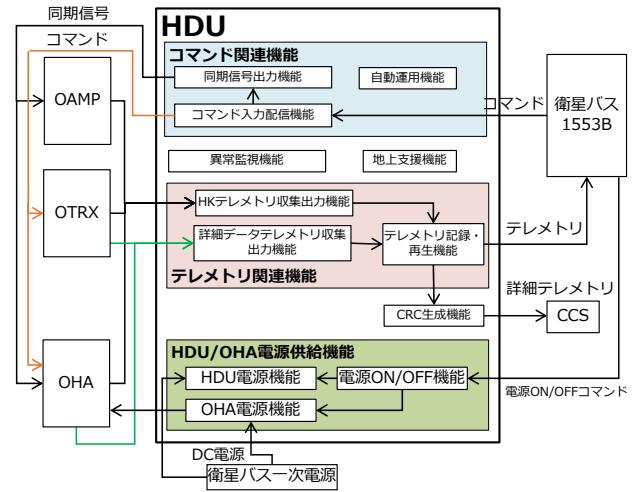


図7 HDU (HICALI データ処理装置) 機能ブロック図



図8 HDU (HICALI データ処理装置) 外観

は、外観図を示している。

HICALI 各コンポーネントとの制御と監視は、衛星のデータバスを通じての通信が基本としているが、衛星データバス-地上とのテレメトリ回線が低レートである一方、本ミッションの目的である光地上局からアップリンクされたレーザ光の伝搬データ及び大気揺らぎによる通信品質の劣化具合を観測、取得するためには、大容量のデータを地上に送信するには不十分である。そのため、OTRX 及び OHA における受信状態を 4 kHz で高速サンプリング行い、詳細テレメトリとして、衛星上で記録する機能を実装した。記録された詳細テレメトリは、衛星データバスを経由せずに、誤り巡回符号の一種である、CRC (Cyclic Redundancy Check、巡回冗長検査) を付加し、共通部送信機から RF 地球局へ Ka 帯で 2 Mbps の高速データ送信が可能な構成とした [5]。



図9 HICALI 宇宙セグメント開発過程

3 HICALI 宇宙セグメントの研究開発の経過

HICALI の開発進捗状況については、図9に示すとおりである。本研究開発プロジェクトの初期段階(2014年頃)では、当時は、まだ搭載する衛星を限定しない段階ではあったものの、10 Gbps の信号を処理が可能な信号処理回路及び光送受信器部分の開発が最も困難と想定されたことから、OTRX に相当するコンポーネントの概念設計から開始した。続いて、部分的な評価ボード試作及び評価を実施した。その後、衛星搭載を想定し、BBM 製作と評価を実施するとともに、当時、宇宙の放射線曝露環境下で、耐性を有すると確認されている、伝送速度が数 Gbps 以上の光通信デバイスが存在しなかったため、地上系光ファイバ通信ネットワークで流通している光通信デバイスが、宇宙環境耐性を有するかどうかスクリーニング実施した。さらに信頼性を確保するため、高速光通信で重要なデバイスである、通信波長を精密に制御する ITLA (Integrated Tunable Laser Assembly、波長可変レーザアセンブリ)、デジタル通信においてデータにクロックが重畠されている伝送路上の信号を受信し、クロックとデータを分離する機能を有する CDR (Clock Data Recovery)、一つの伝送路において複数の波長の通信波長を同時に乗せる WDM (Wavelength Division Multiplexing) 等の機能を有するデバイスについては、実際に放射線を照射するなどして、耐環境性評価を実施した[9]。

2017年頃までには、本研究報告の別報告で述べているとおり、ETS-9 の開発計画が具体化し、搭載仕様が固まり始めたため、以上の評価も踏まえて、ETS-9 搭載光フィーダリンク通信サブシステムとしての開発を

開始した。その後、2018年までに静止衛星-地上間で光通信の実証に必要なコンポーネントの基本・詳細設計及び詳細設計審査を実施した。引き続いて、各コンポーネントの EFM 製作及び単体試験、性能評価を2023年度上半期までに実施した。2023年度下半期には、HICALI 搭載サブシステムとしての評価、性能検証を実施し、衛星システムとのインターフェース部分も含めてプロトフライト後確認会／出荷前審査(PQR/PSR)を完了後、2024年8月までに衛星システム側に引渡を完了させた。

4 衛星システムへの引渡後の進捗

HICALI の衛星システムへの引渡後、衛星システム側の作業において、HICALI の各コンポーネントを衛星構体への搭載を行った後、各コンポーネント間のハーネス及び衛星バスシステムとのハーネス接続等の艤装作業を実施した。

この艤装作業の最終段階では、OHA-OAMP 間の光ファイバ同士の接続(スプライス)作業を HICALI サブシステム側で実施した。HICALI では、OTRX-OAMP 間は、試験、艤装時のハンドリングも考慮して、宇宙グレードの光コネクタにて相互接続としたが、OHA-OAMP 間は、光ファイバの艤装距離が長いこと、特に送信(ダウンリンク)側ファイバは、数 W 以上の高出力レーザ光が伝送することもあり、超低損失の実現、機械、熱環境に対する信頼性を考慮して、融着による永久接続とした。

その後、HICALI サブシステムが、衛星システム上で正常に機能することを確認するために、以下の試験を実施した。

- ・搭載各コンポーネントの機能及び性能確認試験
- ・HICALI のテレメトリ・コマンド機能確認試験
- ・ウインドカバーの開放及びレーザ射出試験

特に、レーザ射出試験では、試験環境及びスケジュール等も考慮して、低出力による簡易的な治具を用いて性能が維持されていること確認することにした。

以上実施の結果、HICALI サブシステムが正常に起動して、テレメトリの結果からも所定の動作をしていることが確認できた。本稿執筆時点(2025年9月)では、衛星システム側の開発スケジュールに連動して、HICALI サブシステム側で隨時、性能が維持されていることを確認している。

5 まとめ

本報告では、技術試験衛星 9 号機(ETS-9)通信ミッションのうち、静止衛星-地上間にて 10 Gbps 光衛星

3 ETS-9 の衛星搭載通信システム

通信システムを実証する光フィーダリンク通信サブシステム (HICALI) の開発状況及び衛星システムへの搭載、その後の試験結果について述べた。

初期段階の概念設計着手から既に 10 年近く要したが、特にコンポーネント製造から試験段階においては、2019 年末に発生した新型コロナウイルス感染症 (COVID-19) の世界的な流行に伴う行動あるいは対面を伴う作業等の制限は、対面が原則であった工程等に大きなインパクトを与え、急遽リモートでの対応を余儀なくされた場面が多く発生し、各メーカーの現場においてかなり苦労されたと聞いている。

光衛星通信システムは、今後、宇宙通信分野において果たす期待がますます大きくなっていく中で、我々の研究活動が宇宙空間も含めた本格的な NTN 時代の重要な技術として、いち早く実証実験の実施に向け活動していく予定である。

謝辞

本プロジェクト遂行にあたり、衛星システムを担当する JAXA、三菱電機株式会社及び ETS-9 HICALI 搭載コンポーネントの製作、各種試験の評価を担当した日本電気株式会社、株式会社アストロテラス、米国 BridgeComm Inc. の関係各位の協力に感謝する。

【参考文献】

- 1 深津 敦, “技術試験衛星 9 号機 (ETS-9) の概要,” 日本航空宇宙学会誌, 第 72 卷, 第 10 号, pp.362-367, 2024.
- 2 Y. Munemasa, et al., “Design status of the development for a GEO-to-ground optical feeder link, HICALI,” Proc. SPIE 10524, Free-Space Laser Communication and Atmospheric Propagation XXX, 105240F, 15, Feb. 2018. doi:10.1117/12.2291881.
- 3 合田 拓朗, ほか, “衛星搭載光通信トランスポンダの開発,” 第 61 回宇宙科学技術連合講演会講演集, JSASS-2017-4526, 2017.
- 4 小竹 秀明, ほか, “衛星搭載用 10 Gbps 級超高速光通信コンポーネントの設計検討,” 第 62 回宇宙科学技術連合講演会講演集, JSASS-2018-4486, 2018.
- 5 小竹 秀明, ほか, “光フィーダリンクシステム向け衛星搭載用 10 Gbit/s 級光空間通信コンポーネントとテレメトリコマンドデータユニットの設計,” 信学技報, SAT2018-64, pp.41-46, no.442, vol.118, 2018.
- 6 宗正 康, ほか, “技術試験衛星 9 号機光フィーダリンク通信サブシステムの開発,” 第 63 回宇宙科学技術連合講演会講演集, JSASS-2019-4147, 2019 年.
- 7 久保岡 俊宏, ほか, “技術試験衛星 9 号機搭載光フィーダリンク通信サブシステムの開発,” 第 66 回宇宙科学技術連合講演会講演集, JSASS-2022-4082, 2022.
- 8 小竹 秀明, ほか, “技術試験衛星 9 号機 (ETS-9) 搭載光フィーダリンク通信サブシステム “HICALI” の研究開発状況,” 第 67 回宇宙科学技術連合講演会講演集, JSASS-2023-40963, 2023.
- 9 小竹 秀明, ほか, “技術試験衛星 9 号機搭載光フィーダリンクサブシステム HICALI の開発状況とシステム検証,” 第 68 回宇宙科学技術連合講演会講演集, 1C08, 2024.



宗正 康 (むねまさ やすし)

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
主任研究員
博士 (工学)
宇宙通信システム、光アンテナ、光宇宙通信、
MEMS
【受賞歴】
2015 年 電子情報通信学会 衛星通信研究会
JC-SAT 賞
2013 年 電気学会論文誌 E「センサ・マイクロ
マシン英文特集号」優秀論文賞



小竹 秀明 (こたけ ひであき)

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
主任研究技術員
博士 (工学)
宇宙光通信システム、非地上系ネットワーク、
光送受信器、光増幅器、大気揺らぎ
【受賞歴】
2023 年 電子情報通信学会 衛星通信研究賞



白玉 公一 (しらたま こういち)

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
主任研究技術員
光衛星通信システム、宇宙通信システム



Kolev Dimitar (これふ でいみたる)

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
主任研究員
博士 (国際情報通信学)
宇宙通信システム、光アンテナ、光宇宙通信、
大気揺らぎ



久保岡 俊宏 (くぼおか としひろ)

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
研究マネージャー
博士 (理学)
光衛星通信システム、人工衛星軌道力学