

4-8 衛星地上連接システムのシミュレーション評価

4-8 *Simulation Evaluation of Satellite-Terrestrial Interconnected Systems*

阿部 侑真 関口 真理子 三浦 周

ABE Yuma, SEKIGUCHI Mariko, and MIURA Amane

Beyond 5G におけるカバレッジ拡張の観点から非地上系ネットワーク (NTN : Non-Terrestrial Networks) が注目を集めている。NTN とは、静止軌道衛星、低軌道衛星、高高度プラットフォーム (HAPS)、ドローンなど、多様なプラットフォームを介して海、空、宇宙などの異なる空間を相互につなぐシステムである。本稿では、筆者らが提案している衛星地上連接システムの最適化フレームワークについて紹介し、数値シミュレーションによる評価結果を述べる。

Non-terrestrial networks (NTN) have been attracting attention as a means of expanding coverage in the era of Beyond 5G. NTN refers to a system that interconnects diverse spatial domains such as sea, air, and space through various platforms including geostationary satellites, low Earth orbit satellites, high-altitude platform stations (HAPS), and drones. In this paper, we introduce an optimization framework for satellite-terrestrial interconnected systems proposed by the authors and present the results of performance evaluations conducted through numerical simulations.

1 はじめに

非地上系ネットワーク (NTN : Non-Terrestrial Networks) は、Beyond 5G におけるカバレッジ拡張の観点から注目を集めしており、静止軌道 (GEO : Geostationary Orbit) 衛星、低軌道 (LEO : Low Earth Orbit) 衛星、高高度プラットフォーム (HAPS : High-Altitude Platform Station)、ドローンなど、様々なプラットフォームを相互に接続するシステムである [1][2]。5G と NTN の相互接続のために、3GPP (Third Generation Partnership Project) において標準化及び仕様策定が進められており、今後のサービス展開と普及が期待されている。本稿では、5G システムと NTN システムが連携するシステムを衛星地上連接システムと呼ぶ。

3GPP で定義されている 5QI (5G QoS Identifier) は、5G 端末 (UE:User Equipment) と 5G コアの UPF (User Plane Function) 間で必要とされるパケット転送処理に対する QoS 特性を表すものであり、5G システムにおける代表的なサービスのトラヒックに対する QoS 要件を表現するために用いられている。各 5QI 値には、リソース種別、デフォルト優先度、許容遅延 (PDB : Packet Delay Budget)、許容パケット誤り率などの QoS 特性が定義されており、対応するサービス例も規定されている。リソース種別には、保証ビットレート

(GBR : Guaranteed Bit Rate)、非保証ビットレート (Non-GBR) が含まれる。3GPP TS 23.501[3] で定義されている 5QI の一例を表 1 に示す。例えば、5QI 1 は音声通話 (許容遅延 : 100 ms)、5QI 3 はリアルタイムゲーミング (許容遅延 : 50 ms) に割り当てられている。この識別子によって、5G システムはトラヒックの QoS 要件を認識し、それに応じたリソース割当てを実現できる。

5G が NTN をバックホールとして用いる構成では、

表 1 3GPP TS 23.501[3] で定義されている 5QI の一例

5QI	リソース種別	許容遅延 (PDB)	サービス例
1	GBR	100 ms	Conversational Voice
2	GBR	150 ms	Conversational Video (Live Streaming)
3	GBR	50 ms	Real Time Gaming, V2X messages
4	GBR	300 ms	Non-Conversational Video (Buffered Streaming)
65	Non-GBR	75 ms	Mission Critical user plane Push To Talk voice
70	Non-GBR	200 ms	Mission Critical Data
80	Non-GBR	10 ms	Low Latency eMBB applications, Augmented Reality

UE は 5G 基地局 (gNB) に接続し、そのトラヒックはエッジ側ノード (gNB またはエッジ側の UPF)、NTN リンク、NTN 地上局、そして 5G コアの UPF を経由してデータネットワーク (DN: Data Network) に転送される。NTN 部分のリンク遅延は大きく変動し、LEO では最大 30 ms、GEO では最大 280 ms にも達するため [4]、5QI で要求される許容遅延を常に満たすことは困難である。さらに、システム内に多数の 5G トラヒックが存在する場合、個別のトラヒック単位で NTN システム内のリソース割当てや経路の最適化を行うことは計算量が膨大になり、実用的ではない。

この課題に対応するため、筆者らは、NTN 内のトラヒック QoS を表現するための NQI (NTN QoS Identifier) と、NQI に基づいて NTN トラヒックをグループ化する NTN スライスの概念を導入したフレームワークを提案している [5][6]。図 1 に示す衛星地上連接システムの最適化フレームワークでは、(i) 5QI と NQI のマッピング、(ii) NTN トラヒックとスライスのマッピング、(iii) NTN スライスの帯域制御・経路制御、の 3 要素で構成されている。このフレームワークにより、5G と NTN のトラヒックを統合的に扱うことが可能となり、NTN スライス単位での効率的なトラヒック制御が実現される。

本稿では、本最適化フレームワークの概要と、複数のシナリオを対象とした数値シミュレーションを実施し、衛星地上連接システムの性能を評価した結果について述べる。なお、本稿は [5]–[8] での発表内容をまとめたものである。

衛星地上連接システムの最適化

2 フレームワーク

本節では、図 1 に示す衛星地上連接システムの最適化フレームワークについて説明する。以下では、衛星に直接接続する gNB 以外のユーザを衛星ユーザと呼び、衛星ユーザと gNB の総称を NTN ユーザと呼ぶ。

2.1 5QI と NQI のマッピング

衛星地上連接システムにおいて、5G トラヒックを NTN 内で効率的に管理するためには、5G トラヒックを NTN トラヒックへと変換する必要がある(図 1 の (i) に相当)。UE が gNB に接続されると、UE から発生する各 5G トラヒックの 5QI はエッジ側ノード (gNB またはエッジ側の UPF)において NQI へとマッピングされる。ここで、マッピング関数は gNB ごとに異なっていてもよい。さらに、各 gNB では、同一の NQI にマッピングされた 5G トラヒックは集約され、1 つの NTN トラヒックとして扱われる。NTN トラヒックの要求帯域は収容される 5G トラヒックの要求帯域の合計とする。

5QI-NQI マッピングのイメージを図 2 に示す。ここでは簡単のため、NTN 区間外の遅延は無視できる程度に小さいものとする。マッピング例 1においては、許容遅延が 100 ms (5QI 1)、150 ms (5QI 2)、50 ms (5QI 3) のトラヒックを、許容遅延が 150 ms の NQI 2 にマッピングして NTN の経路選択を行う。この場合、そのトラヒックの許容遅延は 150 ms として NTN 内で取り扱われるため、割り当てられた経路が元の 5G トラヒックの遅延要件を満たせず、ユーザの満足度が低

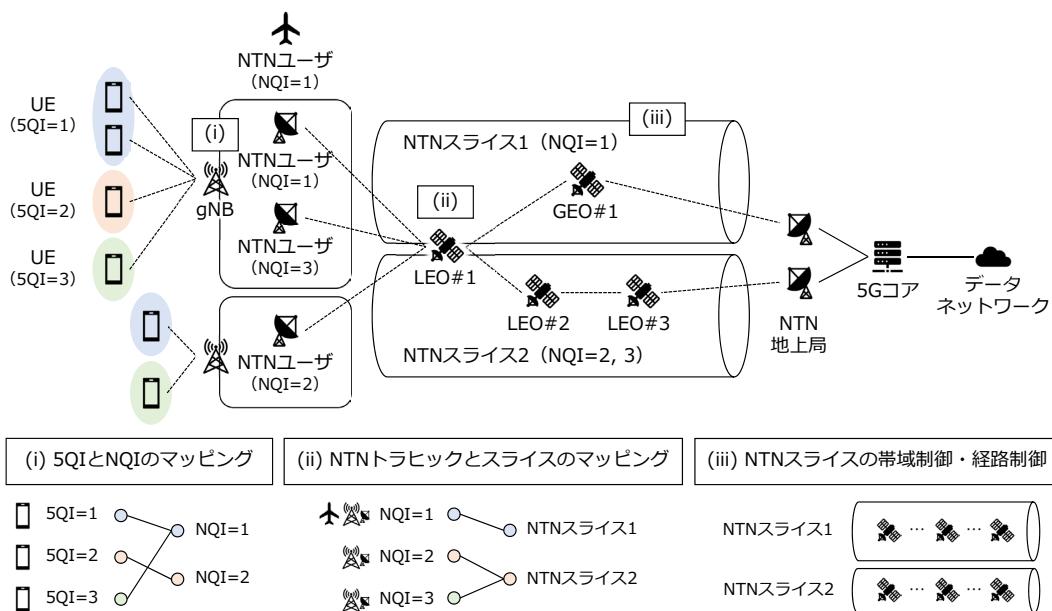


図 1 衛星地上連接システムの最適化フレームワーク

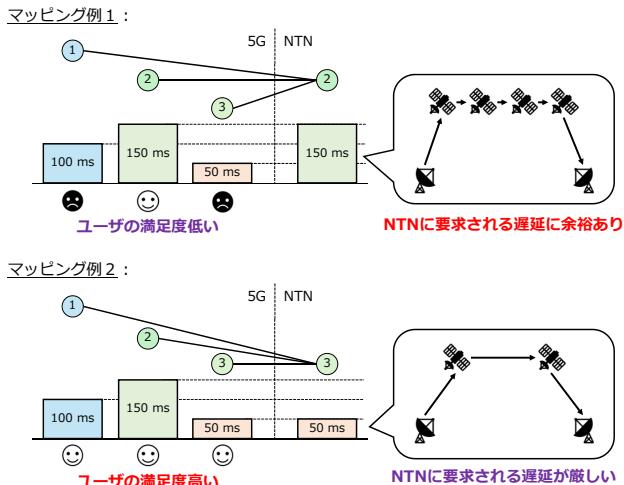


図 2 5QI-NQI マッピングのイメージ図

くなる可能性が高い。その一方、NTN としては許容される遅延に余裕があることになる。マッピング例 2 においては、例 1 と同じ 5QI を、許容遅延が小さい 50 ms の NQI 3 にマッピングした場合を示す。この時、NTN 内ではトラヒックの許容遅延は 50 ms として取り扱われるため、この要求を満たす経路が割り当てられれば元の 5G トラヒックの許容遅延を満たすことができるが、その遅延要件が厳しすぎる場合には、そもそも実現可能な NTN 経路が見つからない可能性もある。

2.2 NTN トラヒックとスライスのマッピング

本研究では、NTN スライスを同一の宛先及び 1 つ以上の指定された NQI を共有する NTN トラヒックの集合として定義する。(ii) では、NTN トラヒックを NTN スライスにマッピングする。ここで、各衛星は NTN トラヒックを NTN スライスへマッピングする関数を有しており、各 NTN ユーザが最初に接続される衛星においてスライシングが行われる。ここで、その関数は衛星ごとに異なっていてもよい。また、NTN スライスの要求帯域は収容される NTN トラヒックの要求帯域の合計とする。

2.3 NTN スライスの帯域制御・経路制御

(iii) では、(ii) で定義した NTN スライス単位で帯域割当てと経路を最適化する。ここでは、NTN スライスに紐づく要求帯域と宛先に基づき、混合整数計画問題 (MIP: Mixed-Integer Programming) 解くことによって各スライスの帯域と経路が決定する。

最適化問題で最小化される評価関数を

$$J = \frac{w_f}{N_s F} \sum_{i \in \mathcal{N}_s} \max(0, r_{s,i} - b_i) + \frac{w_\ell}{N_s L} \sum_{i \in \mathcal{N}_s} \max(0, \ell_i - \bar{\ell}_i) \quad \dots \dots \dots (1)$$

と定義する。ここで、 N_s はスライス数、 \mathcal{N}_s はスライスのインデックス集合、 b_i と $r_{s,i}$ はスライス i の割当帯域と要求帯域、 ℓ_i と $\bar{\ell}_i$ はスライス i の遅延と NQI によって決まる許容遅延を表す。また、 w_f と w_ℓ は $w_f + w_\ell = 1$ を満たす各項目への重み、 F と L は正規化パラメータである。制約条件の詳細については [9][10] を参照されたい。

各トラヒックへの割当帯域については、各 NTN スライスに割り当てられた帯域をそのスライスに紐づいている NTN ユーザの要求帯域に比例する形で配分し、さらに各 gNB に割り当てられた帯域をその gNB に紐づいている UE の要求帯域に比例する形で配分する [7]。

3 数値シミュレーション評価

本節では、提案した図 1 の衛星地上連接システムの最適化フレームワークの性能を評価するための数値シミュレーションを行う。

本シミュレーションでは時刻 1 ステップを対象とする。シミュレーションにおけるネットワーク構成を図 3 に示す。NTN ノードとしては GEO 衛星と LEO 衛星 (高度: 1,000 km) を設定した。GEO 衛星は 3 機で固定とし、LEO コンステレーションとしては、軌道傾斜角を 45 度と 90 度の 2 パターン、衛星数を 6 軌道 × 12 機 = 72 機、6 軌道 × 15 機 = 90 機、10 軌道 × 12 機 = 120 機の 3 パターンとし、合計 6 パターンを設定して比較した。NTN 地上局としては、3 局の光地上局を東京 (北緯 35.71 度、東経 139.49 度)、北アメリカ大陸西部 (北緯 42.45 度、西経 117.62 度)、アフリカ大陸南部 (南緯 22.56 度、東経 19.03 度) に配置し、それぞれにトラヒックの宛先となる DN を配置した。衛星間と衛星・地上局間リンクには光、衛星・NTN ユーザ間には電波を用い、各リンクの最大帯域はそれぞれ 10 Gbps と 500 Mbps とした。

NTN ユーザとしては、50 局の衛星ユーザ、50 局の gNB を全世界にランダムに配置した。また、各 gNB にはそれぞれ 5 局の UE を接続した。すなわち、合計で 250 局の UE が存在することになる。各衛星ユーザ

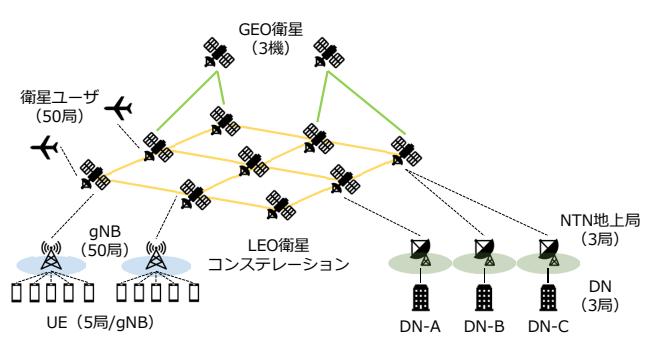
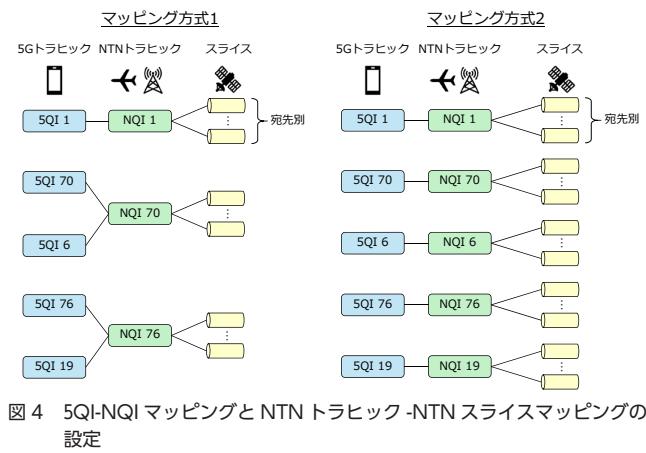


図 3 シミュレーションにおけるネットワーク構成

表2 5QI/NQIのパラメータ設定

5QI/ NQI	Resource Type	許容遅延 [ms]	要求帯域 (5QI) [Mbps]	要求帯域 (NQI) [Mbps]
1	GBR	100	0.5	0.5
70	Non-GBR	200	[1, 5]	[1, 5]
6	Non-GBR	300	[5, 40]	[10, 80]
76	GBR	500	[5, 20]	[10, 40]
10	Non-GBR	1100	[5, 25]	[10, 50]



と各UEからは複数のトラヒックが要求されると仮定し、そのトラヒック数を20、40、60、80、100と増加させた。ここで、各トラヒックの宛先の候補としては上記3局のNTN地上局に配置されているDN、5QI/NQIの候補としては表2に示す1、70、6、76、19の5種類、要求帯域の候補としては各5QI/NQIに紐づけた要求帯域の範囲とし、それらはランダム（一様分布）に決定した。各5QI/NQIの設定パラメータを表2に示す。

5QI-NQIマッピングとNTNトラヒック-NTNスライスマッピングの設定を図4に示す。今回のシミュレーションではマッピング方式1とマッピング方式2の2パターンを設定した。マッピング方式1では、5QI 1をNQI 1、5QI 70, 6をNQI 70、5QI 76, 10をNQI 76にマッピングする。マッピング方式2では、各5QIを同じパラメータを持つNQIに1対1にマッピングする。また、NTNトラヒックからNTNスライスへのマッピングについては、同じNQIと同じ宛先を持つNTNトラヒックを同じNTNスライスとして定義する。また、(iii)の最適化問題における重みは $w_f = w_\ell = 0.5$ とし、 F と L はそれぞれ全トラヒックの合計要求帯域と合計許容遅延とした。

評価指標としては、帯域に関する満足度のユーザ平均

$$s_f = \frac{1}{N_u} \sum_{i \in \mathcal{N}_u} \frac{b_i^*}{r_{s,i}} \dots \dots \dots (2)$$

と遅延に関する満足度のユーザ平均

$$s_\ell = \frac{1}{N_u} \sum_{i \in \mathcal{N}_u} \left(1 - \frac{\ell_i^*}{\bar{\ell}_i}\right) \dots \dots \dots (3)$$

とする。 N_u はトラヒック数、 \mathcal{N}_u はトラヒックのインデックス、 b_i^* と ℓ_i^* は各トラヒックに割り当てられた帯域と経路の遅延を表す。

上記のシミュレーション条件に基づいて実施したシミュレーション結果を以下に示す。図5に各条件における帯域に関する満足度のユーザ平均を、図6に各条件における遅延に関する満足度のユーザ平均を示す。図5を見ると、どのパターンであってもトラヒック数が増加によって満足度の低下が見られる。これはトラヒック数が増加することによって、上限が決まっている衛星回線全体の帯域がひっ迫するためであると考えられる。さらに、マッピング方式2においては、各軌道傾斜角において衛星数の増加による満足度の増加が見られるが、一方でマッピング方式1では必ずしもこれが成り立っているわけではない。また、マッピング方式1とマッピング方式2を比較すると、NQIの種類が3から5に増加する、すなわち細かいマッピングによって満足度が増加していることがわかる。図6を見ると、マッピング方式1とマッピング方式2に大きな差はなく、トラヒック数が100の場合にのみ満足度の増加が見られる衛星パターンがあった。また、トラヒックの増加による満足度の低下は見られなかったため、この点については更なる検証が必要である。

以上の結果より、衛星数などの衛星インフラ設定とマッピング方式が帯域と遅延の満足度に与える影響の度合いを定量的に解析することができた。

4 おわりに

本稿では、提案している衛星地上接続システムにおける最適化フレームワークの概要について述べた。そのフレームワークに基づき、衛星数やトラヒック数を変えた複数のシナリオを対象とした帯域・経路の最適化シミュレーションの結果を示した。今後は5QI-NQIやNTNトラヒック-NTNスライスのマッピングの最適化に取り組む。また、提案した最適化フレームワークの実衛星を用いた実証の一環として、打上げ予定の技術試験衛星9号機(ETS-9)を用いた実証実験を推進する。

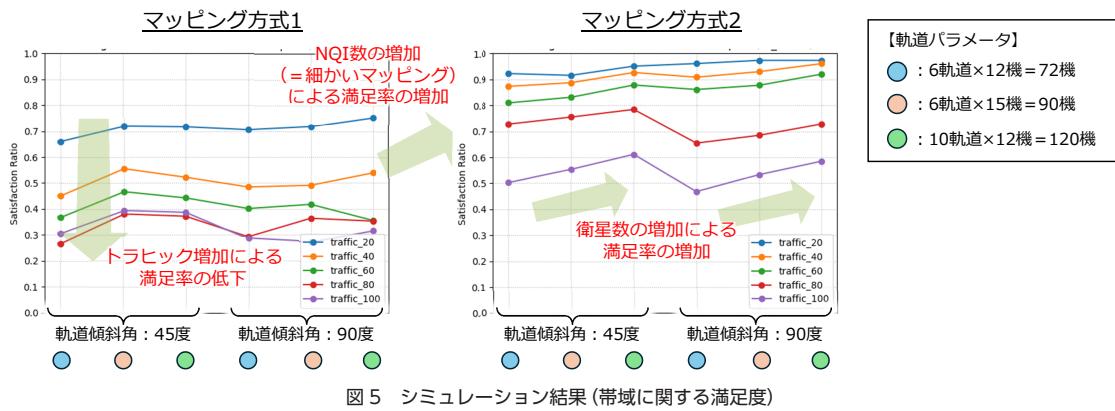


図5 シミュレーション結果(帯域に関する満足度)

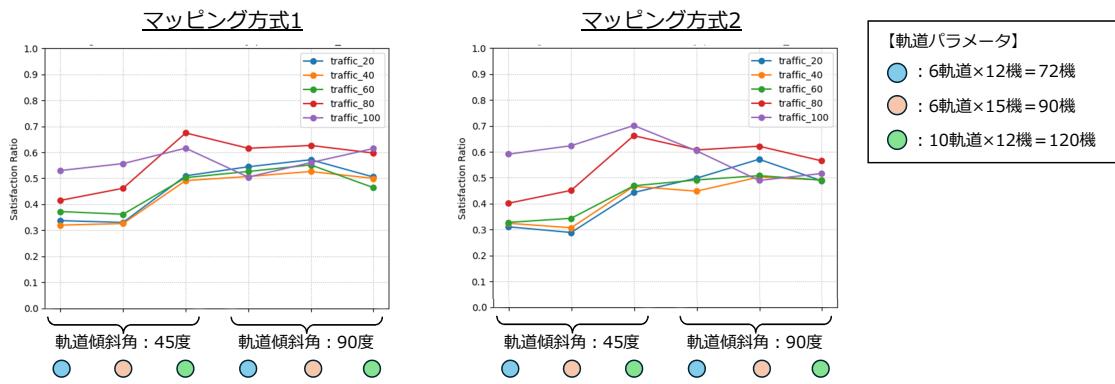


図6 シミュレーション結果(遅延に関する満足度)

謝辞

本研究は、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」で実施した。

【参考文献】

- 1 H. Al-Hraishawi, H. Chougrani, S. Kisseleff, E. Lagunas, and S. Chatzinotas, "A Survey on Non-geostationary Satellite Systems: The Communication Perspective," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol.25, no.1, pp.101–132, 2023.
- 2 C.T. Nguyen, Y.M. Saputra, N.V. Huynh, T.N. Nguyen, D.T. Hoang, and D.N. Nguyen, "Emerging Technologies for 6G Non-Terrestrial-Networks: From Academia to Industrial Applications," *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol.5, pp.3852–3885, 2024.
- 3 3GPP TS 23.501 V19.3.0 (2025-03), "System architecture for the 5G System (5GS); Stage 2 (Release 19)".
- 4 3GPP TR 22.822 V16.0.0 (2018-06), "Study on using Satellite Access in 5G; Stage 1 (Release 16)".
- 5 阿部 侑真, 関口 真理子, 三浦 周, "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－衛星地上連接システムにおけるネットワークスライシングの検討－," 2023年電子情報通信学会総合大会, 2023.
- 6 M. Sekiguchi, Y. Abe, A. Miura, and H. Tsuji, "A Study on Adopting Network Slicing to Multilayered Satellite and Terrestrial Interconnected Systems," 74th International Astronautical Congress (IAC2023), 2023.
- 7 Y. Abe, M. Sekiguchi, and A. Miura, "Management Methodology for Satellite-Terrestrial Interconnected Systems with Flexible Satellite Payloads," 73rd International Astronautical Congress (IAC2022), 2022.
- 8 阿部 侑真, 関口 真理子, 三浦 周, "5G-NTN システムにおけるQoS Identifierマッピングの評価," 電子情報通信学会技術研究報告, vol.125, no.127, pp.111-114, 2025.

9 Y. Abe, M. Ogura, H. Tsuji, A. Miura, and S. Adachi, "Resource and Network Management Framework for a Large-Scale Satellite Communications System," *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, vol.E103-A, no.2, pp.492–501, 2020.

10 Y. Abe, F. Ortiz, E. Lagunas, V. M. Baeza, S. Chatzinotas, and H. Tsuji, "Optimizing Satellite Network Infrastructure: A Joint Approach to Gateway Placement and Routing," 2024 IEEE 99th Vehicular Technology Conference (VTC2024-Spring), 2024.



阿部 侑真 (あべ ゆうま)

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、ネットワーク最適化、制御工学

【受賞歴】

2021年 第36回電気通信普及財団賞
テレコムシステム技術学生賞 入賞
2018年 2018年度計測自動制御学会 論文賞・
武田賞



関口 真理子 (せきぐち まりこ)

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

衛星通信



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