

2 Beyond 5G の要素技術

2 Elemental Technologies for Beyond 5G

2-1 Beyond 5G システムにおける非地上系ネットワーク統合

2-1 Non-Terrestrial Network Integration in Beyond 5G Systems

辻 宏之 ベド プラサド カフレ

TSUJI Hiroyuki and Ved Prasad KAFLE

1 はじめに

地上系ネットワーク (Terrestrial Network : TN) である第5世代移動通信システム (5G) で代表される移動通信システムが面的に展開する中、Beyond 5G (B5G) や第6世代移動通信システム (6G) の議論が始まっている。一方、ドローン (無人航空機)、高高度プラットフォーム局 (High Altitude Platform Station : HAPS)、非静止衛星による衛星コンステレーション計画の登場により海・空・宇宙などの移動体の非地上系ネットワーク (Non-Terrestrial Network : NTN) が注目されている。今後、B5G のネットワークでは、図1のように高度や通信特性がそれぞれ異なるプラットフォームを取り込み、地上、空、宇宙と海、海中、水中をシームレスにつなぐ高度な情報通信ネットワークが形成され、二次元から三次元へ拡張された新たなネットワークサービスが期待される [1]。このため、B5G を実現する

ための NTN を活用した新たな技術開発が重要となる。

宇宙通信システム研究室では、この NTN を実現するため、衛星においてはデジタル技術による電波のフレキシブルな利用を可能とする技術試験衛星 9 号機 (ETS-9) への通信ペイロードの開発、加えて光通信においては、ETS-9 への光ペイロードや超小型衛星にも搭載可能とする光通信用端末の開発を行っている。また、NTN においては、遅延時間や通信容量の異なる様々なプラットフォームを利用する。このため、これらを統合的に制御する必要があり、ネットワークスライシング等の技術を NTN に取り込み研究開発を行っている。一方、ネットワークアーキテクチャ研究室では、TN と NTN の両方のリソースを監視及び制御できる統合ネットワーク制御アーキテクチャ (Integrated Network Control Architecture : INCA) の研究、開発、標準化に取り組んでいる。提案するアーキテクチャには、アプリケーションサービスのサービス品質 (QoS)

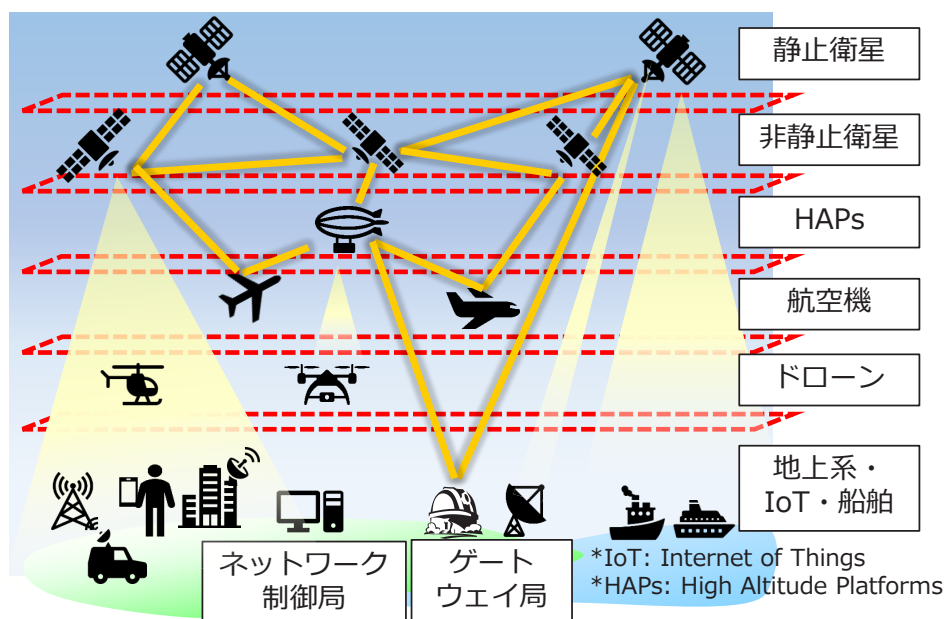


図1 B5G 時代の NTN を活用した三次元ネットワークのイメージ

要件に基づいて、TN リソースと NTN リソースの両方を使用してエンドツーエンド (E2E) ネットワークサービスの設計と展開をサポートする機能が含まれており、パフォーマンス・メトリックとリソース使用率の値を継続的に監視し、TN と NTN の両方のリソース調整機能を同時に制御できる機能を有する。

本章では、B5G を実現する NTN に関する NICT の最新の研究開発について述べる。

2 NTN におけるフレキシブル静止衛星の研究開発

現在、マルチビームにより通信容量の大容量化を実現するハイスループット衛星 (High Throughput Satellite : HTS) は、更なる需要増に対応した Very High Throughput Satellite (VHTS) と需要の変化に対応したフレキシブル HTS に進化している。VHTS では 1,000 ビーム級、Tbps 級の超マルチビーム衛星が既に開発されている [2]。一方、フレキシブル HTS では電気推進による軌道遷移への対応、オンボードプロセッサ、アクティブフェーズドアレイアンテナや Software Defined Radio (SDR) の導入が進められている。NICT においては、Ka 帯と光通信による衛星通信の大容量化とチャネライザ/デジタルビームフォーマ (DBF) 技術による衛星通信のデジタル化・フレキシブル化を目指したフレキシブル HTS 技術の実証を目的として ETS-9 の研究開発を進めている [3]。これらを実現するためには通信機器のデジタル化技術がキーとなる。例えば、図 2 に示すように DBF や衛星で利用

する周波数とビーム割当を柔軟に変更できるチャネライザによる通信リソース割当の変更 [4] や、SDR による軌道上でのアプリケーションの柔軟な変更が挙げられる。課題はデジタル通信機や RF フロントエンドの消費電力の低減である。さらに、デジタルトランスフォーメーション (DX) 化により開発方式の低コスト化や、システム・サービスのデジタル化を進めることも重要である。最近の状況と成果として、ETS-9 は現在 2025 年以降の打上げ予定であるが、ETS-9 に搭載する光通信機器は、静止軌道と地上間で 10 Gbps での光通信を実証する世界最速クラスの性能を持ち、ETS-9 搭載ビーコン送信機とともに製造・試験を完了した。この結果、衛星-地上間光通信の基盤技術確立に向けて衛星搭載用 10 Gbps 光通信機器・ビーコン送信機に関して開発段階を前進させている。

3 NTN における高高度プラットフォーム局 HAPS の研究開発

成層圏に滞空する無線局である HAPS を利用した通信システムの開発が世界的に活発化している。HAPS を利用すると、LEO 衛星よりも地球に近く低遅延かつ直接携帯電話との通信が可能であるため、移動通信システムの仕様の検討・策定を行っている団体 Third Generation Partnership Project (3GPP) において HAPS を含む NTN の標準化が進められている。具体的には 3GPP において、HAPS を国際移動通信 (IMT) の基地局として用いる High Altitude Platform Stations as IMT Base Stations (HIBS) に関して仕様化検討が進め

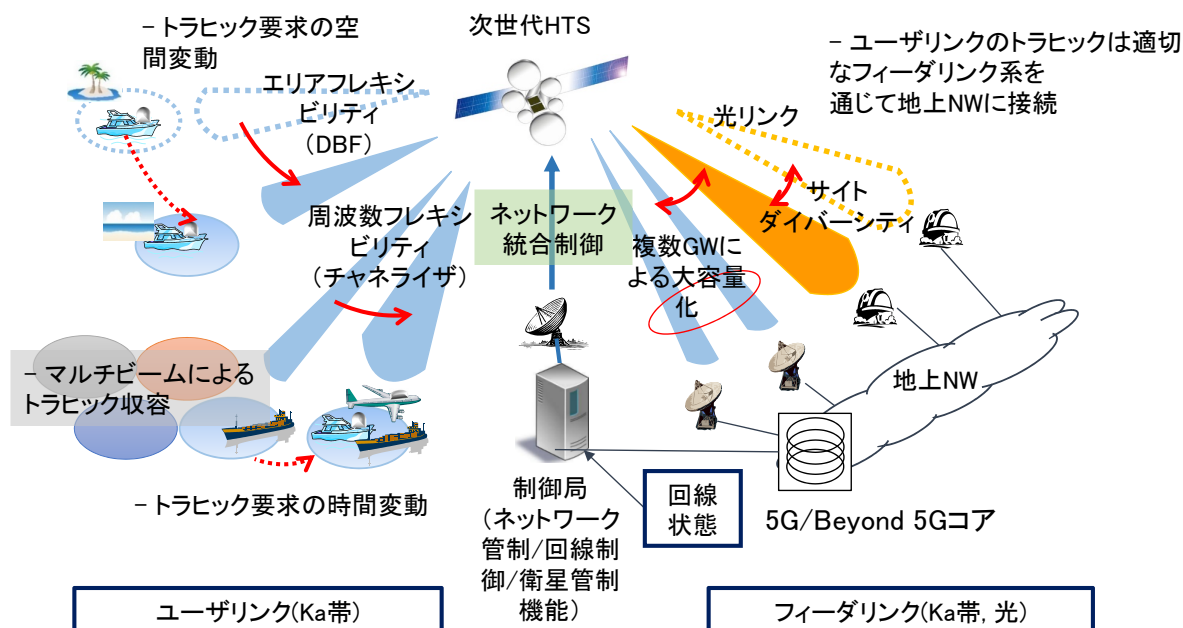


図 2 ETS-9 で実証を目指す次世代のフレキシブル HTS におけるキー技術

4 NTN における光衛星通信の研究開発

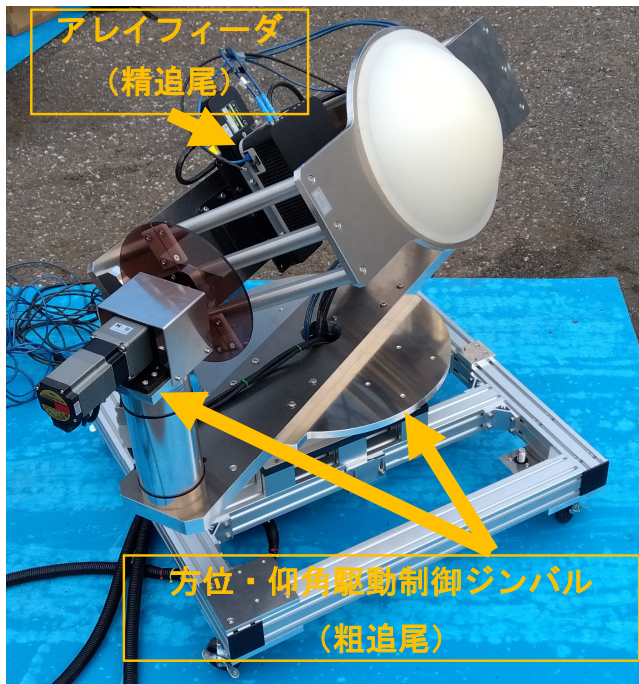


図3 HAPS 通信用ハイブリッド型追尾レンズアンテナシステムの外観

られている。また、2023 年に開催された国際電気通信連合 (ITU) の世界無線通信会議 (WRC-23) では、HIBS に 694-960 MHz 帯、1.8 GHz 帯、2.6 GHz 帯の追加の周波数が割当られるなど、国内外通信事業者が HAPS を使った新たなサービスを開発している [5][6]。

NICT では、HAPS に新たに割り当てられたミリ波帯周波数 (40 GHz 帯) を使った HAPS の地上局用追尾アンテナとして、レンズアンテナ付きの機械駆動ジンバルによる機械的な粗追尾機構と、精追尾を担うアレイフィーダ等載せた電子的な精追尾機構とを協調制御するハイブリッド型追尾レンズアンテナシステムを開発するとともに、HAPS の軌道を予測することで低消費電力化を実現できる新たな地上局用追尾アルゴリズムを開発した [7]。さらに、実環境にて追尾特性等の評価を行うため、開発した地上局を屋外に設置し、機上局を搭載した航空機を小金井／調布上空などで実飛行させて HAPS を想定した実証試験を行った [8]。この試験により、上空 5 km を約 400 km/h (成層圏を飛行する HAPS 速度と等価) で飛行する航空機に対して、粗追尾と精追尾の切り替え時にも追尾が途切れることのない十分な追尾性能を備えていることや、約 80 % の低消費電力化が達成されること等の結果を得た。これにより、成層圏を飛行する HAPS に対する地上局用追尾アンテナとして、NICT が開発したハイブリッド型追尾レンズアンテナシステム及び追尾アルゴリズムが有効であることが示せ、HAPS の制度化や社会実装に向けた議論を進展させることができた。

光衛星通信は基本的に免許が不要で超高速通信が可能であり、また衛星搭載機器の質量や消費電力を小さくできる等のメリットがある反面、光は大気ゆらぎや天候による影響を受けるという課題がある。このため既に光衛星通信は、大気の影響のない衛星間通信で、観測衛星-データ中継衛星間の通信等に実用化されている。一方、衛星-地上間のフィーダリンクへの適用については、大気ゆらぎの影響を緩和するため補償光学技術等の対策が必要であり、現在実証段階である。また、衛星-地上間通信については、LEO 衛星からの観測データ等の高速な直接ダウンリンク通信への利用が先行している。例として、SpaceX 社は、2023 年には 5,000 機以上の衛星を稼働させており、低軌道の大規模衛星コンステレーション計画「Starlink 計画」を進めているが、衛星間の光通信機能を搭載し、第 1 世代から 9,000 台の光通信機器を打ち上げており、200 Gbps の衛星間通信を軌道上実証している [9]。また、2022 年 5 月に打ち上げられた TBIRD は、6 U のキューブサットで 100 Gbps の光通信を実証し、将来の科学ミッションの変革をもたらす技術として期待されている [10]。このように、衛星コンステレーションなど衛星通信の多様化・大容量化への期待の高まりや周波数資源逼迫^{ひっばく}の解決に因るため、衛星-衛星間や衛星-地上間の光通信は今後重要な技術となる。

• NICT での光通信機器の研究開発

NICT では、1980 年代からレーザー光を用いた光衛星通信の研究を進めており、1994 年に打ち上げられた「きく 6 号」では、人工衛星と地上とで世界最初の双方向光伝送実験に成功し、2005 年に打ち上げられた「きらり」(OICETS) では、世界初の地上-低軌道衛星間でのレーザー通信実験 (伝送速度 50 Mbps) を実施するなど、これまで多くの成果を挙げている。近年では、高速通信の実現や通信インフラコストの低減等への期待から、NTN 用のプラットフォームであるドローン、HAPS、衛星などのマルチプラットフォームに搭載可能な汎用型超小型高速光通信機器の開発を進めており、民間事業者より関心が示されている。最近の成果の例として、図 4 に示す二つの汎用型小型光通信端末 (送受信端末 (FX: Full Transceiver) / 送信端末 (ST: Simple Transponder)) の開発を進め、FX/ST 光通信端末と開発した衛星搭載用 2 Tbps 超高速光通信モデルを用いて、追尾特性、追尾誤差、光学系特性及び通信特性 (1 ~ 10 Gbps) 及び将来市場予測を踏まえた通信速度 (100 Gbps ~ 2 Tbps) の実現性を示した [11]。また、ドローン／HAPS と地上間に加え、超小型衛星と地上間の高速光通信を実現するため、上記の汎用型

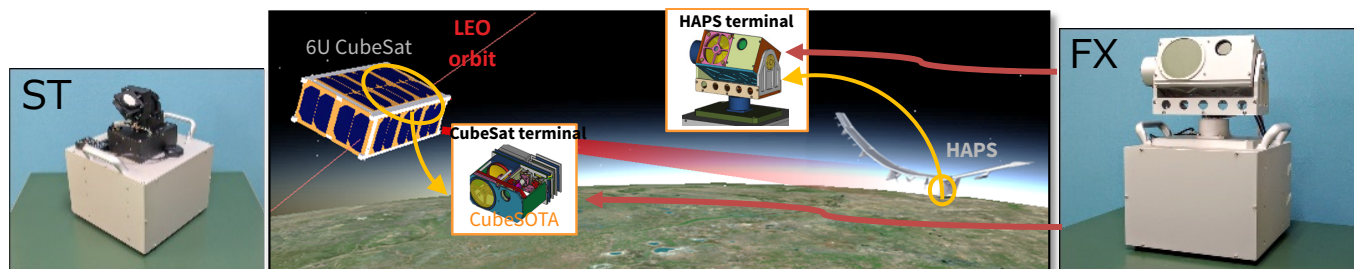


図4 超小型高速光通信機器 (FX/ST) と HAPS 及び 6 U キューブサット衛星への搭載イメージ



図5 NICT 本部 (小金井市) の口径 1 m (左) と口径 1.5 m (中央) 及び鹿島宇宙技術センター (鹿嶋市) の口径 2.05 m (右) の光アンテナ

FX 光通信端末をベースにし、これまでの宇宙開発の知見を活用し、低軌道 6 U キューブサット用光通信端末の設計及び製作を進めている。

・光地上局アンテナ技術

地上と衛星間で電波による通信とは異なり、宇宙と地上間の光通信には、衛星と地上で結ぶ微弱な光 (レーザー光) を光地上局の光アンテナ、いわゆる望遠鏡により送受信し、その光を衛星の位置に合わせて自動捕捉追尾する技術が必要となる。また、光衛星通信で利用する光地上局の望遠鏡は、天文用の望遠鏡と異なる性能が要求される。例えば天文用望遠鏡では地球の自転速度程度の追尾性能であればよいところ、光アンテナでは、LEO の衛星を追尾する必要がある。さらに地上から 36,000 km 離れた静止軌道衛星からの光を、髪の毛の約 10 分の 1 の光ファイバーに結合させるだけの高精度な追尾を行う必要がある。図 5 に、NICT で利用している口径 1 m 以上の反射型望遠鏡の光地上局を示す。これらの光地上局アンテナは、LEO 衛星や HAPS 等の移動体を追尾できる性能を有している。

・光地上局サイトダイバーシティ技術

地上-衛星間の光通信の課題の一つとして、雨や雲による通信断を回避する技術の開発が重要となっている。その解決方法として、雲のない場所と衛星間を切り替えて接続するサイトダイバーシティ技術がある。この技術の構築及び検証を行うため、NICT は沖縄、

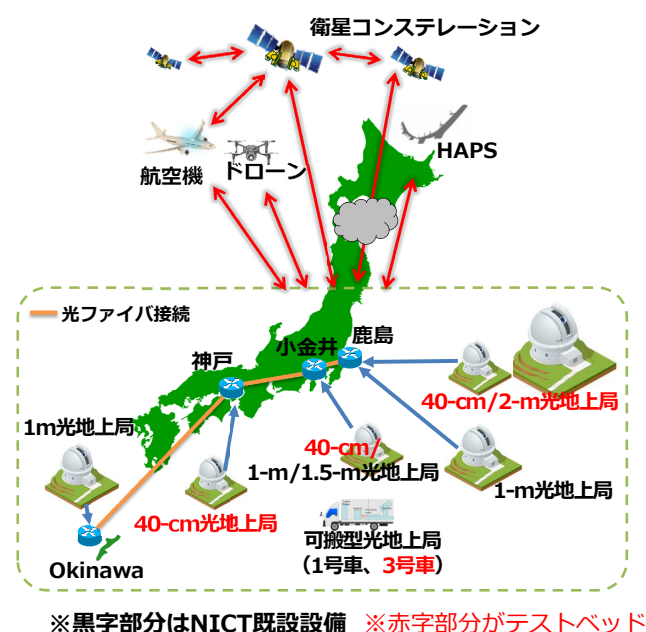


図6 光地上局サイトダイバーシティ技術を実現する光地上局テストベッド

神戸、小金井、鹿島の各 NICT 拠点の光地上局を高速ネットワークでつなぎ、光通信用サイトダイバーシティシステムを構築している (図 6)。2024 年 3 月には、サイトダイバーシティ技術の研究開発含め宇宙産業へ新規参入を目指す民間企業等との協創や共業できるように、衛星-地上間で数百 Gbps 以上の通信や深宇宙通

信との通信を実現するために必要となる 2.05 m 大型アンテナ光地上局（鹿島）と、衛星、HAPS、船舶など様々なプラットフォームとの光通信の検証が可能な 40 cm 小型アンテナ光地上局（小金井、鹿島、神戸）を 3 拠点に新規に整備し、テストベッドとして運用していくことを計画している。このテストベッドの光地上局間は 10 Gbps の高速光ファイバーネットワークで結



図 7 環境データ情報収集装置（沖縄）の外観

ばれており、テストベッド利用者が自ら通信用モデムや評価用測定機器を持ち込み光地上局の望遠鏡とつなげて収集したデータを専用ネットワークを介して集約することが可能である。また、テストベッド利用者のネットワークとは別に、望遠鏡制御専用ネットワークにて各拠点の光地上局の望遠鏡は遠隔操作できるよう構成されており、どこにいても集中制御可能となっている。今後、光地上局近くに設置されている可視光全天カメラ画像や雲高計などの情報を取得する環境データ情報収集装置（図 7）と合わせて、雲のない場所と衛星間を切り替えて光衛星通信を実現する NICT 独自のサイトダイバーシティ技術を開発し、日本の衛星光通信技術の発展に寄与すると期待される光通信テストベッドとしての運用を目指している。

・補償光学技術

地上と衛星間で光通信を行う際のもう一つの課題として、その経路に存在する大気による光信号の劣化がある。その劣化のうち大気の屈折率ゆらぎによる波面の乱れに対しては受信側で補正をすることが可能である。その補正技術は補償光学（Adaptive Optics：AO）と呼ばれる技術で、時々刻々変化する波面乱れの情報をリアルタイムに検知し、その情報をもとに可変形鏡や位相変調器などを制御することによって波面を整える技術である（図 8）。AO の技術は本来天文学の世界において大口径望遠鏡の性能を引き出すために成熟してきた技術であり、既にその効果は実証されている。一方、光通信の用途においては、光アンテナ（望遠鏡）によって集めた光を最終的に入射コアの直径が約

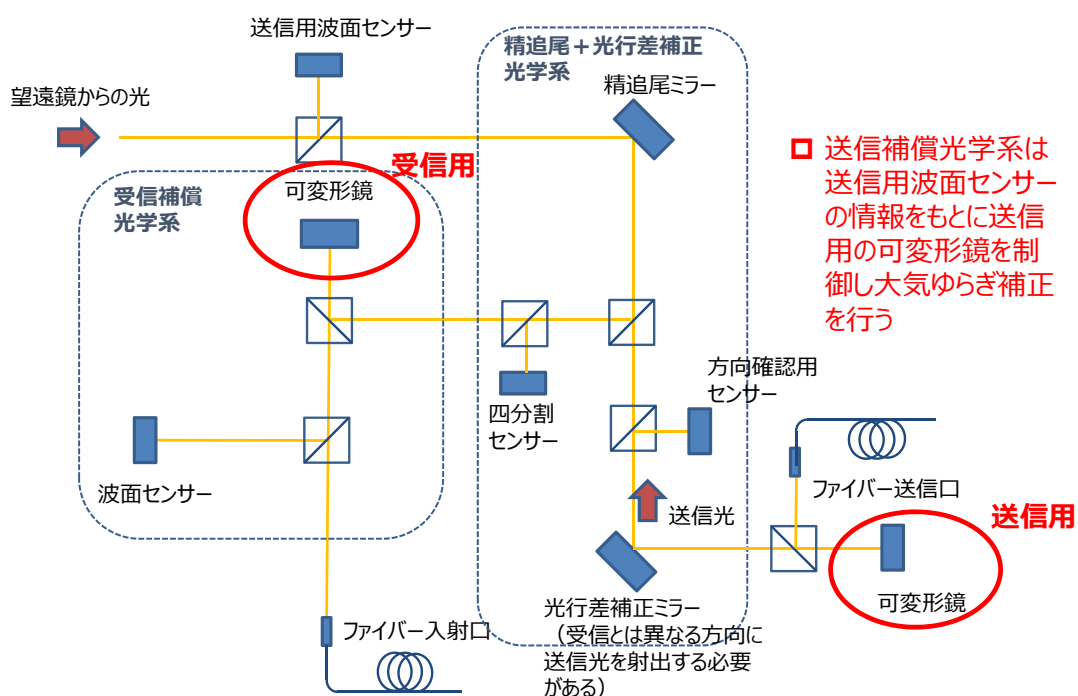


図 8 補償光学技術による波面補正

10 μm (髪の毛の約 10 分の 1) のシングルモードファイバー (SMF) への結合を維持する必要がある。その際、衛星方向の誤差による受信光の変動も AO の効果に影響するため、その追尾を行う精追尾光学系が果たす役割も大きくなる。また光通信では光アンテナ側から衛星に向けて送信を行う場合があるため、送信のための AO が必要になる。送信においては光が届くまでに衛星が移動してしまうことを考慮し、光行差補正という補正を行う必要もある。NICT では、空間光通信における大気ゆらぎの影響を除去するための補償光学系の研究を行い、いくつかの成果を得ている。例として、実際に大気ゆらぎの影響を受けたビームとして天体の光を使い、精追尾光学系と AO の共働を確立した上で、受信系と送信補償光学系での約 5 dB の効率改善を実現した。また、光データ中継衛星を活用した地上-静止衛星間光リンクにおいて、大気ゆらぎのコヒーレンス時間やフェード確率を実測するとともに、受光パワーの変動が確率密度分布 (対数正規-ベックマン分布) で統計的によく説明できることを解明し、光衛星通信における符号化や回線解析への設計指針となる成果を獲得している [12]。

5 NTN における三次元ネットワーク制御技術

図 1 に示す NTN を含む三次元ネットワークにおいては、様々なネットワークが連携することになるが、これらのネットワークは、ノード間距離による伝搬遅延の違い、スループットやロス率といった品質の違い、ノード移動によるリンク持続時間の違いなど様々なリンク品質の違いがある。また、再送制御や経路制御といった様々な通信プロトコルを管理する必要があるこ

とや、異なる事業者が運用するシステムが混在することもあり得る。このように、異なる特徴を持つ複数のネットワークを連携させ、ユーザ及び運用事業者の満足度を最大化するには、統合的なネットワーク制御が必要となる。ここで、ネットワーク制御には、どの NTN ノード同士を接続させるかを決めるトポロジ制御、どのような経路でデータを流すかを決める経路制御、デジタルチャネライザや DBF を搭載し、通信リソース量を動的に変更できる回線におけるリソース制御、提供アプリケーションに応じた QoS 制御、各 NTN ノードが接続する地上局を切り替えるサイトダイバーシティ、電波と光の回線の切替え制御など、複数種類の制御を含んでいる。この三次元ネットワークの実現に向け、NICT では主に以下の二つのプロジェクトを推進している。一つ目のプロジェクトとして NICT の高度通信・放送研究開発委託研究において、日本無線株式会社、スカパー JSAT 株式会社、東京大学の三機関と協力し、衛星地上統合に向け、Software Defined Networking (SDN)、Network Function Virtualization (NFV)、ネットワークスライシング、ネットワーク統合管理などの研究開発を進めている [13]。2022 年 1 月～2 月には、衛星 5G 統合制御に関する日欧共同実験 (図 9) を行い、静止衛星回線を含む、東京とベルリンの国際間長距離 5G ネットワークにおいて 5G 制御信号、4K 映像及び IoT データの伝送に成功した [14][15]。本実験により、衛星回線を含む日欧間の長距離回線で 5G 通信が成立することが示され、空や海または離島など、従来 5G の展開が困難であった場所に対して 5G ネットワークの早期普及が期待される。

二つ目のプロジェクトである総務省の電波資源拡大のための研究開発においては、NTN と TN を相互接続するためのシステム構成の検討や、リソース配分アル

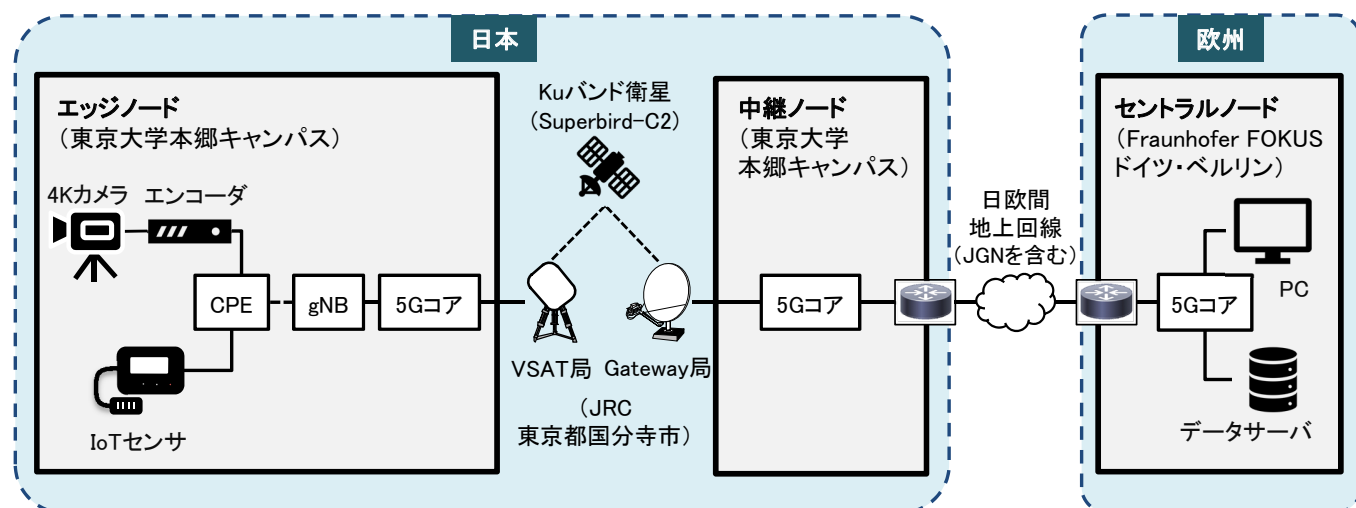


図 9 日欧共同実験で構築したテストベッドの構成

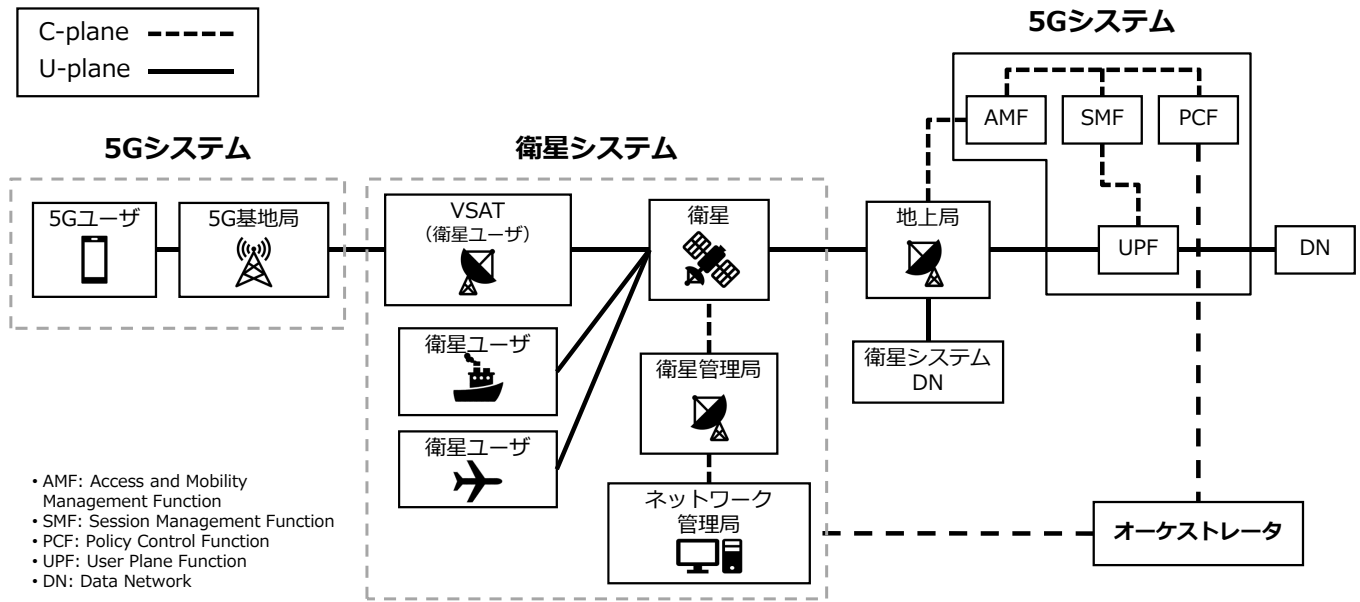


図10 衛星地上接続システムのシステム構成

ゴリズムの開発を行っている。NTNと地上系を相互に接続するためには、通信要求やリンク状態の時間的変動、NTNとTNの特性の違いなど解決すべき様々な問題がある。したがって、NTNと地上系のインターフェース機能やリソースの調整を行うオーケストレータを配置することを提案している(図10) [16]。オーケストレータは、限られたリソースをどのようにユーザに割り当てるかを決める管理機能を持ち、その結果に応じてNTNとTNが連携して動作する。また、衛星地上接続システムのシミュレータを開発し、提案アルゴリズムの有効性を評価している [17]。さらに、2025年度に打上げ予定の技術試験衛星9号機(ETS-9)を用い、軌道上の実証実験を計画している。実証実験においては、ETS-9を5Gのバックホール回線として利用し、5G端末、5G基地局、5Gコアを相互に接続する基本的な実験に加え、ETS-9のネットワーク管理局が5G側からのリソース要求に基づいてETS-9のリソース配分を決定し、デジタルチャネライザやDBFなどの搭載系を制御する実験を想定している。

6 B5GにおけるTNとNTNの統合制御の研究開発

NICTでは、TNとNTNを融合する新しいアーキテクチャ技術であるINCAの研究開発を進めている。図11に、INCAの機能コンポーネントとインターフェースを含む構造を示す。NICTは、ITU-T Study Group 13 [18]においてもこのINCAの標準化にも寄与している。このセクションでは、INCAの機能コンポーネントの概要と制御メッセージ(詳細は[18]を参

照)及びNICTで開発した実験システムにおける最近の実装状況について紹介する。

• アーキテクチャ機能コンポーネント

図11に示したINCAのアーキテクチャ機能コンポーネントについて、以下に簡単に説明する。

(a) 統合制御データサービス機能:

個々のネットワークセグメントから制御データを収集・管理(監視)しデータベースに格納する。監視データをタイムリーに更新し、データの一貫性を確保し、E2Eネットワーク状態分析機能に調整可能なレベルの粒度で提供する。

(b) アプリケーション要件分析機能:

ユーザとサービスプロバイダーの両方の期待値を評価する機能を含み、通常はインテントと呼ばれる抽象的なポリシーで表現される。これらのインテントは、E2Eネットワークステータス分析機能への入力としてシステム構成パラメータに変換される。

(c) E2Eネットワーク状態分析機能:

リソース使用率、パフォーマンス・メトリック及びアプリケーション要件に関連する制御データを分析して、リソース使用率とネットワークサービス品質のステータスを評価する。リソースが十分か、過剰か、最適に使用されているかなどを識別し、サービス品質が必要なレベルを満たしているかどうかを判断できる。さらに、リソース使用率の傾向を調べることで、将来のリソース需要と期待されるパフォーマンス品質を予測できる。

(d) E2Eリソースの割り当て、管理、最適化機能:

E2Eネットワークの状態分析機能が提供するE2Eネットワークリソースの使用状況とパフォーマンス

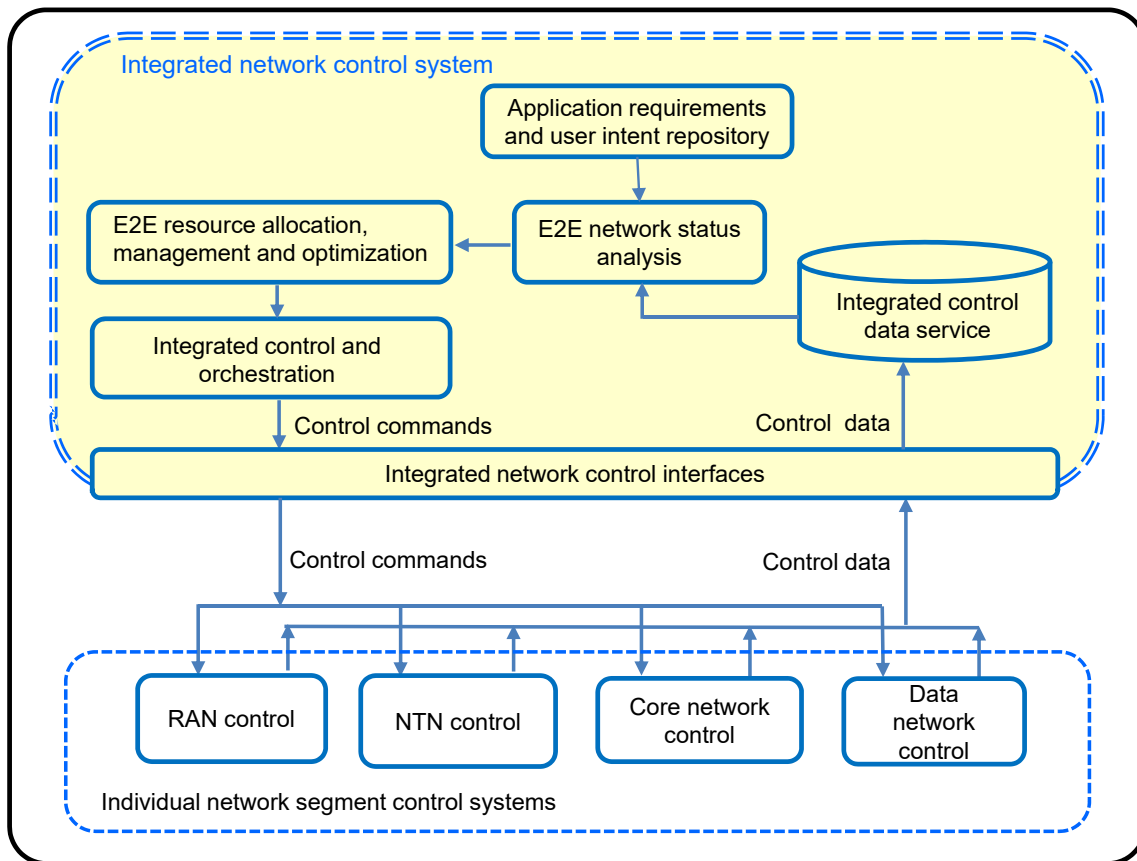


図 11 TN-NTN 統合ネットワーク制御アーキテクチャ (INCA)

分析に基づいて、E2E リソースの割り当て、管理及び最適化機能は、リソース制御のための最適な決定を行う。これらの決定には、様々なネットワークセグメントに割り当てられたリソースを調整するリソース制御パラメータの生成が含まれる。仮想化されたクラウドプラットフォーム上に設定されたデータネットワーク (DN) は、より多くの計算リソース (仮想マシン、CPU、GPU、メモリなど) とストレージリソースを必要とする可能性がある。たとえば、ネットワークセグメントが異なれば、リソースの種類も異なり、NTN の場合には、気象条件やユーザのトラフィック需要の変化により、フィーダリンクとサービスリンクのためにより多くの無線スペクトル帯域幅を必要とするか、無線リンクを空き空間光リンクに置き換えることなどが考慮される。

(e) 統合制御及びオーケストレーション機能:

E2E ネットワークサービスに参与する各ネットワークセグメントの適切なリソース制御パラメータを含むリストまたは構成ファイルを作成することにより、ネットワーク制御の決定を行う。これらのパラメータリストは、統合されたネットワーク制御インターフェースを介して、個々のネットワークセグメントの制御システムに送信される。

上記の統合ネットワーク制御アーキテクチャ機能

は、インターフェースを介して、アクセスネットワーク、NTN、コアネットワーク、DN などの個々のネットワークセグメントのネットワーク制御システムと相互作用を行う。これらのインターフェースは、個々のネットワークコントローラからの制御データの収集と、それらへの制御パラメータの送信を容易にする。

• 個別ネットワークセグメント制御システム

TN-NTN 統合ネットワーク制御システムアーキテクチャは、個々のネットワーク制御システムが統合ネットワーク制御アーキテクチャと同様の機能コンポーネントを持つことを前提としている。主な違いは、各機能の範囲が E2E ネットワークサービスではなく、特定のネットワークセグメントに限定されていることである。個々のネットワーク制御システムには、内部と外部の二つのインターフェースセットがある。内部インターフェースは、物理的または機能的なネットワーク要素から、様々な粒度と時間スケールで監視データを収集する。外部インターフェースは、統合ネットワーク制御インターフェースに接続して、監視データを提供し、制御パラメータを受信する。

• シグナリングメッセージフロー制御

ITU-T Y.3207 [18] は、INCA の二つの主要な機能を実現するための制御シグナリングメッセージフローのシーケンスを説明している。

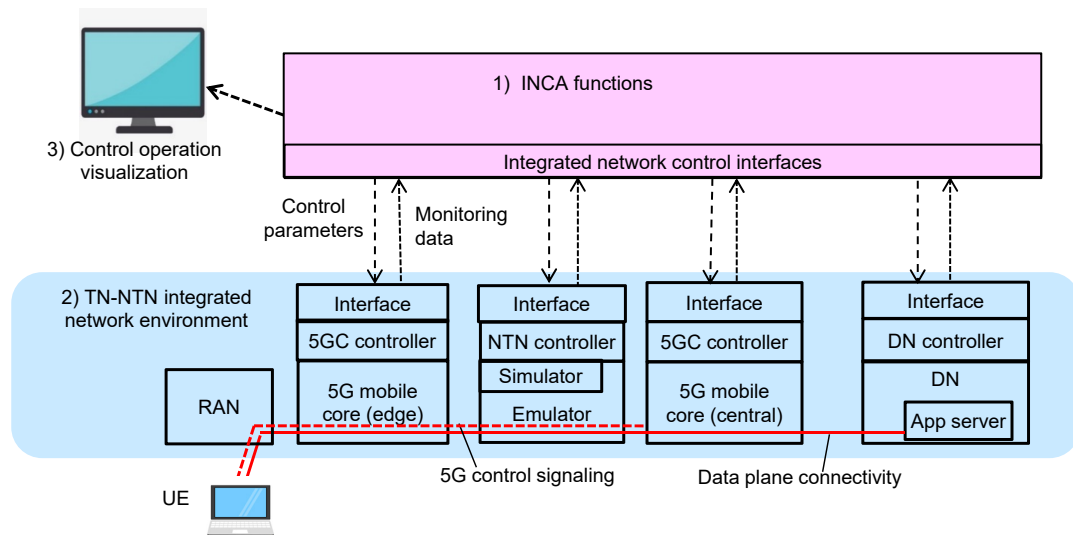


図 12 INCA 実験システムのレイアウト

(a) TN セグメントと NTN セグメントにまたがるネットワークサービスを、QoS 要件に基づいて構築する。

(b) パフォーマンスを監視し、リソースを制御して、ユーザ数やトラフィック需要の変化などのネットワーク条件の変動があっても QoS を維持する。

これらのメッセージシーケンスを実験システムに組み込んでいる。この詳細については、文献 [19] を参照して確認していただきたい。

• 機能検証・実証実験システム

図 12 は、NICT で開発した実験システムのレイアウトを示している。この実験システムにより、TN と NTN の両方のネットワークリソースの使用状況を監視及び制御し、ネットワークトラフィックとサービス需要の変動にかかわらず貫した QoS を維持する INCA の能力を実証することができる。実験システムは、(1) INCA の機能と統合ネットワーク制御インターフェース、(2) TN-NTN 統合ネットワーク環境、(3) 制御操作可視化ツールの三つのブロックで構成されている。以下に各ブロックの機能を説明する。

• INCA の機能と統合ネットワーク制御インターフェース

INCA の関数は、統合ネットワーク制御アーキテクチャの関数、インターフェース、制御メッセージフローを Python プログラミング言語で実装されている。統合ネットワーク制御インターフェースは、Representational State Transfer (RST) を満たす (RESTful) アプリケーション・プログラム・インターフェース (API) を使用して、個々のネットワーク・セグメントのコントローラと通信している。制御パラメータは、構造化データやオブジェクトを文字列に直列化するためのデータ形式の一種である YAML や

JavaScript Object Notation (JSON) などの標準形式で交換される。

• TN-NTN 統合ネットワーク環境

TN-NTN 統合ネットワーク環境には、5G Radio Access Network (5G RAN) 機能、5th Generation Core network (5GC) 機能、NTN シミュレータ/エミュレータ、DN が含まれる。5G RAN は UERANSIM [20] をベースとし、5GC ネットワーク機能は free 5GC [21] をベースとしている。5GC ネットワーク機能には、コントロールプレーンのアクセス及びモビリティ管理機能 (AMF)、セッション管理機能 (SMF)、ポリシー制御機能 (PCF)、ネットワークエクスポージャー機能 (NEF)、ネットワークリポジトリ機能 (NRF)、データプレーンのユーザプレーン機能 (UPF) などのいくつかの機能が含まれる。NTN は、コントロールプレーンに衛星ネットワークシミュレータ、データプレーンに NTN の帯域幅、遅延、ジッタ、損失率のエミュレータで構成しており、いずれもネットワークアーキテクチャ研究室で開発している。本実験システムでは、5GC ネットワーク機能を 5GC (セントラル) と 5GC (エッジ) の二つのグループに分け、その間に NTN を挿入する。AMF と SMF は 5GC (エッジ) にあり、残りのコントロールプレーンネットワーク機能は 5GC (中央) にある。UPF は、5GC (エッジ) と 5GC (中央) の両方にある。DN は OpenStack プラットフォームで設定され、そのコンポーネントはオープンソースの MANO [22] によって管理される。DN には、三つの異なる品質のビデオファイルをストリーミングするために仮想マシン (VM) にインストールされた MPEG-DASH モジュールで構成されたビデオアプリケーションサーバーが含まれている。ビデオクライアントプログラムまたはプレーヤは、ユーザ機器 (UE) にイ

インストールされる。ノートパソコンは、UERANSIMソフトウェアのUEモジュールをインストールすることでUEとして動作させるのに使用する。UEの映像クライアントプログラムは、DNにあるアプリケーションサーバからアクセスし、5GC(セントラル)、NTN、5GC(エッジ)、5G RANを介して送信されたデータを受信した後、画面上で映像を再生する。すべてのセグメント(RANを想定)には、リソース使用率とパフォーマンス・メトリックを含む制御データを収集し、リソース制御コマンドを実行するそれぞれのコントローラがある。これらのコントローラについて、ここでは詳しく説明しない。パフォーマンス・メトリックには、制御メッセージのフロー、様々な機能コンポーネントの計算リソースと帯域幅リソースの使用率、アプリケーションのQoSメトリックを実証するための視覚化ツールも含まれている。

上記の実験システムは、現在NICT本部にあり、今年度にはNICTテストベッドのB5Gテストベッドモバイル環境にも拡張する予定である。

7 NTN と B5G の連携に向けた取組

国内のいくつかの移動通信事業者は、HAPSやLEOコンステレーションを使った通信サービスの開発を進めている。また、HAPSや静止／非静止衛星を統合したコンピューティング・ネットワーク構想も提案され、

サービスの提供を目指している[23]。さらに、日本版LEOコンステレーションの実現に向けてB5G研究開発促進事業による小型衛星コンステレーション実現に向けた次世代ネットワーク要素技術の研究開発が開始され、経済産業省でも光通信等の衛星コンステレーションでの宇宙実証の研究開発構想が出されている[24]。一方、日本では2019年から衛星やNTNと5G/B5Gの連携に向けた独自の取組が進められていて、2020年にはNICTの働きかけにより宇宙ICTの民間コミュニティの場として「スペースICT推進フォーラム」が設立され、その下でB5GにおけるNTNや光通信の仕様や標準化、実証実験、実用化への寄与等について議論されている[25]。NICTは、スペースICT推進フォーラム及びその下の二つの分科会の運営を行い、この分野の連携強化・異分野連携・新アイデア創出・を強力に促進し、標準化への入力、会員による委託研究獲得、テストベッド検討、学会での発信等を実施している。2023年度では、会員以外にも公開のスペースICT推進シンポジウムの開催し、複数回にわたる検討会・交流会の開催や衛星5G/Beyond 5G連携技術分科会及び光通信技術分科会を開催するなど、国内コミュニティを拡大し、社会実装に向け異分野連携を促進している。

8 まとめ

B5Gの時代には、図13のように三次元のネットワー

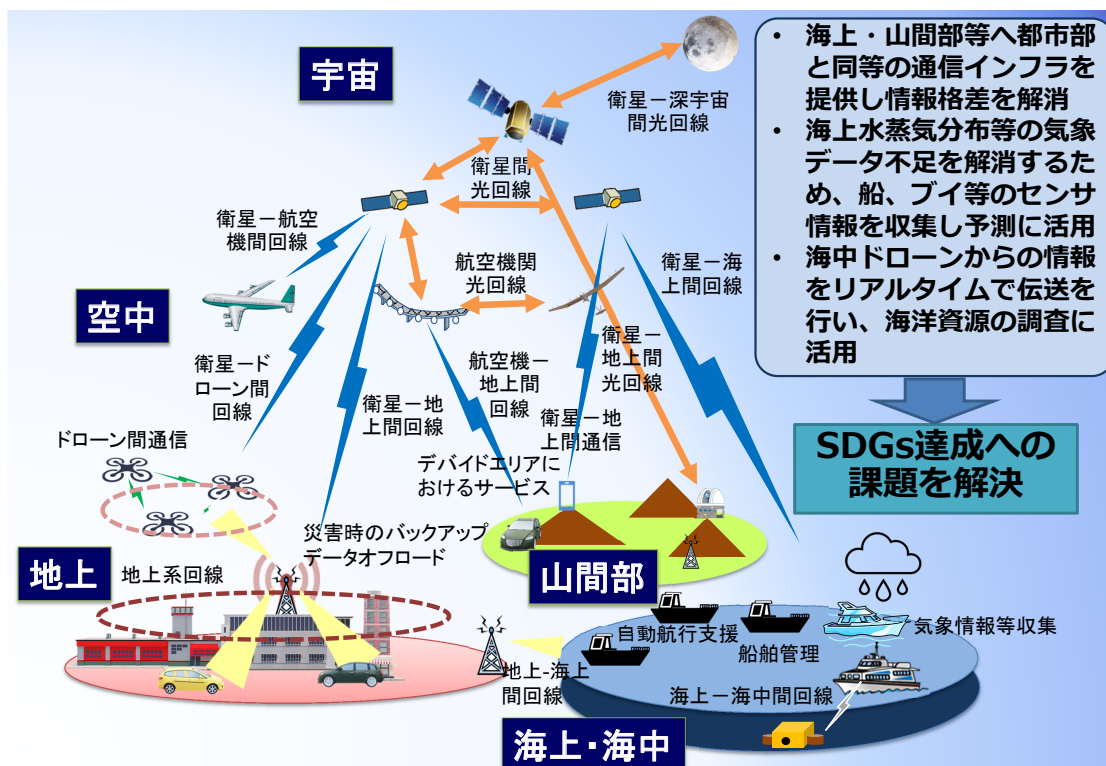


図13 NTNを活用したネットワークの将来像

クを構築し、通信エリアを地上から海、空中、宇宙へ拡大することにより、情報格差の解消・環境情報の収集・資源探査への利用等が期待できSDGs 達成に貢献できると考えている。B5Gの実現に向けてNTNは重要な役割を担っていると考えられ、これを実現するためには、LEO コンステレーションのようなハード面での実用化とともに、TNとNTNが相互接続し統合されていくことを考えると、NTNとTNの性能差による課題を解決する必要がある。この解決には、無線技術、デジタル化技術、光技術、ネットワーク制御技術が鍵となると考えており、これに向けてNICTでは、新たな衛星(ETS-9)への通信ペイロードの開発、加えて先端の衛星光通信として、ETS-9への光ペイロードや超小型衛星にも搭載可能とする光通信用端末の開発を行っている。また、NTNにおけるネットワーク制御技術として、ネットワークスライシング等の技術をNTNに取り込む、TNとNTNの統合制御技術など様々な研究開発を行っており、様々な異種ネットワークが一つになり、いつでも、どこでも、どんなときでもつながる通信ネットワークの実現を目指している。

【参考文献】

- 1 豊嶋守生, 阿部侑真, コレフ デミタル, 辻 宏之, 久保岡俊宏, 三浦 周, “超スマート社会における ICT × 宇宙通信,” 電子情報通信学会誌, vol.104, no.5, pp.453-462, May 2021.
- 2 Viasat 報道発表資料 (2022 年 10 月): <https://news.viasat.com/viasat-3-satellite-completes-mechanical-environmental-testing>
- 3 三浦 周, 久保岡俊宏, 坂井栄一, “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.1089-1084, Dec.2019.
- 4 三浦 周, 森川栄久, 吉村直子, 高橋卓, 布施哲治, 久保岡俊宏, 辻 宏之, 豊嶋守生, “技術試験衛星 9 号機通信ミッションの概要,” 第 66 回宇宙科学技術連合講演会, JSASS-2022-4080, Nov. 2022.
- 5 総務省技術戦略委員会説明資料 (2022 年 1 月): https://www.soumu.go.jp/main_content/000790343.pdf
- 6 NTT ドコモ報道発表資料 (2022 年 1 月): https://www.docomo.ne.jp/info/news_release/2022/01/17_01.html
- 7 G. Ohtsuru, H. Tsuji, R. Miura, J. Suzuki, Y. Kishiyama, “Efficient Antenna Tracking Algorithm for HAPS Ground Station in Millimeter-Wave,” Proc. of 2022 25th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications, pp.261-266, 2022.
- 8 国立研究開発法人情報通信研究機構報道発表: <https://www.nict.go.jp/press/2024/05/28-1.html>
- 9 Starlink 公式ページ: <https://www.starlink.com/jp>
- 10 C. M. Schieler, K. M. Riesing, B. C. Bilyeu, B. S. Robinson, J. P. Wang, W. T. Roberts, and S. Piazzolla, “TBIRD 200-Gbps CubeSat Downlink: System Architecture and Mission Plan,” 2022 IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS), pp.181-185, 2022.
- 11 D. R. Kolev, A. Carrasco-Casado, P. V. Trinh, K. Shiratama, F. Ishola, H. Kotake, J. Nakazono, Y. Saito, H. Kunimori, T. Kubooka, H. Tsuji, and M. Toyoshima, “Latest Developments in the Field of Optical Communications for Small Satellites and Beyond,” IEEE Journal of JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, vol.41, no.12, June 15, 2023.
- 12 H. Kotake, Y. Abe, D.R. Kolev, Y. Saito, Y. Takahashi, T. Fuse, Y. Satoh, T. Itahashi, S. Yamanaka, H. Tsuji, and M. Toyoshima, “Experimental Analysis of Atmospheric Channel model with Misalignment Fading for GEO Satellite-to-Ground Optical Links Using “LUCAS” Onboard Optical Data Relay Satellite,” Optica Optics Express, vol.31, no.13, pp.21351-21366, June 2023.
- 13 NICT ウェブサイト: Beyond 5G における衛星-地上統合技術の研究開発, https://www2.nict.go.jp/spacelab/pj_stit.html
- 14 NICT プレスリリース: 国際間長距離 5G ネットワークにおいて衛星回線を統合する日欧共同実験に成功, 2022 年 6 月 8 日: <https://www.nict.go.jp/press/2022/06/08-1.html>
- 15 K. Saito, D. Haraguchi, T. Miyashita, N. Setoguchi, R. Atsumi, K. Yoshida, S. Aso, M. Tsuji, K. Ishida, N. Fukumoto, P. Du, A. Nakao, Y. Abe, M. Sekiguchi, M. Tsuchiya, A. Miura, B. Riemer, M. Corici, A. Kapovits, and M. Guta, “Evaluation of Network Performance for 4K Video Streaming with Satellite and 5G interconnection in Japan-Europe Joint Experiment,” 39th International Communications Satellite Systems Conference (ICSSC), 2022.
- 16 M. Sekiguchi, A. Miura, Y. Abe, G. Otsuru, E. Morikawa, N. Yoshimura, T. Takahashi, T. Kubo-oka, T. Fuse, H. Tsuji, and M. Toyoshima, “A Study on Satellite-Terrestrial Cooperation System as A Part of Research and Development of Ka-Band Satellite Communication Control for Various Use Cases,” 24th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC), 2021.
- 17 Y. Abe, M. Sekiguchi, and A. Miura, “Management Methodology for Satellite-Terrestrial Interconnected Systems with Flexible Satellite Payloads,” International Astronautical Congress (IAC), 2022.
- 18 Recommendation ITU-T Y.3207 (2024), Fixed, mobile and satellite convergence – Integrated network control architecture framework for IMT-2020 networks and beyond.
- 19 V.P. Kafle, M. Sekiguchi, H. Asaeda, and H. Harai, “Integrated network control architecture for terrestrial and non-terrestrial network convergence,” IEEE Commun. Standards Mag., vol.8, no.1, pp.12-19, March 2024.
- 20 UERANSIM: <https://github.com/aligungr/UERANSIM>
- 21 free5GC: <https://free5gc.org>
- 22 OSM: <https://osm.etsi.org/>
- 23 総務省技術戦略委員会説明資料 (2022 年 1 月): https://www.soumu.go.jp/main_content/000790343.pdf
- 24 NEDO 資料 (2022 年 12 月): https://www.nedo.go.jp/koubo/SM2_100001_00036.html
- 25 スペース ICT 推進フォーラム: <https://spif.nict.go.jp/>



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
室長
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



Ved Prasad KAFLE (ベド プラサド カフレ)

Research Manager,
Network Architecture Laboratory,
Network Research Institute
Ph.D.
Network Architecture,
Beyond 5G or 6G Networks
【受賞歴】
2023 年 情報通信技術賞(TTC会長表彰)
Information and Communication
Technology Award (TTC
President's Commendation)
2020 年 Best Paper Award (First prize),
ITU Kaleidoscope Academic
Conference 2020
2017 年 Accomplishment Award, The ITU
Association of Japan