

4-6 Ka 帯地球局の概要と開発

4-6 Overview and Development of the Ka-band Earth Station

高橋 卓 鄭炳表 鈴木 健治 川崎 和義 三浦 周

TAKAHASHI Takashi, JEONG Byeongpyo, SUZUKI Kenji, KAWASAKI Kazuyoshi, and MIURA Amane

次世代ハイスループット衛星で必要となるフレキシブル技術として、技術試験衛星9号機(ETS-9)にはチャネライザとデジタルビームフォーマを開発し搭載している。

ETS-9 搭載機器の機能性能確認や様々なユースケースを想定した実証実験に使用する地球局を開発した。衛星ネットワークのハブとなるフィーダリンク地球局を鹿島宇宙技術センターと沖縄電磁波技術センターに整備し、またユーザ局として大型車載地球局、小型移動体地球局や船舶搭載地球局などを整備した。これらの地球局について報告する。

As a flexible technology required for next-generation high-throughput satellites, digital channelizer and digital beamformer have been developed and installed on the Engineering Test Satellite-9 (ETS-9).

For verifying the functionality and performance of ETS-9 onboard equipment and for demonstration experiments assuming various use cases, several types of earth stations were developed. Feeder link earth stations, which will perform as the hubs of the satellite network, have been established at the Kashima Space Technology Center and the Okinawa Electromagnetic Technology Center, and user stations such as large vehicle-mounted earth stations, small mobile earth stations, and ship-mounted earth stations have also been established. We will report on these earth stations.

1 まえがき

近年、世界的にハイスループット衛星(High Throughput Satellite : HTS) [1] と呼ばれるマルチビームかつ大容量通信静止衛星や低軌道衛星群によるメガコンステレーション [2] など多様な非地上系ネットワーク(Non-Terrestrial Network : NTN)が登場し、地上系通信網からNTNへ拡張した3次元的なネットワークの構成が期待されている。我が国でも次世代HTSの技術実証に向け、2025年度以降の打上げを目指し、技術試験衛星9号機(Engineering Test Satellite 9 : ETS-9)の開発が進められている[3]。ETS-9では世界市場においても競争力のあるミッション技術の獲得を目指し、Ka帯通信及び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／デジタルビームフォーマ(Digital Beam Former : 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を開発している。デジタルチャネライザは衛星上で受信信号を複数の周波数帯域に分波した後、各分波信号を送信先ビームへスイッチし、再度合波する装置であり、DBFはアンテナのパターン形成をデジタル信号処理により実現するものである。

ETS-9を使用し、開発したKa帯通信ミッションの軌道上実証のほか、第5世代移動通信システム(5th Generation Mobile Communication System : 5G)との連接など様々なユースケースを想定した実証実験を計画している[4]。

本稿では、ETS-9実証実験に使用するために開発してきた多種にわたるKa帯地球局[5]について報告する。

2 フィーダリンク地球局

ETS-9実証実験においては衛星-ユーザ局間をユーザ回線とし、一方で衛星-基幹地球局をフィーダリンクとしており、中心的役割を果たす基幹地球局であるフィーダリンク地球局としてNICTの鹿島宇宙技術センター(茨城県鹿嶋市)と沖縄電磁波技術センター(沖縄県恩納村)に大型地球局を整備した。地理的に離れた2地点にフィーダリンクを整備することで大雨等で一方の局の通信回線が不良になった際、他方へ通信回線を切り替えるサイトダイバシティを適用することで、通信成立性を向上させることができている。

共に直径4m以上のパラボラアンテナと線形出力

170 W の進行波管増幅器 (Traveling Wave Tube Amplifier: TWTA) を有しており、ETS-9 を経由してユーザ局との通信を行う。また、両局はアンテナの大きさ等性能は異なるが、中間周波数 (Intermediate Frequency: IF) インターフェース、TWTA、低雑音コンバータ (Low Noise Converter: LNC) 等の RF 部の設計をできるだけ共通化することでコストを抑えている。なお IF インターフェースに関しては、受信系の右旋円偏波用端子数と左旋円偏波用端子数が異なるが、基本的な設計は同じである。



図 1 鹿島大型地球局外観

2.1 鹿島大型地球局 [5]

鹿島宇宙技術センターに直径 4.2 m のアンテナを有するフィーダーリンク地球局を整備した。図 1 に外観を、図 2 にブロックダイヤグラムを示す。また、主要諸元を表 1 に示す。

鹿島大型地球局は、ETS-9 通信ミッションが使用す

表 1 鹿島大型地球局主要諸元

項目	機能・性能
送信周波数	29.0~30.0 GHz
受信周波数	19.2~20.2 GHz
偏波	円偏波 右旋／左旋 同時送受信
IF周波数	L帯 (0.95~1.95 GHz)
アンテナ径	4.2 m
EIRP	82.0 dBW以上
G/T	33.8 dB/K以上
アンテナ駆動範囲	Az : ± 90 deg El : 0~90 deg
衛星追尾方式	ビーコン信号追尾 (ステップトラック) マニュアル追尾

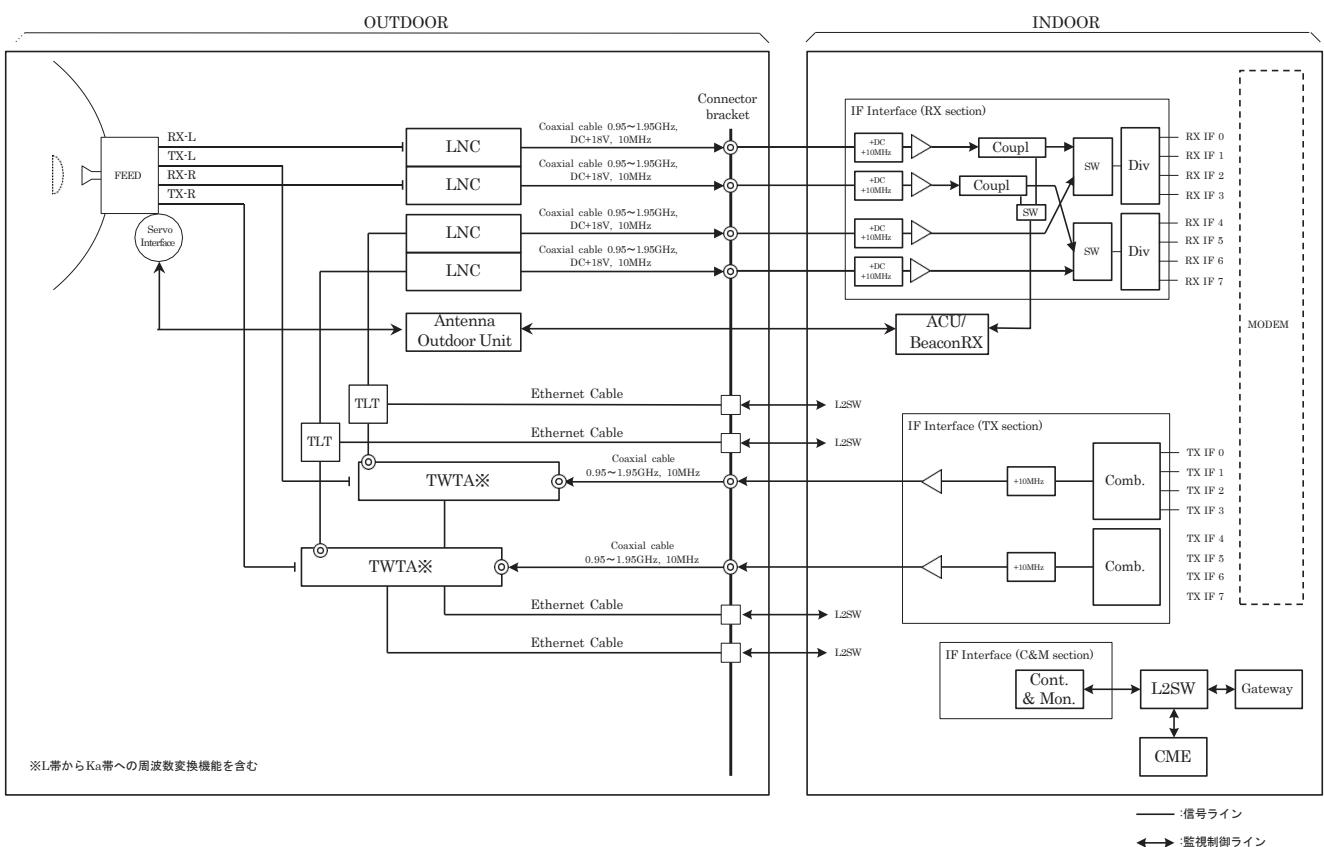


図 2 鹿島大型地球局ブロックダイヤグラム

る全周波数帯域(上り 29.0 ~ 30.0 GHz / 下り 19.2 ~ 20.2 GHz)通信可能であり、フィーダリンクのみならずユーザリンクとして実験に使用することも可能となっている。右旋円偏波用、左旋円偏波用それぞれに TWTA と LNC を装備しており、右旋／左旋送受同時に行うことが可能となっている。アンテナは衛星からのビーコン信号を受信した後はアンテナの指向方向を変化させ、受信電力が最大になる方向に検出することにより衛星を追尾するステップトラック方式で追尾を行う。



図 3 沖縄大型地球局外観

2.2 沖縄大型地球局 [5]

沖縄電磁波技術センターに直径 4.5 m のアンテナを有するフィーダリンク地球局を整備した。図 3 に外観を、図 4 にブロックダイヤグラムを示す。また、主要諸元を表 2 に示す。

沖縄大型地球局は、ETS-9 通信ミッションの全周波

表 2 沖縄大型地球局主要諸元

項目	機能・性能
送信周波数	29.0~30.0 GHz
受信周波数	19.2~20.2 GHz
偏波	円偏波 右旋／左旋 同時送受信
IF周波数	L帯 (0.95~1.95 GHz)
アンテナ径	4.5 m
EIRP	79.8 dBW以上
G/T	32.6 dB/K以上
アンテナ駆動範囲	Az : ± 25 deg El : 25~60 deg
衛星追尾方式	ビーコン信号追尾 (ステップトラック) マニュアル追尾

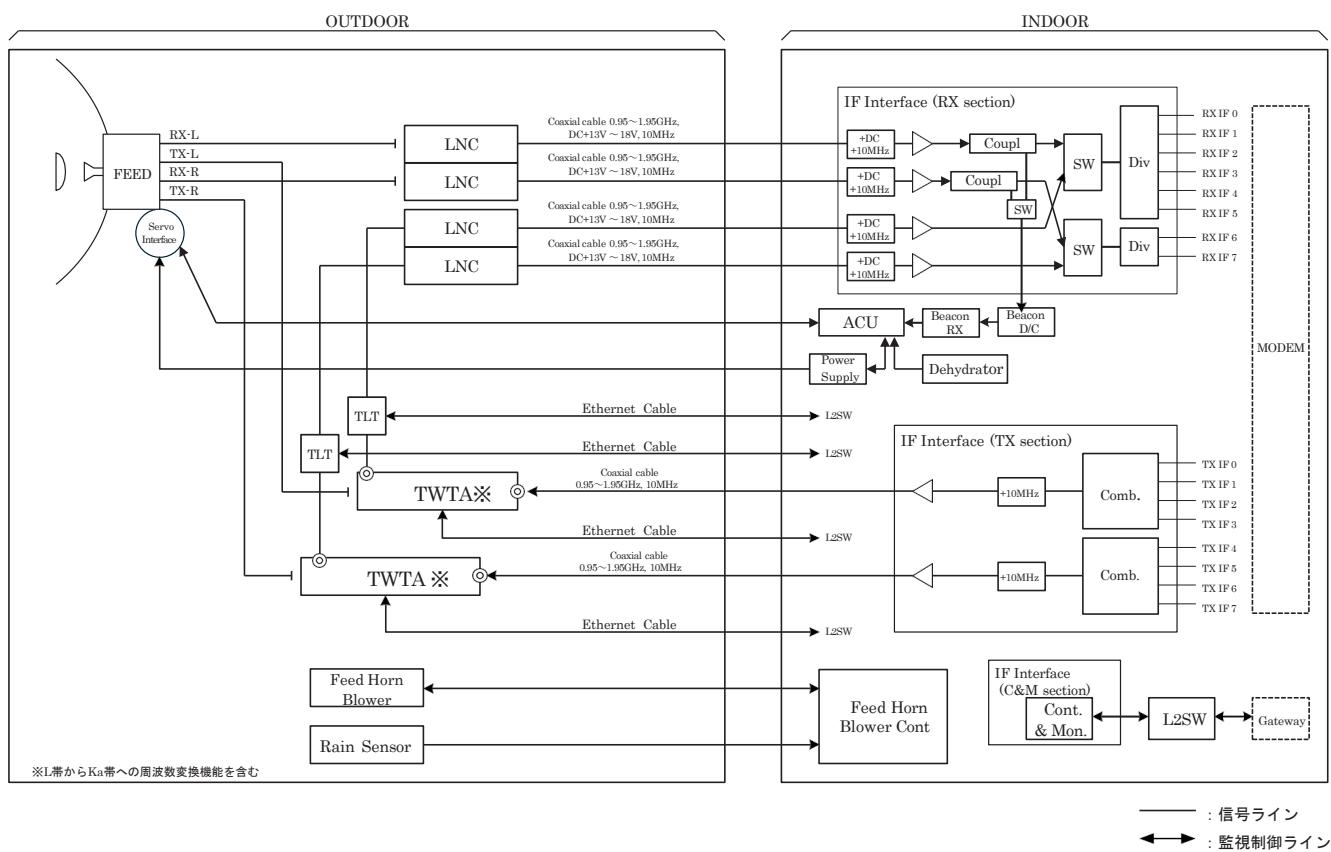


図 4 沖縄大型地球局ブロックダイヤグラム

数帯域で使用可能であり、右旋円偏波・左旋円偏波両偏波に対応しており、フィーダリンクのみならずユーザリンクとして実験に使用することも可能となっている。沖縄大型地球局では、受信する右旋円偏波信号は共通部サブシステムから送信されるビーコン信号と詳細テレメトリだけの予定であり、通信実験に使用しないため、IFインターフェースの数を減らしてある。その分、左旋円偏波用に多く割り当てている。

3 ユーザ地球局

ETS-9は通信ミッションとしてデジタルチャネライザやDBFを搭載している。これら搭載機器の機能・性能確認に関する実証実験のほか、様々なユースケースを想定した実証実験も計画している。これらの計画している実証実験に使用するために各種ユーザ地球局を整備してきた。

3.1 大型車載地球局 [5]

様々な場所でも実験実施可能となるよう、直径2.4 mのアンテナを有する大型車載地球局を整備した。実験場所へ移動した後、アンテナを展開して使用するものである。車両には発電機を搭載しており、電源のない場所での使用も可能となっている。外観を図5に、主要諸元を表3に示す。受信は右旋円偏波／左旋円偏波同時受信可能であるが、送信は右旋円偏波／左旋円偏波を切り替えて使用する。送受信とも通信ミッション全周波数帯域に対応可能であり、フィーダリンク地球局が使用できない場合に、ユーザ局との通信機能を担うことも可能となるよう、ユーザ局としては大きな2.4 mアンテナを使用している。

3.2 小型移動体地球局 [5]

様々な場所でも実験実施可能となるよう、また、走行しながら通信実験が可能となるよう直径0.65 mのアンテナを有する小型移動体地球局を整備した。外観を図6に示す。実験時には車両(図7)の上に搭載し、車両に搭載されている発電機で動作させる。主要諸元を表4に示す。受信は右旋円偏波／左旋円偏波同時受信可能であるが、送信は右旋円偏波／左旋円偏波を切り替えて使用する。通信ミッションのユーザリンクに割り当てられた周波数(上り29.5～30.0 GHz／下り19.7～20.2 GHz)を使用可能である。アンテナ駆動範囲は方位角方向は無限回転であり、仰角方向は25～95 degとなっている。車体の状態によりアンテナ真上方向(仰角90 deg)を超えるような動作においても高速に動かせるよう、仰角軸に垂直な軸でも駆動できるようにしている。アンテナにはジャイロが搭載



図5 大型車載地球局外観

表3 大型車載地球局主要諸元

項目	機能・性能
送信周波数	29.0～30.0 GHz
受信周波数	19.2～20.2 GHz
偏波	円偏波 右旋／左旋 切替送信 右旋／左旋 同時受信
IF周波数	L帯 (0.95～1.95 GHz)
アンテナ径	2.4 m
EIRP	74.7 dBW以上
G/T	27.0 dB/K以上
アンテナ駆動範囲	Az : 0～360 deg El : 15～65 deg
衛星追尾方式	ビーコン信号追尾 (ステップトラック) マニュアル追尾

されており、トンネル等障害でビーコン信号が遮断した場合、送信を停止する機能を有している。また、ビーコン信号遮断後もジャイロを使用し、しばらくは衛星を追尾可能である。障害がなくなった後、直ちにビーコン信号受信が復旧し、通信を再開できる。障害が長くなった場合は、衛星をロストしたと判断し、衛星サーチを始めるシーケンスとなっている。



図 6 小型移動体地球局外観



図 8 船舶搭載地球局外観



図 7 小型移動体地球局用車両

表 4 小型移動体地球局主要諸元

項目	機能・性能
送信周波数	29.5~30.0 GHz
受信周波数	19.7~20.2 GHz
偏波	円偏波 送受同偏波 右旋／左旋 切替
IF周波数	L帯 (0.95~1.95 GHz)
アンテナ径	0.65 m
EIRP	57.8 dBW以上
G/T	16.1 dB/K以上
アンテナ駆動範囲	Az : 0~360 deg El : 25~95 deg X-El : ±15 deg
衛星追尾方式	モノパルス追尾 マニュアル追尾

表 5 船舶搭載地球局主要諸元

項目	機能・性能
送信周波数	29.5~30.0 GHz
受信周波数	19.7~20.2 GHz
偏波	円偏波 送受同偏波 右旋円偏波／左旋円偏波 切替
IF周波数	L帯 (0.95~1.95 GHz)
アンテナ径	0.65 m
EIRP	50.9 dBW以上
G/T	16.4 dB/K 以上
アンテナ駆動範囲	Az : 0~360 deg El : -20~115 deg
衛星追尾方式	ビーコン信号追尾

3.3 船舶搭載地球局 [5]

ETS-9 がカバーする海洋上でも実験実施可能となるよう、直径 0.65 m のアンテナを有する船舶搭載地球局を整備した。ユーザリング周波数で使用可能であり、右旋円偏波／左旋円偏波を送信・受信で切り替えて使用することができる。外観を図 8 に、主要諸元を表 5 に示す。送受信同偏波、右旋／左旋を切り替えて使用する。アンテナはビーコン信号受信後、自動追尾する。また、GPS コンパスを使用して、地球局位置と方向を正確に把握できるため、衛星捕捉時間を短縮することが可能となっている。波等の影響を受け、衛星方向の仰角がマイナスになる場合や、90 deg を超えることも想定され、駆動範囲が仰角 -20 ~ 115 deg となっている。

3.4 小型船舶搭載地球局

ETS-9 がカバーする海洋上でも実験実施可能となるよう、直径 0.54 m のアンテナを有する小型船舶搭載地

4 ETS-9 地上系設備の研究開発

球局を整備した。船舶地球局と比較してアンテナ直径を小さくし、小型の船舶にも搭載できるように開発したものである。ユーザリング周波数で使用可能であり、送受偏波を切り替えて使用することができる。外観を図9に、主要諸元を表6に示す。送受信同偏波、右旋／左旋を切り替えて使用する。アンテナはビーコン信号

受信後、自動追尾する。船舶搭載地球局と比較して大きな増幅器(20 W)を搭載しているため、実効輻射電力(Equivalent Isotropic Radiated Power:EIRP)が大きくなっている。波等の影響を受け、衛星方向の仰角がマイナスになる場合や、90 degを超えることも想定され、駆動範囲が仰角-20～160 degとなっている。また、ア



図9 小型船舶搭載地球局外観

表6 小型船舶搭載地球局主要諸元

項目	機能・性能
送信周波数	29.5～30.0 GHz
受信周波数	19.7～20.2 GHz
偏波	円偏波 送受同偏波 右旋／左旋 切替
IF周波数	L帯 (0.95～1.95 GHz)
アンテナ径	0.54 m
EIRP	55.0 dBW以上
G/T	13.7 dB/K以上
アンテナ駆動範囲	Az : 0～360 deg El : -20～160 deg X-El : ±15 deg
衛星追尾方式	モノパルス追尾 マニュアル追尾

表7 可搬型地球局主要諸元

項目	機能・性能
送信周波数	29.5～30.0 GHz
受信周波数	19.7～20.2 GHz
偏波	円偏波 右旋／左旋 切替
IF周波数	L帯 (0.95～1.95 GHz)
アンテナ径	0.75 m
EIRP	55.0 dBW以上
G/T	13.5 dB/K以上
アンテナ駆動範囲	Az : ±50 deg El : 20～70 deg
衛星追尾方式	ビーコン信号を用いた 自動捕捉 (追尾機能なし)

ンテナ真上方向において高速に追尾動作させるために仰角軸に垂直な軸でも駆動できるようにしている。

3.5 可搬型地球局

様々な場所でも実験実施可能となるよう、3名で輸送・組立・運用が可能な直径 0.75 m のアンテナを有する可搬型地球局を整備した。実験場所へ移動した後、地球局を組立て使用するものである。外観を図 10 に、主要諸元を表 7 に示す。送受信の偏波は導波管スイッチを切り替えることで右旋／左旋を選択し使用する。電源を入れた後はボタン押下で衛星を 10 分以内でサーチ・捕捉が可能である。詳細設定は制御 PC から可能となっている。

4 おわりに

次世代 HTS に必要となるフレキシビリティを実現するためのデジタルチャネライザ／デジタルビームフォーマを搭載した ETS-9 の各種実証実験に使用する Ka 帯地球局を紹介した。これらの地球局は ETS-9 搭載機器の健全性確認、機能性能確認から様々なユースケースを想定した実証実験に使用する計画である。

ユースケースの一つとして航空機衛星通信が挙げられているが、ここで紹介したユーザ地球局はアンテナが機械駆動であり、航空機上部に設置すると空気抵抗が大きくなってしまい、航空機の燃費や速度に大きく影響する。このため空気抵抗の影響の小さな薄型アンテナが期待されている。機械的ではなく電子的にビーム方向を制御可能な電子走査ビームアンテナを装備したユーザ局の開発を検討している。

謝辞

本研究開発の一部は総務省「電波資源拡大のための研究開発 (JPJ000254)」の「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。関係各位に感謝する。

【参考文献】

- 1 三浦 周, 大川 貢, “ハイスループット衛星 (HTS),” 電子情報通信学会誌, vol.106, no.7, pp.611, 2023.
- 2 <https://www.starlink.com/>
- 3 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み,” 電子情報通信学会誌, vol.102, no.12, pp.1080–1084, 2019.
- 4 高橋 阜, 三浦 周, 森川 栄久, 辻 宏之, 内田 繁, 堀江 延佳, 坂井 英一, 草野 正明, 須永 輝巳, 角田 聰泰, 田中 泰, “ETS-9 での実験計画(RF 系),” 第 66 回宇宙科学技術連合講演会講演集, 1F09, JSASS-2022-4088, 2022.
- 5 菅 智茂, 鄭 炳表, 川崎 和義, 鈴木 健治, 高橋 阜, 吉村 直子, 辻 宏之, “ETS-9 用 RF 地球局の研究開発状況,” 第 66 回宇宙科学技術連合講演会講演集, 1F05, JSASS-2022-4084, 2022.



高橋 阜 (たかはし たかし)

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

副室長
高速衛星通信、移動体衛星通信
【受賞歴】
2019 年 電子情報通信学会 活動功労賞
2017 年 電子情報通信学会 衛星通信研究賞



鄭 炳表 (じょん びよんぴよ)

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)
衛星通信、電波伝搬、災害対応



鈴木 健治 (すずき けんじ)

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
衛星通信

【受賞歴】
2020 年 電子情報通信学会通信ソサイエティ 活動功労賞
2017 年 2016 年度 電子情報通信学会 衛星通信研究賞
1996 年 第 63 回通信記念日大臣表彰 団体 (業務優績)



川崎 和義 (かわさき かずよし)

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
衛星通信

【受賞歴】
2023 年 第 37 回電波技術協会賞
2014 年 2014 年度 電子情報通信学会 衛星通信研究賞



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