

＜基本計画書＞

低軌道衛星と地上端末直接通信における周波数共用を可能とする ナローマルチビーム形成技術の研究開発

1. 目的

今日、携帯電話は基礎的な通信インフラとして国民に広く利用されており、その人口カバー率はおおむね 99.9%に達している。一方で、面積カバー率はおおむね6割、グローバルに広く利用されているS帯(1.5-4GHz帯)については2～3割(令和5年3月時点)にとどまっており、社会経済活動における携帯電話の役割が拡大していく中で、携帯電話ネットワークがカバーされていない地域における通信手段の確保は利用者の利便性の観点からだけでなく、安心・安全の観点からも課題となっている。また、デジタル技術の活用によって地方活性化を加速する「デジタル田園都市国家構想」の実現においても、日本全国をあまねくカバーする通信インフラは必要不可欠である。

このような背景から、離島、海上、山間部等を効率的にカバーするとともに、自然災害をはじめとする非常時等においては、携帯電話等の地上系ネットワークをバックアップする非地上系のネットワークが注目を集めており、その推進は政府戦略においても重要な課題と位置付けられている。非地上系ネットワーク(NTN: Non-Terrestrial Network)は、衛星通信システム、HAPS(高高度プラットフォーム)、UAV(無人航空機)等を相補的に組み合わせて基地局や中継局として用いることで、地域の通信需要に応じつつ通信カバレッジの拡大を図るものであるが、これらの様々な通信プラットフォームの中でも、衛星通信システムは、広い通信エリアを確保できる、滞空時間等の制限がない等の特長を有していることから、非地上系ネットワークを構築していく上で柱となるものである。

衛星通信は、従前から航空や海上における主要な通信手段であったが、近年、低軌道に多数の衛星を打ち上げて一体的に運用する「衛星コンステレーション」が登場したことで地上系ネットワークのブロードバンドに匹敵する高速大容量通信が可能になったことから、地上系ネットワークを補完する存在としてその重要性が高まっている。特に、スマートフォン等の地上端末による衛星との直接通信は、専用の端末を必要とせずに衛星通信の利用が可能となることから、携帯電話の通信エリアを全土に拡張する手段として各国・地域で実用化に向けた検討が始まっているところである。

一方で、スマートフォン等の地上端末と衛星の直接通信を実現するためには、地上の携帯電話ネットワークと衛星通信ネットワークで周波数を共用しつつ、それぞれのネットワークが形成する通信エリア間で干渉が発生しないよう、衛星から発射する電波をきめ細やかに制御する必要がある。また、携帯電話の利用者が衛星通信を円滑に利用(地上基地局と同程度の通信速度や接続数を実現)するためには、衛

星のアンテナの実効開口面積を拡大してアンテナ利得を大幅に向上させるとともに、衛星の通信エリア（フットプリント）を地上基地局の通信エリア（セル）と同等のサイズ（直径 10km 程度）に縮小しつつ複数の電波（ナローマルチビーム）を同時に発射することで広範囲をカバーし、周波数の空間利用効率の向上を図る必要がある。

このため、本研究開発では、地球を周回する低軌道上に実効開口面積が数百 m^2 （直径 25～100m）以上となる大口径のフェーズドアレイアンテナを複数のアンテナ素子を組み合わせることで仮想的に構築することにより、従来のアンテナ構造では実現が不可能な地上の携帯電話ネットワークと同等の通信速度及び接続数で、スマートフォン等の地上端末から衛星との直接通信を可能とする技術を確立することを目的とする。

2. 政策的位置付け

(1) 新しい資本主義のグランドデザイン及び実行計画 2023 改訂版（令和 5 年 6 月 16 日閣議決定）

デジタルトランスフォーメーションを支えるポスト 5 G、6 G の実現に向け、「衛星通信や、HAPS（高高度プラットフォーム）を活用した成層圏からの通信により、従来のネットワークが届かない空、海、離島、山間部等も含めて広範囲の通信を可能とする非地上系ネットワーク（NTN）の早期実装を図るため、研究開発の加速化、実用化、海外展開を促進する」とされている。

(2) 宇宙基本計画（令和 5 年 6 月 13 日閣議決定）

国土強靱化・地球規模課題への対応とイノベーションの実現に向け、「陸・海・空さらには宇宙をシームレスにつなぐために、我が国が非地上系ネットワーク（NTN）を世界に先駆けて開発・実装・利活用を一体的に進めていく。それにより、現在ネットワークが整備されていない遠隔地に加え、ドローンや空飛ぶ車等の飛行体への通信サービスの提供など多様な通信サービスの実現や、地政学リスクや災害リスクに備えた強靱なネットワークの実現を目指していく」とされ、これらを実現する上で基盤となる技術として「NTN 関係の技術」が掲げられ、「関連する国産の技術開発・実証（中略）を強力に推進し、必要な海外展開支援も実施していく」とされている。

また、「非地上系ネットワーク（NTN）は、離島、海上、山間部等の効率的なカバーや自然災害を始めとする非常時等に備えたネットワークの冗長性の確保に有用である」として「関連技術の開発・実証支援を推進するとともに、関連する制度整備を進めるなど、サービスの導入促進のための取組を推進する」とされている。

(3) 国土強靱化基本計画（令和 5 年 7 月 28 日閣議決定）

国土強靱化の推進方針の一つとして、「衛星通信等の非地上系ネットワーク

(NTN) を含む多様な通信手段の確保」が掲げられている。

- (4) デジタル田園都市国家インフラ整備計画(改訂版)(令和5年4月25日総務省)
 デジタル田園都市国家の実現に資するインフラ整備の整備方針として、「ITU(国際電気通信連合)が定めるRR(無線通信規則)に基づく国際周波数調整を通じ、他国との調和を図りつつ、我が国の衛星通信網の周波数の確保に取り組むとともに、携帯電話との直接通信等の新たなサービスについて、他システムとの周波数共用や国際的な動向を踏まえつつ、その円滑な導入のために必要な制度整備を進める。また、将来の我が国独自の通信衛星コンステレーションの構築に向け、宇宙安全保障構想や宇宙基本計画など政府全体の方針を踏まえ、今後展開が見込まれるサービスコンセプト及びそれを支えるための通信技術について調査・検討を行い、それらに基づき、構築に向けた事業を計画する民間の取組への支援の検討を進める。」が示されている。

3. 目標

スマートフォン等の地上端末と複数の低軌道衛星によって構成される衛星通信ネットワーク(衛星コンステレーション)の間の衛星通信について、地上の携帯電話ネットワークと衛星通信ネットワークで周波数を共用しつつ、地上の携帯電話ネットワークと同等の通信速度及び接続数で、スマートフォン等の地上端末から衛星と直接通信を行うことを可能とする。また、これにより、携帯電話ネットワークと衛星通信ネットワークの異なるネットワークに同一の周波数帯の割当てを実現するとともに、空間を高密度に分割して通信エリアをきめ細やかに調整することで、同一の領域内における周波数の空間利用効率を2倍以上とし、周波数の有効利用を促進する。

なお、対象とする周波数帯は、主に携帯電話の周波数としてグローバルに使用されているS帯とし、通信方式は周波数分割複信方式(FDD: Frequency Division Duplex)とする。

4. 研究開発内容

(1) 概要

宇宙空間において複数のアンテナ素子(10,000個以上)を組み合わせることで、地球を周回する低軌道上に大口径のフェーズドアレイアンテナ(直径25~100m、実効開口面積が数百 m^2 以上)を仮想的に構築【技術課題ア】し、各アンテナ素子の搬送波の周波数、振幅、位相等を制御することで任意の方向や範囲に対して複数の電波(ナローマルチビーム)を送受【技術課題イ】することで、地上系と衛星系のネットワークで周波数を共用し、スマートフォン等の地上端末が地上の携帯電話ネットワークと同等の通信速度及び接続数で衛星との直接通信を行うことを可能とする。また、各アンテナ素子は位相等に誤差を含むことから、自動的にキャリブレーションを行う仕組みも併せて構築【技術課題ウ】する。

(2) 技術課題および到達目標

技術課題

ア アンテナ素子再構成技術

複数のアンテナ素子を組み合わせて大口径のフェーズドアレイアンテナを仮想的に構築するとともに、地上の携帯電話ネットワークの状況等に応じてアンテナ素子を搭載した超小型衛星の位置・姿勢等を制御してフェーズドアレイアンテナを再構成することにより、地上系ネットワークとの周波数の共用を可能とするアンテナ素子再構成技術を確立する。

(アー 1) 仮想フェーズドアレイアンテナ構築技術

スマートフォン等の地上端末による衛星との直接通信においては、通信速度の向上は衛星のアンテナの高利得化、同時接続数の増加は衛星が形成するフットプリントの縮小が不可欠であり、いずれも従来の衛星では物理的に実現が困難な数百 m^2 以上（直径 25～100m 程度）の実効開口面積を有するアンテナが必要となる。このため、複数のアンテナ素子を組み合わせて大口径のアンテナを構築することとし、アンテナ素子を搭載した複数の超小型衛星の編隊飛行（フォーメーションフライト）によって仮想的にフェーズドアレイアンテナの構築を可能とする以下の仮想フェーズドアレイアンテナ構築技術を確立する。

- ・ 複数の超小型衛星を適切な位置に配置して一つの統合された大口径のアンテナとして構成するとともに、当該アンテナがフェーズドアレイアンテナとして機能、所望の信号を発射できるようアンテナ素子の位置・姿勢に応じて搬送波の位相・振幅等を制御する技術
- ・ フェーズドアレイアンテナの構成に応じてアンテナ素子を搭載した超小型衛星の編隊飛行（フォーメーションフライト）を制御する技術
- ・ フェーズドアレイアンテナを構成する超小型衛星の一部が故障した場合でも、アンテナとしての機能を維持するための制御機構
- ・ 仮想フェーズドアレイアンテナの開発・評価を効率的に行うためのシミュレーション手法

(アー 2) アンテナ素子モジュール化技術

衛星通信がスマートフォン等と同じ周波数帯を使用しつつ、地上の携帯電話ネットワークに干渉を発生させないようにするためには、アンテナ素子を搭載する超小型衛星の位置や姿勢を調整し、フェーズドアレイアンテナを再構築することで、アンテナ全体のビーム放射パターンを動的に制御する必要がある。このため、フェーズドアレイアンテナの再構築に必要な衛星間での同期処理、送受信データの共有のための衛星間データ通信、衛星間の相対位置検出・制御等の機能を一体化し、超小型衛星として実装

するアンテナ素子モジュール化技術を確立する。

また、アンテナ素子のモジュール化に当たっては、消費電力、放熱量、重量等に加え、製造コスト等についても検討を加え、論理的な実現可能性だけでなく、物理的な実現可能性も評価する。

イ アンテナ素子間協調制御技術

複数のアンテナ素子の周波数・振幅・位相等を協調して制御し、任意の方向や範囲に対して複数の電波（ナローマルチビーム）の送受を可能とするアンテナ素子間協調制御技術を確立する。

（イー１）マルチビーム制御技術

衛星のネットワークが地上の携帯電話ネットワークと干渉を発生させずに周波数を共用し、周波数の空間利用効率を高めるためには、ビームの方向を正確に制御し、グレーディングローブやサイドローブを抑圧して地上への不要放射を低減させる必要がある。また、地上の携帯電話ネットワークの状況（地上基地局のセルの範囲、接続数等）に応じてアンテナのビーム放射パターンを変更し、それを基にアンテナ素子を搭載する超小型衛星の位置・姿勢、各アンテナ素子の搬送波の周波数・振幅・位相等を変化させ、ナローマルチビームを形成する必要がある。このため、地上への不要放射を最大限抑圧しつつ、地上の携帯電話ネットワークの状況に応じて適時にビームの方向や範囲を制御して衛星通信の通信エリアが最大となるような個々のアンテナ素子の動作を決定するマルチビーム形成技術を確立する。

（イー２）アンテナ素子モジュール協調制御技術

低軌道上に位置する衛星は高速で地球を周回しており、衛星と地上基地局・地上端末との相対的な位置関係が時々刻々と変化的なことから、アンテナのビーム放射パターンも追従して変化させる必要があり、一連のビーム形成に係る処理を所定の時間内で連続的に実施することが求められる。このとき、所望のナローマルチビームを形成するためには、アンテナ素子ごとに搬送波の周波数・振幅・位相等を変化させるだけでなく、アンテナ素子間の距離を補正する必要がある等、様々なパラメータを基に演算を行う必要がある。このため、マルチビーム形成に係る演算について、利用可能な計算機リソースを考慮しつつ、適切な精度を確保した上で時間内に完了させ、アンテナ素子モジュール間の誤差を調整するアンテナ素子モジュール協調制御技術を確立する。

ウ キャリブレーション技術

（ウー１）自律キャリブレーション技術

多数の超小型衛星に搭載されたアンテナ素子を一つのフェーズドアレイ

アンテナとして機能させるためには、電波の発信時には各アンテナ素子の搬送波の振幅・位相を整合させ、電波の受信時には搬送波の振幅・位相の誤差を各アンテナ素子でそれぞれ補正する必要がある。このため、各アンテナ素子から振幅・位相等に関する情報を収集してアンテナ間の誤差を測定し、各アンテナ素子の相対位置を考慮しつつ補正情報をフィードバックして自動で誤差を補正することにより、全体を精密に同期させて正確な電波（ビーム）の発信・受信を可能とするキャリブレーション技術確立する。

到達目標

ア アンテナ素子再構成技術

（アー 1）仮想フェーズドアレイアンテナ構築技術

複数のアンテナ素子によって実効開口面積が数百 m^2 （直径 25～100m）以上となるフェーズドアレイアンテナを構成するには、アンテナ素子は数万オーダーの規模で必要となることも想定される。このため、様々な素子数のシステムに対応できるよう、10,000 個以上のアンテナ素子を一つのフェーズドアレイアンテナとして制御する技術確立する。また、高速で地球を周回する衛星から任意の方向・範囲にビームを発射してフットプリントを形成することができるよう、フェーズドアレイアンテナとしての機能を維持しつつ、約 0.2 度/秒（上空を 10 分程度で通過することを想定）の速度でビーム放射方向を約 130 度変化させることを可能とする。

なお、アンテナ素子数が異なる場合でも同一の機構で制御できるよう、制御機構のスケラビリティも考慮することとする。

加えて、複数のアンテナ素子によって構成された大口径のアンテナがフェーズドアレイアンテナとして機能することや、所望のビーム放射パターンが得られることを効率的に確認するため、10,000 個以上のアンテナ素子で構成されるシステムの設計を実用時間内に繰り返し評価が可能なシミュレータを構築する。

（アー 2）アンテナ素子モジュール化技術

個々の衛星の挙動がシステム全体に与える影響を実用時間内に導出可能なシミュレータを構築して繰り返し評価を行うことで、アンテナのビーム放射パターンの調整に必要な衛星間での同期処理、データ通信、相対位置検出・制御等を自動的に行うアルゴリズムを確立する。加えて、10,000 個以上のアンテナ素子モジュールがあるとき、0.2 度/秒でビーム放射方向を約 130 度変化させることが可能な制御方法（個々のモジュールの制御パラメータの導出やその衛星間の伝達）を確立する。

また、アンテナモジュールを複数試作してフェーズドアレイアンテナを実機で一部構築（衛星間での同期処理、データ通信、相対位置検出・制御等

を検証可能な規模とすること。)し、地上で評価試験を行うとともに、シミュレーションモデルの妥当性を併せて確認する。アンテナモジュールの試作に当たっては、衛星の消費電力、放熱量、重量、製造コスト等も考慮し、物理的な実現可能性についても評価を行う。

イ アンテナ素子間協調制御技術

(イー 1) マルチビーム制御技術

フェーズドアレイアンテナで形成するビームの総数は 300 本以上（アンテナ素子が 10,000 個以上の場合）、1 ビーム当たりのフットプリントは、地上基地局が形成するセルサイズを基に直径 10km～数百 km の範囲で可変とし、ビーム生成時間は軌道 1 周当たり約 15 分（日本上空の通過時間に相当）、24 時間当たりでは少なくとも約 45 分（3 周に相当）とする。

また、地上の携帯電話ネットワークに干渉を発生させないように、ビームの方向を、フェーズドアレイアンテナの軌道上の運動によるアンテナ面の方位・仰角の変化等をリアルタイムに捉えつつ、0.1 度の精度（アンテナ面の中心と目標地上フットプリントの中心を結ぶ直線に対する角度誤差を指す。）で制御するとともに、アンテナパターンや衛星軌道設計を調整すること等の手法により、グレーディングローブやサイドローブの不要放射の強度を地上で-110dBm 以下に抑圧し、スプリアスを地上基地局における基準（S 帯において参照帯域幅 1 MHz、許容値-52dBm 等）にまで低減する。一方、受信においては、平均送信出力 100mW 程度のスマートフォン等の地上端末からの通信を受信可能とする。

加えて、フェーズドアレイアンテナのアンテナパターンや、アンテナ素子を搭載する超小型衛星の位置・姿勢、各アンテナ素子の周波数・振幅・位相等については、アンテナ素子数、計算精度、計算時間を変数として考慮した上で、不要放射等に関する制約を満たすよう導出するアルゴリズムを確立する。

なお、導出アルゴリズムの検討に当たっては、計算資源の制約があることに留意するとともに、計算量を削減する方法についてもあわせて検討を行うものとする。

(イー 2) アンテナ素子モジュール協調制御技術

衛星間の距離差（時間差）を考慮して衛星の位置・姿勢やアンテナ素子の周波数・振幅・位相を個別に導出し、アンテナ素子を搭載した超小型衛星間の相対距離を 10cm 程度、地表に対する姿勢を 0.1 度の精度（アンテナ面の中心と目標地上フットプリントの中心を結ぶ直線に対する角度誤差を指す。）で測定しつつ、各衛星の動作（周波数・振幅・位相）設定や配置位置変更を搬送波長に応じた精度（S 帯では 10cm 未満の誤差とする。）で行う制御を可能とする。

ウ キャリブレーション技術

(ウー 1) 自律キャリブレーション技術

地球の低軌道を周回中の超小型衛星に搭載されたアンテナ素子モジュールから振幅・位相に関する情報を収集し、アンテナ素子の相対位置や角度の情報も考慮して軌道を一周する時間内（通信ミッションの実行時間やミッション事前・事後処理の実行時間を除いたおおむね 60 分以内）に搬送波周期の 10%未満に相当する精度（S 帯の場合は 0.1 ナノ秒精度に相当）で誤差を補正する。

なお、上記の目標を達成するに当たっての年度ごとの目標については、以下の例を想定している。

<令和 6 年度>

ア アンテナ素子再構成技術

(アー 1) 仮想フェーズドアレイアンテナ構築技術

- ・フェーズドアレイアンテナの機能・性能要件の検討
- ・超小型衛星の制御方式の基本設計

(アー 2) アンテナ素子モジュール化技術

- ・アンテナ素子モジュールの基本設計
- ・シミュレーションによる評価方法の検討

イ アンテナ素子間協調制御技術

(イー 1) マルチビーム制御技術

- ・フェーズドアレイアンテナによるマルチビーム形成方式の検討
- ・アンテナ素子の制御アルゴリズムの検討

(イー 2) アンテナ素子モジュール協調制御技術

- ・超小型衛星の動作・配置に関する制御アルゴリズムの検討
- ・超小型衛星に搭載する地上との通信が可能な S 帯アンテナ部の基本設計

ウ キャリブレーション技術

(ウー 1) 自律キャリブレーション技術

- ・キャリブレーション方式の基本設計
- ・アンテナ素子間誤差（周波数・振幅・位相）の測定方法の検討

<令和 7 年度>

ア アンテナ素子再構成技術

(アー 1) 仮想フェーズドアレイアンテナ構築技術

- ・超小型衛星の制御方式の詳細設計

- ・アンテナ素子モジュールの制御方式の基本設計
- (ア-2) アンテナ素子モジュール化技術
 - ・アンテナ素子モジュールの詳細設計
 - ・評価シミュレータの開発
 - ・アンテナ素子モジュールのプロトタイプ試作

イ アンテナ素子間協調制御技術

- (イ-1) マルチビーム制御技術
 - ・マルチビームの生成アルゴリズムの評価・改良
- (イ-2) アンテナ素子モジュール協調制御技術
 - ・超小型衛星の動作・配置に関する制御アルゴリズムの評価・改良
 - ・超小型衛星に搭載する地上との通信が可能なS帯アンテナ部の詳細設計・試作

ウ キャリブレーション技術

- (ウ-1) 自律キャリブレーション技術
 - ・アンテナ素子間誤差（周波数・振幅・位相）の測定装置の開発

<令和8年度>

ア アンテナ素子再構成技術

- (ア-1) 仮想フェーズドアレイアンテナ構築技術
 - ・フェーズドアレイアンテナの機能の試験・検証
 - ・アンテナ素子故障に関するロバストな制御方式の検討
- (ア-2) アンテナ素子モジュール化技術
 - ・アンテナ素子モジュールの試験・検証

イ アンテナ素子間協調制御技術

- (イ-1) マルチビーム制御技術
 - ・アンテナパターンの動的な導出によるアンテナ素子の制御アルゴリズムの検討及び試験・検証
- (イ-2) アンテナ素子モジュール協調制御技術
 - ・超小型衛星の動作・配置の動的な調整による制御アルゴリズムの検討及び試験・検証
 - ・超小型衛星に搭載する地上との通信が可能なS帯アンテナ部の試験・検証

ウ キャリブレーション技術

- (ウ-1) キャリブレーションシステムの試験・検証
 - ・アンテナ素子間誤差（周波数・振幅・位相）の測定装置の試験・検証

5. 実施期間

令和6年度から令和8年度までの3年間

6. その他

(1) 成果の普及展開に向けた取組等

①国際標準化等への取組

国際競争力の強化を実現するためには、本研究開発の成果を研究期間中及び終了後、速やかに関連する国際標準化規格・機関・団体へ提案を実施することが重要である。このため、研究開発の進捗に合わせて、国際標準への提案活動を行うものとする。

なお、提案を想定する国際標準規格・機関・団体及び具体的な標準化活動の計画を策定した上で、提案書に記載すること。

②実用化への取組

研究開発期間終了後も、本研究開発で確立した技術の普及啓発活動に引き続き取り組むとともに、令和13年度までの実用化・製品展開等の実現に向けて必要な取組を進めることとし、その活動計画・実施方策については、提案書に必ず具体的に記載すること。

また、本研究開発の成果を活用した衛星通信システムがグローバルに展開できるよう、衛星通信サービス等の事業化を担う者の協力を得て実用化に向けた計画を策定して研究開発を実施すること。

(2) 提案および研究開発に当たっての留意点

提案に当たっては、基本計画書に記されている目標に対する達成度を評価することが可能な具体的な評価項目を設定し、各評価項目に対して可能な限り数値目標を定めること。また、従来の技術との差異を明確にした上で、技術課題及び目標達成に向けた研究方法について具体的かつ実効性のある提案を行うこと。実施計画及び年度目標については、本研究開発は大規模なシステムを対象とすることから、年度ごとに対象とするアンテナ素子数を設定して段階的に規模を拡大する等、段階をおって着実に研究開発を進捗させられるよう緻密なものとする。

研究開発の実施に当たっては、関連する要素技術間の調整、成果の取りまとめ方等、研究開発全体の方針について幅広い観点から助言を得るとともに、実際の研究開発の進め方について適宜指導を受けるため、学識経験者、有識者等を含む研究開発運営委員会等を開催する等、外部の学識経験者、有識者等を参画させること。

なお、本研究開発において実用的な成果を導出するための共同研究体制又は研究協力体制について、研究計画書の中にできるだけ具体的に記載すること。

(3) 衛星通信網の国際周波数調整に関する取組

本研究開発の成果を活用した衛星通信網の実用化に向けた環境を整備するため、無線通信規則（RR: Radio Regulations）の規定に基づく周波数（軌道位置を含む。）調整に取り組むこと。