

<基本計画書>

仮想空間における電波模擬システム技術の高度化に向けた研究開発

1. 目的

5Gを始めとする無線通信技術により、2020年代後半にはIoT環境を基盤とする社会生活が浸透していくと考えられる。そこでは、自動車の自動走行やドローンの自律飛行など、新たな利用サービスが実用化されることが想定され、そのための通信性能を満たす様々な無線システムの開発が必要となる。また、このような無線通信を必要とする機器の数は爆発的に増加するため、相互干渉を考慮した無線機器の設置検討はますます複雑になるとともに、周波数の一層の有効利用が求められると考えられる。

このような状況に適切に対処するためには、様々な利用用途に向けた新たな無線システムの開発や展開を柔軟かつ迅速に行う必要がある。しかしながら、新たな無線システムの導入にあたっては、実機の試作や既存無線システムとの調整などに大きな時間と費用を要することに加えて、実試験による周波数の共用検討では特定の環境における評価しか行えないことから、実際の通信環境で想定されるような大規模検証の実施は困難である。

このような課題に対応するため、無線システムの周波数帯・通信方式等を大規模かつ高精度で模擬可能な電波模擬システム（電波エミュレータ）の実現が必要である。電波エミュレータを用いれば、実機による試験の回数を減らすことができる上、実環境における評価試験で課題となる環境変化に影響されない性能評価が可能となるため、多くのシステムを比較評価する際に同一の環境で再現性の高い評価が可能になる。この結果、新たな無線システムの研究開発にかかわる期間や費用を圧縮し、無線通信を活用した新たなサービスの早期の導入・普及の促進を行うことが可能となるため、結果として我が国の国際競争力強化に資するとともに、周波数の有効利用を促進できる。本研究開発では、電波伝搬を仮想空間上で模擬可能な技術の実現とその検証基盤の確立を目指すとともに、電波伝搬を模擬するに当たり必要な各種モデルの検討を行う。本検証基盤を活用し、模擬環境における無線システムの評価手法を確立することにより迅速な研究開発を可能とするほか、高精度な干渉評価により、制度化に求められる検討作業の効率化や、周波数利用効率の向上に資することを目指す。

2. 政策的位置付け

- ・成長戦略フォローアップ

（令和元年6月21日：閣議決定）

「I. Society5.0の実現 1. デジタル市場のルール整備 ii) データ流通の促

進 ②流通・活用環境の整備 イ) ネットワークの更なる強化と高度化の推進」において「円滑かつ迅速な導入に必要となる実世界の電波伝搬を模擬的に再現する試験環境に関する研究開発を推進する」旨の記載あり。

- ・ 世界最先端デジタル国家創造宣言・官民データ活用推進基本計画
(令和元年6月14日：閣議決定)

「第一部 世界最先端デジタル国家創造宣言 V. 社会基盤の整備 1 5Gを軸とした協業促進によるインフラ再構築 (3) 5G環境等の普及、光ファイバ網の整備」において「円滑かつ迅速な導入に必要となる実世界の電波伝搬を模擬的に再現する試験環境等に関する研究開発を推進する」の記載あり。

- ・ デジタル時代の新たなIT政策大綱
(令和元年6月7日：IT総合戦略本部決定)

「【2つめの柱】官民のデジタル化の推進」において「円滑かつ迅速な社会実装の観点から、実世界の電波伝搬を模擬する試験環境に関する研究開発を推進する」の記載あり。

- ・ 「令和」時代・経済成長戦略
(令和元年5月14日：自由民主党政務調査会経済成長戦略本部)

「6. データ駆動社会の基盤整備 (2) デジタル基盤整備 ① 5G環境の普及、光ファイバー網の整備」において「5Gの高度化等の研究開発を強化するとともに、その成果のビジネス化支援やオープンイノベーションを促進する環境整備を行う」旨の記載あり。

- ・ デジタル変革時代のICTグローバル戦略懇談会 報告書
(令和元年5月31日)

「5. 3. 研究開発・標準化の推進方策 ② オープンイノベーションを促進する環境整備 イ 研究開発環境の整備、研究データの共有」において「Society 5.0時代の実空間とサイバー空間が有効なサイバーフィジカル空間(CPS)における新しいインフラ/システム/プラットフォーム/アプリケーション・サービスのデザイン、評価、検証を可能にするため、多様な無線システムの周波数帯・通信方式等を大規模かつ高精度で模擬可能な電波エミュレータ(高精度な電波シミュレータ)の開発」の記載あり。

3. 目標

電波伝搬を仮想空間上で模擬し、大規模に無線システムの性能評価を行う検証基盤技術を確立するとともに、電波伝搬を模擬するために必要な電波伝搬や空間のモデル化技術と、得られたモデルを検証基盤上で統合して処理する技術を確立

する。このための取り組みは、単一无線機による動作検証から、複数無線機の連携動作までの拡張検証、想定アプリに基づく通信品質や適用場所を包含した検証まで段階的に進める。最終的には、これらの取り組みにより、実環境における測定結果と比較して相対誤差 20%以下(例：通信エリアの確定に必要なキャリアセンスが可能な電波環境において、推定値と実測値の短区間中央値について RMSE (二乗平均誤差：Root Mean Squared Error) 1 dB 程度)を満たす電波環境の模擬と、模擬した環境における 10,000 台規模の無線機を想定した利用シナリオに基づく通信性能評価を実現する。

4. 研究開発内容

(1) 概要

本研究開発では、仮想空間上に電波伝搬環境を構築し、様々な条件下で無線システムの評価をリアルタイムに行うための電波模擬システム技術の研究開発を行う。

現在、新たな無線システムの開発を行い、その動作確認や性能評価を行うためには、実環境において試験を行う必要があり、試験の環境構築や実施に多大なコストと時間を要する。加えて、試験結果に応じて無線システムの機能等を改修して同様の試験を繰り返す必要があるが、実環境における試験では同一条件を再現できないため、精度よく改修前後の比較検証を行うことが困難である。さらに、近年は無線システムを用いるアプリケーションやサービスは高度化・多様化が進んでおり、例えば多数の高速移動体や飛翔体などを想定する無線システムの試験環境を実環境で構築できない場合も多い。このとき、仮想空間上に検討対象となる屋外／屋内の周辺環境や空間を構築し、実際のサービスに即した無線システムの電波発射や移動を再現することができれば、無線システムの試験を効率化させることができる。また、その環境で実アプリケーションを用いた無線通信システムをリアルタイムに模擬することで、実環境では不可能な条件での試験を網羅的に実施することも可能となる。これにより、電波資源の時間的あるいは空間的な利用可能性をきめ細かく検証でき、結果的に周波数の利用効率も向上する。

この点に着目し、仮想空間上で電波環境を模擬するために必要な様々な環境における電波伝搬のモデル構成手法の検討や実際の測定に基づくモデルの策定を行う。また、仮想空間上で検討する無線システムが対象とする周辺の地形や構造物などの周辺空間を高精度に構築し、その空間における電波伝搬を模擬するためのモデル構成手法の検討や実際の測定に基づくモデルの策定を行う。さらに、実無線システムを模擬し、仮想空間に接続することが可能な模擬無線システム及び模擬無線システムに依らず仮想空間上で構成される無線システムの構成技術を実現する。これらの技術に基づき、具体的な利用シナリオに従って最適なモデルを、後述のとおり利用シナリオの地理的な規模等に基づき適切に選択・合成しながら適用し、模擬無線システム及び仮想空間上の通信性能等をリアルタイムに評価す

るために必要な検証基盤を構築する技術を実現する。本検証基盤の構築に当たっては、本検証基盤に入力するモデルが実環境における測定結果と精度よく合致することを確認することで検証基盤の妥当性が検証されるものとする。また、本検証基盤を用いることで、仮想空間上でのシステム動作の検証が可能となる。具体的な取り組みは、単一无線機による動作検証から、複数無線機の連携動作までの拡張検証、想定アプリに基づく通信品質や適用場所を包含した検証まで段階的に進めることとする。

(2) 技術課題および到達目標

技術課題

ア 電波伝搬・空間モデルの構成技術

ア① シナリオ適用可能性に優れた電波伝搬モデルの構成技術

シナリオ適用可能性に優れた電波伝搬モデルの構成するためには、電波伝搬特性モデルと干渉特性モデルについて高度化を検討し、一体としてモデルを構築する技術の構築が必要である。

電波伝搬特性モデルに関して、無線通信における無線局間の電波伝搬特性は、対象とする無線通信システムの周波数や周辺的环境によって異なるため、様々なユースケースを想定した電波模擬システムの構築には、周波数や環境に応じた電波伝搬特性のモデル化が課題となる。また、電波伝搬特性のモデル化においては、屋内と屋外、静止と移動、地上と上空、見通し内と見通し外など、条件によって最適なモデルを選定する必要がある。本技術課題では、令和2年に実施予定の「電波模擬システムに関する調査検討（仮称：技術試験事務）」において実施される測定結果に加え、これまでに取得されている電波伝搬特性の測定結果（論文等の文献資料や提案者が保有する測定結果をいう。以下同じ。）に基づく電波伝搬モデル化を実施する。電波伝搬モデル化に当たっては、電波エミュレータにおいてリアルタイムかつ利用シナリオに即した電波模擬の処理を行う必要があることから、既存の伝搬モデルの利用に加え、機械学習等を用いた推定速度・精度向上技術の利用可能性についても検討も行うこと。また、フェージングを考慮した検証環境を構築し、取得した電波伝搬特性モデルの検証を行う必要がある。このモデル化においては、利用が想定される環境が様々であることからモデルの拡張性についても検討する必要がある。また、電波伝搬モデルを有効利用するために、モデルの分類やリスト化などを行い、環境や要件ごとの最適モデルを選択する仕組みの確立も必要となる。なお、当電波伝搬モデルは、後述する干渉特性モデルと同様に、アンテナからの距離で考えた場合に比較的遠方となる無線通信システム適用時に支配的に考慮される解析レイヤであり、レイトレーシング等による解析レイヤ、電磁界解析による解析レイヤを適切に組み合わせながら適用されるものである。特に、解析レイヤとの接続性、連続性については具体的な環境を想定し、電波伝搬特性の測定結果を有していない場合

には電波伝搬特性の測定を行い、その結果からモデルの拡張性を検証する必要がある。

干渉特性モデルに関しては、当該モデルへの影響も重要であることから、他ノード等による干渉特性のモデル化が課題であり、電波伝搬特性モデルと同様に条件によって最適なモデルを選定する必要がある。本技術課題では、令和2年に実施予定の「電波模擬システムに関する調査検討（仮称：技術試験事務）」において実施される測定結果に加え、これまでに取得されている干渉特性の測定結果に基づく干渉特性モデル化を実施する。さらにモデルの拡張性については、解析レイヤにおける干渉特性モデルとの接続性、連続性について具体的な環境を想定して検討する。なお、干渉特性の測定結果を有していない場合には干渉特性の測定を行い、その結果から拡張性を検証する必要がある。また、干渉特性モデルを有効利用するために、モデルの分類やリスト化を行い、環境や要件ごとの最適モデルを選択する仕組みの確立も必要となる。周波数や環境に応じた基礎特性の取得及びモデル化を実施する必要がある。

アー② 高精度な電波利用空間模擬モデルの構成技術

高精度な電波利用空間模擬モデルを構成するためには、周辺環境を精緻に3Dモデル化する技術と、環境変動及び構造・材料特性に対応可能な空間をモデル化する技術が必要である。

周辺環境を精緻に3Dモデル化する技術に関しては、無線通信における送信電波の電波伝搬特性は屋内外の周辺空間の地形や構造物の配置、利用する周波数などによって異なるため、想定されるユースケースと周辺環境に応じた電波伝搬特性のモデル化が課題となる。そのためには、屋内外の周辺空間の地形や構造物を仮想空間上に高精度に再現するための技術の研究開発が必要である。

また、環境変動及び構造・材料特性に対応可能な空間をモデル化する技術については、再現した空間における無線局間の電波伝搬特性は、対象とする無線通信システムの諸元及び周波数や周辺の環境によって異なるため、様々なユースケースを想定した電波模擬システムの構築には、周波数や環境に応じた伝搬特性のモデル化技術の研究開発が必要である。また、当該伝搬特性のモデル化においては、屋内と屋外、静止と移動、地上と上空、見通し内と見通し外などの条件に加え、周辺環境の変動や構造物の材質などの影響を含む、条件に応じた最適なモデルを選定する必要がある。本技術課題では、令和2年に実施予定の「電波模擬システムに関する調査検討（仮称：技術試験事務）」において実施される測定結果に加え、これまでに取得されている周波数や環境に応じた伝搬特性の測定結果に基づく空間モデル化（課題アー①同様、機械学習等の利用可能性に係る検討も行うことを含む。）を実施する。また、実無線通信システムを用いた検証環境を構築し、環境変動及び構

造・材料特性を含む空間モデルの検証を行う必要がある。このモデル化においては、利用が想定される環境が様々であることからモデルの拡張性についても検討する必要がある。また、取得した空間モデルを有効利用するために、モデルの分類やリスト化などを行い、環境や要件ごとの最適モデルを選択する仕組みの確立も必要となる。なお、この空間モデルは、アンテナからの距離で考えた場合に遠方にも近傍にも当たらず、周囲の建物等からの反射を考慮する必要がある解析レイヤであり、電波伝搬モデルによる解析レイヤ、電磁界解析による解析レイヤを適切に組み合わせながら適用されるものである。特に、解析レイヤとの接続性、連続性については具体的な環境を想定し、電波伝搬特性の測定結果を有していない場合には電波伝搬特性の測定を行い、その結果からモデルの拡張性を検証する必要がある。

イ 仮想環境対応無線システムの構成技術

イー① 疑似無線機の連動動作による模擬無線システムの構成技術

電波模擬システムでリアルタイムに無線システムの挙動を検証するためには、対象となる様々な無線システムを再現できる疑似無線システムの構築が課題となる。疑似無線システムは、疑似無線機として様々な無線システムが模擬可能な実無線機を複数適用して構成されるが、干渉特性の評価や、Massive MIMO 等のマルチアンテナ無線システムの評価等を行うために多数の実無線機を同時に動作させる必要があり、実無線機を連携動作させるための同期手法の実現が必要である。これらの実無線機は、大規模環境においても動作を検証する必要がある、その大規模環境を模擬する検証基盤と接続してリアルタイムに動作させることが求められる。

イー② 電波発射挙動モデルの構成技術

実無線機の様々な周波数の電波を検証基盤で処理可能とするために、対象とする無線システムの電波発射の挙動について、電波発射指向性等の諸特性を再現する技術が求められる。なお、当電波発射挙動モデルは、アンテナ近傍の電磁界を解析するレイヤであり、課題アで検討する電波伝搬モデルによる解析レイヤや、レイトレーシング等による解析レイヤを適切に組み合わせながら適用されるものである。

ウ 大規模仮想環境の検証基盤技術

ウー① 大規模仮想環境の構成運用技術

時々刻々と変動する電波伝搬を正しく検証するためには、限定された数の無線機による実験室環境での機能・性能の検証だけではなく、現実的な利用シナリオに基づき、適切な伝搬モデル・干渉モデル・空間モデルに従って仮想環境を構築して、上述の疑似無線機を接続した仮想システム上での動作検証を実施する基盤が必要となる。そのため、仮想環境において、電波伝搬モデルの特徴を決めるパラメータや仮想無線機(物理的に存在する疑似無線

機に対して、コンピュータ内の仮想環境に存在する無線機を仮想無線機と呼ぶ)の位置などを変化させながらアプリケーションを実行させ、必要な試験を大規模な環境で容易かつ柔軟に繰り返し実行するための検証基盤を管理する機能の確立が求められる。その上で、検証基盤に疑似無線機を接続し、同様の処理が可能とするための検証基盤を管理する機能の確立することが求められる。また、疑似無線機に加えて、評価の対象となる無線通信方式を実装した実無線機を併せて接続できる必要がある。評価対象となる疑似無線機及び実無線機は、仮想環境における仮想無線機と一体として動作させながら、それら全ての無線機のパラメータを同時に変化させてアプリケーションを動作できることが求められる。

ウー② 大規模仮想環境のデータ収集分析技術

大規模検証においては、検証結果の起因になった事象を実験終了後に確認する必要がある。大規模な仮想環境に存在する仮想無線機やサーバ機器に加え、仮想環境を特徴付ける各モデルの状態など、仮想環境を構成する個別の情報を効率的に収集・解析し、実験中にそれぞれの情報が想定通りに反映されているかを確認して、実験終了後にはさまざまな事象の因果関係を解析できる収集・分析・可視化システムが必要となる。

到達目標

ア 電波伝搬・空間モデルの構成技術

- 環境変動などを含めた電波伝搬・干渉特性（主に、実証環境に即した平均受信電力特性等）を統計的に 80%以上の精度（例：通信エリアの確定に必要なキャリアセンスが可能な電波環境において、推定値と実測値の短区間中央値について RMSE（二乗平均誤差：Root Mean Squared Error）1 dB 程度）で仮想空間上に再現可能な電波伝搬・干渉モデルの構成技術を確立する。（具体的には、オフィスを対象とした場合の 1 フロア、ITS を対象とした場合の複数交差点を含むエリアなどのユースケースを想定する。）
- 屋内外の周辺空間の地形や構造物を誤差 1m 以下の精度で仮想空間上に再現可能な 3D モデルの構成技術を確立する。
- 想定する電波システムの諸元及び周波数における電波伝搬に関して、周辺環境の変動特性及び構造・材料特性の影響を考慮し、電波伝搬特性を統計的に 80%以上の精度で反映した高精度な電波利用空間模擬モデルの構成技術を確立する。（具体的には、オフィスを対象とした場合の 1 フロア、ITS を対象とした場合の複数交差点を含むエリアなどのユースケースを想定する。）

イ 仮想環境対応無線システムの構成技術

- 最大信号帯域幅 400 MHz の信号を扱う様々な無線システムをソフトウェアで構築可能なハードウェア疑似無線機技術を確立する。
- また、最大 100 台程度の上記ハードウェア疑似無線機が連携動作する模擬無線

システムを確立する。

- 無線システムのアンテナの電波発射指向性や筐体による減衰等の電波発射の挙動について、対象とする無線システムの電波発射指向性の半値角に対して±30%の精度で再現するための技術を確立する。

ウ 大規模仮想環境の検証基盤技術

- 課題アのモデルに従い仮想環境を構築し、課題イの仮想環境において模擬的に動作可能な無線システムを組合せることで、実環境において電波を送出することなく無線方式やアプリケーションの動作や性能を検証可能とする。
- 10,000 台規模の無線機を再現可能な仮想環境を、利用シナリオに基づき自動的かつ柔軟に構築できる基盤技術を実現する。
- 実験中に仮想環境が想定通りに構成されているかを確認できる機能を持ち、さらに実験終了後にさまざまな事象の因果関係を解析可能とする、収集・分析・可視化システムを実現する。

なお、上記の目標を達成するに当たっての年度毎の目標については、以下の例を想定している。また、本研究開発中及びその後のマイルストーンは別紙のとおり。

<令和2年度>

ア 電波伝搬・空間モデルの構成技術

距離等に応じた電波伝搬特性の取得及びモデル化の基礎検討を行う。また、取得した電波伝搬・干渉特性モデルのアーカイブ化手法の基礎検討を行う。また、周辺環境の 3D モデル化技術の基礎検討と周辺環境の変動特性に加え、構造・材料特性の取得及びモデル化の基礎検討を行い、模擬に資するレイトレーシング等、解析手法の基礎検討を行う。なお、本計画書における「基礎検討」とは、単一无線機による動作や、1対1の干渉等の、最小規模の検討であるとし、例えば複数無線機による連携を考慮する場合等、次年度以降における拡張検討に発展する可能性がある。

イ 仮想環境対応無線システムの構成技術

Sub6GHz において 100MHz 帯域幅の信号を扱う疑似無線機の基礎検討および一次試作を行う。また、同周波数帯の信号と課題ウとの接続インターフェイスの基礎検討および一次試作を行う。さらに電波発射挙動の模擬手法の基礎検討を行う。

ウ 電波伝搬検証基盤技術

単純かつ限定的な電波伝搬および空間モデルを用いて疑似無線機を数十台接続可能な仮想環境の構築技術を確立し、その性能を評価する。また、仮想無

線機や仮想サーバを含めた仮想環境の制御を可能とするシナリオ管理機構の試作を行う。さらに実無線機の接続インターフェイスの基礎設計を行い、仮想環境と実環境の接続を可能にする。最終的な目標である 10,000 台規模の無線機を再現可能な仮想環境およびそれを支える環境全体の観測システムの基礎設計を行う。

<令和3年度>

ア 電波伝搬・空間モデルの構成技術

仮想空間における電波伝搬モデル構成技術及び干渉特性モデル構成技術の基礎検討と課題ウへの最適な入力形式について検討する。また、仮想空間における周辺環境 3D モデル構成技術の基礎検討と仮想空間への構造・材料特性の反映手法について検討及び評価を行う。さらに仮想空間におけるレイトレーシング等、解析手法の適用手法について検討し、課題ウへの最適な入力形式について検討する。

イ 仮想環境対応無線システムの構成技術

ミリ波帯において 400MHz 帯域幅の信号を扱う疑似無線機の基礎検討および一次試作を行う。また、同周波数帯の信号と課題ウとの接続インターフェイスの基礎検討及び一次試作を行う。さらに数十台規模の疑似無線機の同期手法について検討する。また、電波発射挙動の模擬手法のモデル化検討を行い、課題ウへの最適な入力形式について検討する。

ウ 電波伝搬検証基盤技術

前年度に作成された課題アによるモデルを受け付け保存するためのストレージ技術の試作実装を行い、その性能を評価する。同モデルを用いて疑似無線機を 100 台程度接続可能な仮想環境を構築し、シナリオ管理機構と連携させユースケースに従った動作が可能であることを仮想無線機を用いて実証する。また、実無線機との接続インターフェイスの試作を行い、仮想環境に接続して動作可能であることを実証するとともにその性能を測定する。

<令和4年度>

ア 電波伝搬・空間モデルの構成技術

課題ウと連携し、仮想空間上に構成した電波伝搬および仮想空間上に構成した構造・材料特性を含めた 3D モデルの評価及び検証を行う。また、課題ウと連携した、レイトレーシング等、解析手法の検討及び評価を行う。

イ 仮想環境対応無線システムの構成技術

課題ウと連携し、数十台規模の疑似無線機と仮想空間上の仮想無線機との同

期手法の検討及び評価を行う。また、課題ウと連携し、電波発射挙動を模擬したモデルの仮想空間への反映手法の検討及び評価を行う。

ウ 電波伝搬検証基盤技術

各モデルのストレージ機能について、電波伝搬モデル、空間モデル、電波発射挙動モデルの保存および読み込みを効率的に実施できるための拡充を行う。また、10,000台規模の無線機を再現可能な仮想環境の構築およびシナリオ管理および観測ができるよう機能拡充を行い、性能について評価を行う。

<令和5年度>

ア 電波伝搬・空間モデルの構成技術

環境変動などを含めた電波伝搬・干渉特性（主に、実証環境に即した平均受信電力特性等）を統計的に80%以上の精度で仮想空間上に再現可能な電波伝搬・干渉モデルの構成技術を確立する。また、空間の地形や構造物を誤差1m以下の精度で仮想空間上に再現可能な3Dモデルの構成技術を確立する。周辺環境における電波伝搬に関して、周辺の変動特性及び構造・材料特性を統計的に80%以上の精度で反映した高精度な電波利用空間模擬モデルの構成技術を確立する。

イ 仮想環境対応無線システムの構成技術

最大信号帯域幅400MHzの信号を扱う疑似無線機技術を確立する。また、最大100台程度の疑似無線機が連携動作する模擬無線システムを確立する。さらに、無線システムのアンテナの電波発射指向性や筐体による減衰等の電波発射の挙動について、対象とする無線システムの電波発射指向性の半値角に対して±30%の精度で再現するための技術を確立する。

ウ 電波伝搬検証基盤技術

前年度までに開発した機能のユーザインタフェースを拡充し、本システム利用者がより容易に環境構築および検証可能な、オープンなテストベッドとして提供出来る基盤を整備する。

5. 実施期間

令和2年度から令和5年度までの4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とともに国際標準化機関の検討グループの議長等の先導的地位を確保して積極的に貢献するものとする。本国際標準は、研究開発成果であるモデルを参照し、同時に当該モデルの公表(本国際標準の作業班構成員等に制限された場合も含む)を前提とするものである。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引き続き取り組む予定の「本研究開発で確立した技術の普及啓発活動」及び令和10年度までの実用化・製品展開等を実現するためにモデルの拡張等の必要な取組(別紙に記載のマイルストーンに沿った取組を含む。)を図ることとし、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。

③研究開発成果の情報発信

本研究開発で確立した技術の普及啓発活動を実施すると共に、総務省が別途指定する成果発表会等の場において研究開発の進捗状況や成果について説明等を行うこと。併せて、研究開発成果であるモデルのオープンデータ化(例えば、電波模擬システムの開発者及び利用者からなるフォーラムを設置し、そのフォーラム会員のみ公表することを含む。)に取り組むこととし、その実施方法については、提案書に必ず具体的に記載すること。

(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とともに、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、実施計画及び年度目標について具体的かつ実効性のある提案を行うこと。また、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。

なお、技術課題アについては、実施するモデル化が対象とする具体的な利用シナリオ(少なくとも別紙に示すユースケースを含むこと。)を提案し、モデルを適用できる場面、対象とする周波数帯、モデル化の手法、モデルの利点と欠点などについて、可能な限り記述すること。技術課題イについては、電波を模擬する装置の構成や機能について具体的に記述するとともに、目標とする性能

についても、その根拠とともに記載すること。技術課題ウについては、構築する検証基盤装置の構成を記述し、模擬可能な無線通信環境の規模や精度などを、その根拠とともに明確に示すこと。

また、技術課題アにおけるモデル化については、令和2年に実施予定の「電波模擬システムに関する調査検討（仮称：技術試験事務）」において実施される測定結果を可能な限り活用し、提案する方式の有効性を確認すること。さらにこれまでに取得されている電波伝搬特性の測定結果も用いてモデル化の検証を行うこと。

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頂くと共に、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、研究開発運営委員会等を開催し、外部の学識経験者や有識者等を参画させること。また、研究開発全体の統括を行い、効率的・効果的な研究開発実施を可能とするための責任者を課題間で調整し、選定すること。

電波模擬システムに関するマイルストーン (イメージ)

		利用シーン・マイルストーン			
		～2021	～2023	～2025	～2030
ユースケース	スマートオフィス (920 MHz帯、2.4 GHz帯、5.8 GHz帯、28GHz帯)	1部屋 (数十台規模、数システム)	1フロア (数百台規模、十数システム)	建物全体 (数千規模、数十システム)	オフィス街全体 (数万台規模、数十～数百システム)
	ITS (700 MHz帯、5.8 GHz帯、70 GHz帯)	交差点、料金所 (小域、路車・車車、数十台規模)	ITS以外存在しない限定地域 Level4 (中域、路車・車車、数十台規模)	高速道路Level4 (広域、路車・車車、数百台規模～)	一般道Level4 (広域、路車・車車・歩者、数百台規模～)
	ドローン (169MHz帯、2.4 GHz帯、5.7 GHz帯等)	開放地(農場を想定:小域、ほぼ平面・建物なし、数台)、山間部(広域、起伏あり、数台)	配達:ルーラル (中広域、起伏あり・建物なし、数台規模)	配達:アーバン (広域、起伏あり・建物あり、数十台規模～)	空飛ぶ車 (超広域、起伏あり・建物あり、数百台規模～)
	スマート工場 (920 MHz帯、2.4 GHz帯、5.8 GHz帯、28GHz帯、60 GHz)	単一ライン(小域、屋内狭小空間、数台)	複数ライン(小域、屋内狭小空間、数台～10数台)	建屋全体(小域、ワンフロア、数10台～数100台)	工場全体(屋外屋内含む工場空間、数1000台規模～)
	次世代スマートメータ (920 MHz帯、2.4 GHz帯)	10数軒規模(小域、屋外、数10台)	住宅街・団地(中域、屋外、100台規模)	町内規模(中域、単一システム、数100台)	複数町内(中広域、複数システム、数1000台規模～)
	Beyond 5G (3.7 GHz帯、4.5 GHz帯、28 GHz帯等)	ユースケース案出現 (ミリ波帯の移動体通信の基本伝搬特性の収集・モデル化)	ユースケース案実証 (具体的なユースケースに合わせた模擬環境の構築・実証)	ユースケース案実用化 (実用化に向けた同一ユースケース内でのスケラビリティの確保)	ユースケース拡大 (多様なユースケースへの対応に向けたスケラビリティの確保)
電波模擬システムのスペック	対応環境(周波数帯)	限定環境・限定システム	準汎用環境、準汎用システム	汎用環境・汎用システム	随時対応環境の精緻化、対応システムの拡大
	精度	上記ユースケースについて、実証パラメータ(主に、実証環境に即した平均受信電力特性等)に対する精度が80%以上	～2021のユースケースで85% 上記ユースケースで80%	～2021のユースケースで90% ～2023のユースケースで85% 上記ユースケースで80%	～2021のユースケースで95% ～2023のユースケースで90% ～2025のユースケースで85% 上記ユースケースで80%
	無線局の規模	実機相当の無線機 数十台 仮想的な無線機 数千台	実機相当の無線機 100台 仮想的な無線機 1万台	実機相当の無線機 百数十台 仮想的な無線機 1万台	実機相当の無線機 数百台 仮想的な無線機 数万台
データ利活用	本事業でモデル化に必要なデータ収集を行うものの、受託企業が既に有する伝搬特性のデータも一部活用		研究開発で得られた様々な環境での伝搬特性測定結果やモデル化したデータのオープン化		
国際標準化	-	国際標準化に向けたインプット	国際標準化(レポート)	国際標準化(勧告)	
電波模擬システムの活用	-	電波模擬システムの技術試験事務への利用・一般開放			

<基本計画書>

5G 基地局共用技術に関する研究開発

1. 目的

移動通信システムが様々な分野での活用が進み社会経済へ深く浸透していくなか、移動通信トラフィックは毎年約 1.3 倍と加速度的に増加している。

第 5 世代移動通信システム（以下「5G」という。）の 2020 年以降の本格的なサービス展開に向けて、5G 向けに割り当てられた 6 GHz 以下や準ミリ波帯の周波数だけでは、一部地域において移動通信トラフィックを収容しきれない可能性があり、周波数のひっ迫が想定される。

また、より高度な 5G サービスの早期普及・展開のためには、都市部の駅のプラットフォームやショッピングモール、地下街など高トラフィックの予想されるエリアにおいては高密度な基地局設置が必要であるが、設置場所の広さなどの物理的制約等により複数周波数・キャリアの 5G 基地局やアンテナを設置することが困難であり、一部の基地局では共用化が望まれている。一方、ルーラル地域においては、早期展開のために基地局や付帯設備の共用等を含む移動通信ネットワークの効率的な構築・運用が必要となる。

このようなことから、ひっ迫が予想される 6 GHz 以下や準ミリ波帯の周波数の利用効率の向上、より高い周波数帯の利活用を促進することで 5G サービスの早期普及・展開を図り、また移動通信ネットワークの効率的な構築・運用にも資する技術として、基地局共用技術に関する研究開発を実施することにより、各周波数・各キャリアの基地局をオペレータ毎に独立した場所に設置した場合と比べ、共用基地局をそれぞれの場所に設置し適切な干渉制御を行うことで、同じ周波数を異なる共用基地局で同時に使用可能になることから周波数の利用効率が 1.5 倍程度増大するとともに、準ミリ波帯及び将来 5G で割り当てられる可能性のあるミリ波帯以上の超高周波数帯※を含む高周波数帯の利活用を促進するものである。

※米 FCC または欧州 CEPT が 2020 年以降の IMT 候補周波数として検討中の周波数を想定。実際に研究開発対象とする周波数帯は、ITU-R WRC-19 国際会議における調整状況をふまえて決定する。

2. 政策的位置付け

・成長戦略実行計画（令和元年 6 月 21 日）

第 2 章 Society5.0 の実現

1. デジタル市場のルール整備

（2）対応の方向性

⑥ 5G 整備や G 空間社会実現に向けて

Society5.0 の実現に向けて、2020 年度末までに全都道府県で 5G サー

ビスを開始するとともに、セキュリティの確保に留意しつつ、通信事業者等による5G基地局や光ファイバなどの情報通信インフラの全国的な整備に必要な支援を実施し、2024年度までの5G整備計画を加速する。

- ・世界最先端デジタル国家創造宣言・官民データ活用推進基本計画（令和元年6月14日）

第1部 世界最先端デジタル国家創造宣言

V. 社会基盤の整備

1 5Gを軸とした協業促進によるインフラ再構築

(3) 5G環境等の普及、光ファイバ網の整備

今後の電波利用ニーズの拡大への対応として5Gの普及・高度化に向け、5G基地局の小型化や高エネルギー効率化、高信頼化やその円滑かつ迅速な導入に必要となる実世界の電波伝搬を模擬的に再現する試験環境等に関する研究開発を推進するとともに、既存システムとのダイナミックな周波数共有を可能とするシステムの構築を令和2年度末までに行う。あわせて、5Gのサービスを支える基地局や光ファイバなどの情報通信インフラの整備を進めるとともに、5Gによる地域課題解決に向けた開発実証を推進していく。

3. 目標

6GHz以下や準ミリ波帯の周波数の利用効率の向上及び高周波数帯の利活用促進を目標とし、5Gサービスの早期普及・展開を図り、また移動通信ネットワークの効率的な構築・運用にも資する技術を確立するため、基地局共用技術に関する研究開発を行う。

複数周波数・複数キャリアの基地局共用技術の確立により、従来の各周波数・各キャリアの基地局をオペレータ毎に独立した場所に設置した場合と比べ、共用基地局をそれぞれの場所に設置し適切な干渉制御を行うことで、同じ周波数を異なる共用基地局で同時に使用可能になることから1.5倍以上の周波数の利用効率の向上を実現することを目標とする。

また、準ミリ波帯及び将来5Gで割り当てられる可能性のあるミリ波帯以上の超高周波数帯における複数周波数・複数キャリアの基地局共用技術の確立により、従来の準ミリ波帯及び将来5Gで割り当てられる可能性のあるミリ波帯以上の超高周波数帯における各周波数・各キャリアの基地局をオペレータ毎に独立した場所に設置した場合と比べ、それぞれの場所に準ミリ波帯及び将来5Gで割り当てられる可能性のあるミリ波帯以上の超高周波数帯の共用基地局を設置し適応的に活用することで、1.5倍程度の高周波数帯の利活用促進を示すことを目標とする。

4. 研究開発内容

(1) 概要

本研究開発では、6 GHz 以下や準ミリ波帯及び将来 5G で割り当てられる可能性のあるミリ波帯以上の超高周波数帯に対して、以下 2 件の基地局共用技術の研究開発を行う。

- ア. 5G 基地局の共用を実現する広帯域な無線通信システム構成技術
- イ. 有線・無線を統合したネットワーク接続管理・制御技術

「ア」では、複数周波数・複数キャリアの共用を実現するために、より広帯域に対応可能な RF デバイス・モジュールの研究開発を行う。また、小型・低消費電力な無線ユニット、広帯域・マルチキャリア無線通信システムを実現する広帯域無線通信システムの開発、総合フィールド評価などを行う。

「イ」では、複数周波数・複数キャリアの基地局共用を実現する有線・無線を統合したネットワーク接続管理・制御技術の実現が期待されている。そのため、広帯域無線通信システムにおいて、効率的な周波数資源の活用と経済的に広いカバレッジ及び大容量無線通信を実現することを目的として、地理的に異なる場所に配置した複数の無線基地局を制御し、無線及び有線(光ファイバ)フロントホールアクセスリンクを統合したトポロジー管理・制御を行う技術や無線基地局間の干渉制御を含む無線リソース制御技術などの研究開発を行う。また、「ア」で開発した広帯域無線通信システムに、研究開発したトポロジー管理・制御を行う技術などを実装し、性能検証などを行う。

(2) 技術課題および到達目標

技術課題

ア 5G 基地局の共用を実現する広帯域な無線通信システム構成技術

複数周波数・複数キャリアの基地局共用を実現するためには、より広帯域なアンテナ素子、増幅器、変復調器(アナログ-デジタルコンバータ・デジタル-アナログコンバータを含む)などの RF デバイス・モジュール及びこれら広帯域 RF デバイス・モジュールの高効率化、小型化、低消費電力化が必要である。また、無線ユニットの小型化、低消費電力化及び共用基地局を効率的に活用する無線通信システムが必要である。さらに、複数オペレータの無線フロントホールを収容するため無線フロントホールの大容量化の検討も必要である。

イ 有線・無線を統合したネットワーク接続管理・制御技術

複数周波数・複数キャリアの基地局共用を実現する広帯域無線通信システムにおいて、効率的な周波数資源の活用と経済的に広いカバレッジ及び大容量無線通信を実現するためには、地理的に異なる場所に配置したミリ波帯以上の超高周波数帯、あるいは準ミリ波帯、6 GHz 以下の複数の無線基地局を集約基地局から制御し、無線及び有線(光ファイバ)フロントホールアクセスリンクを統合したトポロジー管理・制御技術や高密度に配置された無線基地局間の干渉制御を含む無線

リソース制御技術も必要である。更に、各オペレータに閉じた無線ネットワークに対する共用技術だけでなく、バックボーンなどを含めたネットワーク全体に対する共用技術の検討も必要である。

到達目標

ア 5G 基地局の共用を実現する広帯域な無線通信システム構成技術

28GHz 帯においては2以上のオペレータの周波数帯域幅に対応する広帯域な RF デバイス・モジュールを搭載し、最大4オペレータ毎に異なる送受信動作が可能な無線ユニット及びデジタル信号処理部などの研究開発を行う。

その際、複数オペレータの無線ユニットの高効率化、対消費電力化などにより、従来の1オペレータ分の周波数帯域幅の無線ユニット(一個)と比較して、例えば2オペレータに対応する場合、無線ユニットを用意すると消費電力は2倍に増えるが、これを2オペレータ換算で消費電力1.5倍以下とすることを目標とする。

6GHz 以下の周波数帯においても、同程度の広帯域化及び消費電力を低減することとする。

イ 有線・無線を統合したネットワーク接続管理・制御技術

複数周波数・複数キャリアの基地局共用を実現する広帯域無線通信システムにおいて、地理的に異なる場所に配置したミリ波帯以上の超高周波数帯、あるいは準ミリ波帯、6GHz 以下の複数の無線基地局を集約基地局から制御し、有線(光ファイバ)及び無線フロントホール、アクセスリンクを統合したトポロジー管理・制御を行うアルゴリズム及び高密度に配置された無線基地局官の干渉制御を含む無線リソース制御を行うアルゴリズムを試作開発する。その際、基地局共用を行わず、各オペレータが独自に独立した場所に5G 基地局・アンテナ設置した場合のあるエリアの総システム容量(例：1設置場所当たり、ある1オペレータの基地局1局×4か所)に対して、基地局共用を行ってそれぞれの場所に設置し適切な干渉制御を行った場合(例：1設置場所当たり4オペレータ分の共用基地局1局×4か所)の総システム容量との対比で、1.5倍以上の改善を目標とする。

また、準ミリ波帯及び将来5Gで割り当てられる可能性のあるミリ波帯以上の超高周波数帯における複数周波数・複数キャリアの基地局共用を実現する広帯域無線通信システムに、試作開発したトポロジー管理・制御アルゴリズム及び無線リソース制御アルゴリズムを適用する。従来の各周波数・各キャリアの基地局をオペレータ毎に独立した場所に比べ、4オペレータ分の共用基地局のサービスエリアが広がることから、28GHz 帯などの高周波数帯では周波数の繰返し利用により1.5倍程度の利活用促進効果を示すことを目標とする。

なお、上記の目標を達成するに当たっての毎年度の目標については、以下の例

を想定しているが、提案する研究計画に合わせて設定して良い。

(例)

<令和2年度>

ア 5G 基地局の共用を実現する広帯域な無線通信システム構成技術

- ・無線ユニット仕様検討
- ・広帯域・複数キャリア RF モジュール開発
- ・広帯域無線通信システム設計、開発
- ・単体試験

イ 有線・無線を統合したネットワーク接続管理・制御技術

- ・トポロジー管理・制御アルゴリズム基本仕様検討
- ・無線フロントホール同士又はアクセスリンク同士の干渉制御を含む無線リソース制御アルゴリズムの検討
- ・各種アルゴリズム評価用計算機シミュレータ開発・シミュレーション
- ・広帯域無線送受信システムへの機能実装

<令和3年度>

ア 5G 基地局の共用を実現する広帯域な無線通信システム構成技術

- ・広帯域無線通信システム開発
- ・結合試験
- ・総合フィールド評価に向けたシステム構築
- ・機能改善検討
- ・拡張機能仕様検討

イ 有線・無線を統合したネットワーク接続管理・制御技術

- ・トポロジー管理・制御アルゴリズム改良
- ・干渉制御を含む無線リソース制御アルゴリズム改良
- ・各種改良アルゴリズム評価用計算機シミュレーション
- ・広帯域無線送受信システムへの機能実装及び評価

<令和4年度>

ア 5G 基地局の共用を実現する広帯域な無線通信システム構成技術

- ・結合試験
- ・総合フィールド評価

イ 有線・無線を統合したネットワーク接続管理・制御技術

- ・総合フィールド評価結果を基に各種制御アルゴリズム改良・拡張機能仕様検討

5. 実施期間

令和2年度から4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とともに国際標準化機関の検討グループの議長等の先導的地位を確保して積極的に貢献するものとする。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引き続き取り組む予定の「本研究開発で確立した技術の普及啓発活動」及び令和7年度までの実用化・製品展開等を実現するため、総務省と関係する事業者と連携し必要な取組を図ることとし、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。

③研究開発成果の情報発信

本研究開発で確立した技術の普及啓発活動を実施すると共に、総務省が別途指定する成果発表会等の場において研究開発の進捗状況や成果について説明等を行うこと。

(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とともに、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、実施計画及び年度目標について具体的かつ実効性のある提案を行うこと。また、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。

なお、「4.(2)技術課題および到達目標」において、技術課題ごとに目標とする諸元を記載しているが、検討の目安として記載したものである。したがって、提案に当たっては、提案者が目標とする性能や現行技術による性能等について、できるだけ詳細に、その根拠とともに記載すること。

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いただくと共に、実際の研究開発の進め方について適宜指導をいただくため、学識経験者、有識者、5G サービスを提供する通信事業者等を含んだ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。

<基本計画書>

同期・多数接続信号処理を可能とするバックスキッタ通信技術の研究開発

1. 目的

産業機械や土木構造物などの人工物の加速度・変位に代表される機械的状态を、無線通信を用いて自動検知し、さらにデータ分析による予知保全を実現することは、中長期的な人手不足の中で、人工物の故障や不具合による損失を未然に防止し、社会の安心・安全を確保するために重要である。この分野は構造健全性診断と呼ばれ、現在多くの場合は人工物の運用を一旦停止し、有線センサを多数取り付けし、試験・点検を行っている。このため試験実施に多くの労務が必要であり、また試験・点検のための運用停止コストも必要となる。このため、高い頻度で試験を行うことが困難なことから、故障や不具合の予知・予測精度も低くならざるを得ない状況となっている。

無線センサ、特にバッテリーレス（電池不要）センサを用いて構造健全性診断ができれば、配線に関する労務を大幅に払拭でき、また人工物運用中にも試験・点検を行え、取得データ数を飛躍的に増大できる可能性があり、それを用いた予知保全につなげることもできる。人工物の機械的状态を無線通信で検知するためには、比較的低速の無線チャネルを多数同期通信させることが必要とされており、かつ、人工物への埋め込みや取り付けのため、端末のバッテリーレス動作が強く望まれている。

バックスキッタ (Backscatter/後方散乱) 通信とは、リーダライタ (読み取り装置) からの変調波によってフォワード回線を構成するとともに、リーダライタが発する給電波に対して少なくとも二値に反射率を変えることのできる端末を用い、電波の反射によってリターン回線を作り出す無線通信方式である。バックスキッタ通信システムは電子タグシステムを中心に現在 920MHz 帯が使われており、電池不要あるいは超低消費電力の超小型端末との双方向の通信を実現できるため、元来通信機能を有さない人工物との通信・センシングに大変有効である。

一方、バックスキッタ通信システムで多数の端末からの同時センシングを限定的な帯域幅 (3.6MHz¹) で安定して実現するためには、センサタグの帯域外輻射による高調波干渉や、隣接するリーダライタによる意図しないバックスキッタによる干渉への対策が必要なことに加え、広範囲の同期通信を可能とするため、複数のリーダライタを用い、周波数資源を再利用しながら覆域を拡大し、相互干渉なく利活用することが課題となっている。

本研究開発は、100 台程度のバックスキッタ通信端末とリーダライタ間の上り回

¹ 長距離バックスキッタ通信に適した 1W 空中線電力のリーダライタがアクティブ RFID システムなどと干渉することがない 916.8, 918.0, 919.2MHz の 3 キャリアを用いた場合の帯域幅

線の同期かつ安定的な伝送技術、移動バックスキヤッタ通信技術、多数の端末と複数リーダライタの利用を可能とする通信制御技術を確立し、上り回線周波数チャネルの稠密配置、重畳利用および繰返し利用を実現することで、920MHz 帯の周波数の更なる有効利用を促進することを目的とする。

2. 政策的位置付け

■未来投資戦略 2018（平成 30 年 6 月 15 日 閣議決定）

3. 「Society 5.0」の実現に向けて今後取り組む重点分野と、変革の牽引力となる「フラッグシップ・プロジェクト」

(3) 「行政」「インフラ」関連プロジェクト

・次世代インフラ・メンテナンス・システムの構築

急速に進展しているインフラの老朽化と中長期的な人手不足に対応し、安全・安心と生産性向上を支えるインフラを適切に管理して良好な資産として次世代に引き継ぐため、徹底したデータ活用とロボット・センサーなどの新技術の開発・導入により、インフラメンテナンスの生産性向上とコスト効率化を大幅に進める。

■電波政策 2020 懇談会（平成 28 年 7 月）

3. 新たなモバイルサービスの実現に向けた検討

(3) モバイルサービスの将来展望と具体的方策

・ワイヤレス IoT・プロジェクト

大多数同時接続モデル：小型・安価・低消費電力の無線端末を実現し、それが極めて多数密集している場合でも、確実にワイヤレス通信を実行。

多様な無線環境を含む IoT システム全体を最適に制御して周波数の有効利用を図る技術等の研究開発を実施。

■国土強靱化基本計画ー強くて、しなやかなニッポンへー（平成 30 年 12 月 14 日）

第 3 章 国土強靱化の推進方針

施策分野ごとの国土強靱化の推進方針

(横断的分野の推進方針)

(E) 研究開発

- 教育・研究機関、民間事業者において優れた人材を育成するとともに、研究開発・技術開発に対するインセンティブを導入して、先端技術の導入促進を進め、国土強靱化に係るイノベーションを推進するとともに、大規模自然災害に対する国・地方公共団体・民間など関係機関の災害対応力の強化等のため、優れた技術や最新の科学技術を活用することで、防災・減災及びインフラの老朽化対策における研究開発・普及・社会実装を推進する。【内閣府（科技）、関係府省庁】

3. 目標

バックスキヤッタ通信は端末に給電しながら無線通信を行うため、現在制度化されている1W 空中線電力のリーダライタを用いても通信距離が10m程度と短く、反射を利用する上り回線は被干渉に脆弱である。さらに、原理的に反射電波の電力や帯域外輻射を制御できないため、端末の多元接続方式の多くは、時間軸での多重化を用いている。このため複数端末からの上り回線の同期通信は実現できていない。つまり現状、バックスキヤッタ通信で同時通信できる端末数は1つの質問器に対して1つのみである。

なお、時分割多元接続方式により複数の端末と通信を行う場合、端末間の精緻な時刻同期と高速送信によって同時通信に近い状況を作り出しているが、多数の端末による同期通信への対応には高精度な時刻同期やサンプリングレートの高速度化等が必要であり、また、高精度クロックやバースト送信のためのバッファ制御に大きな電力を要するため、本研究開発で想定しているバックスキヤッタ通信には不向きである。

人工物の保守点検における産業的要求条件として、同時通信可能なセンサ端末は100台程度が想定されており、このような多数の端末からの無線通信が同期かつ時間連続（ストリーミング）で行えるようになれば、振動状態の観測による人工物の構造的不具合・故障診断や、産業ロボットなどの機構制御が電池不要端末で実現でき、通信機能を元来有さない人工物の状態を遠隔で容易に観測・制御できるようになる。また、端末が超小型かつ電池不要であることは、配線や電池交換コスト低減のみならず、センサ端末自体や接続に必要なケーブルの重さなどによる試験精度の劣化防止や宇宙環境など厳しい環境下での電池爆発などの危険回避の面からも望ましい。さらにリーダライタや端末が移動可能になれば、移動する人工物の点検・観測や移動しながらの観測も可能となる。

本研究開発では、上述の社会的期待に応えるため、広範囲かつ多数のセンサからの同期多元接続通信を可能とするバックスキヤッタ通信の変復調技術及び同期ストリーミングを実現するための割当てチャンネルの最適化、通信制御方式及び複数のリーダライタの同期による覆域結合を可能とする信号処理技術等の開発・検証を行い、センサ端末からの応答波1チャンネルの同時利用端末数を平均で2台以上とすることで周波数利用効率を2倍以上とすることを目指す。なお、1つのセンサ端末が選択可能な応答波チャンネルは30チャンネル程度とすることを前提とする。

具体的な目標は、以下のとおり。

項目	目標
バックスキヤッタ通信における同期ストリーミング通信の実現	920MHz帯(3.6MHz帯域幅)において、センササンプリング周波数100Hzで100ch以上あるいはサンプリング周波数1kHzで30ch以上の通信をバッテリーレス端末により、同期誤差をサンプリング周期の1%以下で実現。

バックスキヤッタセンサ感度	加速度センサ装備のバッテリーレスセンサで人工物の材質等に関わらず-15dBm 以上を実現。
移動バックスキヤッタ通信方式の実現	リーダライタあるいは人工物に取り付けたバックスキヤッタ端末群が 55km/h 以上で移動した状態でも同期ストリーミングを実現。
同期バックスキヤッタ通信における通信制御方式	多数のバックスキヤッタ通信端末に対して、周波数利用効率を損なうことなく、上り回線のチャンネル割り当て、ストリーミング通信の開始・停止を制御する通信プロトコルを実現。
周波数を有効利用するバックスキヤッタ通信覆域の柔軟な拡大	複数のリーダライタの同期による覆域間相互干渉を除去する信号処理技術等により、複数のリーダライタを用いてバックスキヤッタ通信覆域を柔軟に設計することで、周波数チャンネルの同時利用を可能とし、2倍以上の周波数利用効率を実現。

なお、本研究開発においては、センサ端末の無線部分（RFIC）の開発を対象としており、センサの種類が異なっても RFIC の要求仕様は基本的に変わらないため、振動検知など産業用途における流用性の高い加速度センサを用いることを前提とする。

4. 研究開発内容

(1) 概要

3章の目標を達成し、限られた周波数帯で多数のバッテリーレス端末からの同期通信を実現するために必要な、バックスキヤッタ通信における同期多元接続方式及び多数端末の通信制御方式に関する研究開発を行い、920MHz 帯における高効率な周波数利用技術の確立を図る。

(2) 技術課題および到達目標

技術課題

バックスキヤッタ通信は、端末側での帯域外輻射抑圧や反射電力制御ができないため、従来は時間スロットを用いた時分割多元接続が主流であり、多チャンネル同期通信は実現できていない。また、超小型端末をバッテリーレスで動作させチャンネルを多数確保するためには、端末の周波数安定度が確保できないことや、リーダライタ送信器などの電波源から受信機への給電波の漏れ込みおよび反射による位相雑音の軽減についても考慮する必要がある。加えて、自動車走行時の多地点

センシングや、リーダライタの自動車やドローンなどへの搭載による人工物のセンシングを行うためには、リーダライタやセンサが移動する伝搬環境におけるバックスキャッタ通信に対応する変復調技術が必要となる。

また、多数のセンサ端末による同期ストリーミング通信を行うためには、端末の識別子を短時間で効率的に呼び出すインベントリ（マルチリード）機能や端末を1つ1つ指定しながらメモリへの読み出し・書き込みを行うアクセス機能に加えて、センサ端末からの応答波チャネルの適切な割り当て、同期ストリーミングのための通信制御技術の開発が必要となる。さらに、大型あるいは複雑な形状の人工物の状態を検知する際は、人工物内に広範囲に散在する多数のセンサ端末の読み取りのため、異なるキャリア周波数を用いる複数リーダライタあるいは複数の受信アンテナによって複数の読み取りゾーン（覆域）を構成し、覆域を相互に補完する必要がある。

以上を踏まえ、本研究開発では、表1に示す産業的要求仕様を想定し、移動時も含め、サンプリング周期の数%程度の同期精度を実現できる同期多元接続によるストリーミング通信の実現のため、以下の技術を確立することで、複数のリーダライタの同期による覆域の結合や、複数のバックスキャッタ端末による同一周波数チャネルの同時利用により、周波数利用効率を2倍以上とする。

- ・ 移動時（55km/h 以上）を含めた高精度同期多元接続方式
- ・ 高感度バックスキャッタセンサ
- ・ バックスキャッタ通信による同期多元ストリーミング通信を実現する通信プロトコル
- ・ 複数のリーダライタの同期による覆域の結合、相互補完を実現する信号処理技術

表1 人工物の保守点検における同期無線センシングへの産業的要求仕様

分野	端末取付箇所	サンプリング周波数	同期通信チャネル数	保守点検等目的・用途
自動車	タイヤ、車体、バネ、チャイルドシート	500Hz～20kHz	～64ch	タイヤ内部・車両走行時車両挙動の把握/衝突時のチャイルドシートの挙動試験
インフラ	構造物・橋梁	100Hz～500Hz	～100ch	振動時の多点加速度・ひずみ試験変位（たわみ）、振動、ひずみ（亀裂）の把握
機械・プラント	設備機械	100～200Hz	～10ch	エラー時の現象（ひずみ・振動・圧力・温度）把握
建設機械	建機	1～15kHz	～32ch	建機の挙動把握
鉄道	台車	1～2kHz	数 10ch	鉄道台車の振動・ひずみ・温度測定の挙動把握

人間工学	人体	100Hz～1kHz	～10ch	スポーツ、リハビリ時の各箇所 の挙動把握
航空宇宙	機体・ミッション機 器など	100Hz～15kHz	100ch 以上	ひずみセンシング、モーダル 試験、音響試験

なお、バッテリーレスセンサの感度は、多くの利用が見込まれる MEMS 加速度センサを搭載した場合において、4W EIRP のリーダの正対方向で 10m の離隔距離を達成できる性能として、-15dBm を前提とし、この感度を取り付けあるいは植え込み対象人工物の材質や形状などに関わらず達成するアンテナ設計・タグ取り付け実装技術を LSI 開発により実現する（ただし金属に囲われた内部や水中など 920MHz を利用した場合、通信が困難で非現実的となる人工物や使用環境は除外してよい。）

また、移動時の速度は、典型的な移動用途である自動車衝突センシングの基準である 55km/h 以上を前提とする。

到達目標

上記の課題を達成するため、以下を目標とする。

- a. 920MHz で連続送信可能である 3 キャリア (3.6MHz 帯域幅) を用いて 100Hz サンプリングレート 100ch、設定を切り替えることで 1kHz サンプリングレート 30ch 以上の加速度センサを用いた同期多元接続方式をサンプリング周期の 1% 以内の同期誤差 (物理層) で実現。
- b. 取り付けあるいは植え込み対象人工物の材質や形状などに関わらず、加速度センサ装備のバッテリーレスセンサを感度-15dBm で実現。
- c. 移動利用の場合、速度 55km/h 以上で移動するバックスキヤッタ端末群あるいは移動リーダライタで同期データストリーミングを実現。
- d. バックスキヤッタ通信において、インベントリ機能、アクセス機能、チャンネル割り当て機能、ストリーミング制御機能、移動時にも対応できるウェークアップ・再送制御機能などを有する通信プロトコルを開発。
- e. 100ch のバックスキヤッタ端末群に対して、各通信チャンネルの品質を総合的に最適化するチャンネル割り当てをインベントリを含めて 1 秒以内に完結する通信制御方式を実現。
- f. 複数のリーダライタの同期による覆域の結合や、複数のバックスキヤッタ端末による同一周波数チャンネルの同時利用により、利用可能な周波数の帯域幅を 2 倍以上とする。なお、必要同期精度は多元接続方式やデータフレーム構成に依存するが、データリンク層 (MAC 層) においても、最大サンプリング周期の 1% 程度を実現すること。

上記の目標を達成するに当たって年度毎の目標については、以下を想定してい

る。

<令和2年度>

主にリーダライタおよびバックスキュッタセンサの基本設計、要素技術の開発と機能モデル試作を実施する。

- ・ 同期多元接続方式の基本構想の妥当性を、ソフトウェア無線装置を用いたリーダライタとディスクリット試作品による双方向通信バックスキュッタシステムを試作して評価する。
- ・ 既存電波法令での試作評価を念頭においたリーダライタアーキテクチャを検討する。
- ・ センサに関する高圧・超低温・超高温等の利用環境の調査を行うとともに、利用環境に適合するための要件等について検討する。
- ・ 同期ストリーミング通信のための通信プロトコルの基礎検討を行うとともに、複数リーダライタによる覆域拡大に必要な同期方式についてシミュレーション評価および試作により確認する。

<令和3年度>

基本設計・検討に基づきリーダライタおよびバックスキュッタ装置の試作を行い、性能・機能の評価する。変復調方式実装が目標cを満足することを確認する。

- ・ 移動バックスキュッタシステムに対応する変復調方式について検討する。
- ・ リーダライタユニット装置の基本設計を行うとともに、同期バックスキュッタ受信と干渉除去等に特化した部分試作によって性能評価する。
- ・ バッテリレスセンサのLSI基本設計とFPGA/ディスクリット実装試作による設計評価およびバッテリレスセンサ基本設計を実施する。また端末を稠密に配置することによる相互干渉の影響についても検証し、その改善策を検討する。
- ・ 複数リーダライタシステムの覆域合成方式の検討を行うとともに、部分試作により方式の妥当性を確認する。
- ・ インベントリ、チャネル割り当て、ストリーミング制御及び、移動時にも対応できるウェークアップ・再送制御の連携した動作を試作リーダライタとディスクリットセンサによって確認する。

<令和4年度>

チップメーカー等と連携したバックスキュッタLSIセンサの試作により目標bを満足するバッテリレス動作を実現するとともに、通信プロトコルを動作させ性能が目標d,eを実現することを確認する。

- ・ 用途に応じたセンサを選択可能なバッテリレスLSIセンサの試作および通信プロトコルの部分モデルを組み込んだリーダライタの開発を行い、それらを組み合わせた双方向通信機能を実現する。センサに関しては、令和2年度に検討した利用環境への適合性も考慮した上で、取り付け人工物の材質や形状などに関わらず安定して

性能を達成する実装技術の開発も行うこと。

- ・ 複数リーダライタの受信データ合成による覆域間干渉除去アルゴリズムと通信プロトコルスタックを連動させるリーダライタシステムを構築する。
- ・ 機械振動試験システムなど既存の有線接続同時センシングシステムを本ボックスキャッタ通信システムの適用でワイヤレス・バッテリーレスシステム化する。

<令和5年度>

複数リーダライタを連携したボックスキャッタ通信システムを産業機械などの人工物に取り付けて動作させ、目標 a, f を実現する。

- ・ 令和4年度までに開発した技術をリーダライタ、ボックスキャッタ端末に組み込み、実証評価を行う。
- ・ 通信プロトコルに関して共用のための技術条件等を整理し、国際標準団体等への情報提供を行う。
- ・ 構造健全性試験、衝突試験、モーダル解析など各種産業分野における有効性を検証する実証実験を実施し、機能性能を評価するとともに、利用環境や測定対象人工物に関わらず性能・機能を達成するように技術の完成度を高める。

なお、実証実験の内容は、研究開発体制として設置する有識者・エンドユーザからなる研究開発運営委員会と調整しながらして決定すること。また、実証モデルとしては、現在、有線加速度センサを用いて実現している多チャンネル振動試験装置やハンマリング試験装置等を想定し、電池なし無線センサ群を利用することの有効性を既存の有線システムとの直接比較によって示すこと。具体的には、到達目標の a(狭帯域信号の場合)、b、d、e 及び f の性能が目標に達しているか定量評価するとともに、a(広帯域信号の場合)及び c については、自動車の衝突試験やドローンを用いた振動試験の実施により目標に対する到達度を評価する。

5. 実施期間

令和2年度から令和5年度までの4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引き続き取り組む予定の「本研究開発で確立した技術の普及啓発活動」及び令和6年度までの実用化・製品展開等を実現するために必要な取組を図ることとし、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。

(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、実施計画及び年度目標について具体的かつ実効性のある提案を行うこと。

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頂くと共に、実際の研究開発の進め方について適宜指導を頂くため、学識経験者、有識者等を含んだ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。

バッテリーレスセンサの開発においてはチップメーカー等と連携し、プロセスや設計において既存技術を十分活用するように留意すること。

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。

＜基本計画書＞

電波の有効利用のための IoT マルウェア無害化/無機能化技術等に関する研究開発

1. 目的

2020 年には、全世界の IoT 機器は 400 億台を超えると予測されているなか、IoT 機器は医療や農業、自動車をはじめとする多くの業界での利用に加え、新たなワイヤレス通信インフラとなる 5G においても、その活用は大きく注目されている。一方でこれらの IoT 機器に感染し、大量の不正な無線通信を行うマルウェアも増加傾向にあり、それに伴う無線リソースのひっ迫が懸念されている。

国立研究開発法人情報通信研究機構（NICT）がサイバー攻撃活動の観測・分析結果として公表している「NICTER 観測レポート 2018」によると、2018 年に観測された攻撃回数は 3 年前の約 4 倍に増加しており、そのうちのおよそ半数が IoT 機器を狙った攻撃であった。実際に、2016 年 10 月にはマルウェア Mirai に感染した 10 万台以上の IoT 機器を踏み台にした DDoS 攻撃により、米国 DYN 社の DNS サービスが停止するという事案が発生した。また、2018 年 5 月には世界 54 カ国で 50 万台を超える IoT 機器が マルウェア VPNFilter に感染していることが確認されている。近年、このような IoT 機器を踏み台とした大規模な攻撃（数百 Gbps から 1Tbps を超えるトラフィック）が度々確認されており、電波の有効利用の観点から対策が急務となっている。

本研究開発では、その原因の根本となる IoT マルウェア及び関連情報の詳細分析技術の開発を行うとともに、遠隔からの IoT マルウェアの無害化及び無機能化が実現できるようにし、上記に示す不正/不要/不健全な無線通信トラフィックの発生を抑制することで、安心・安全な IoT 機器の利活用を促進するとともに、IoT 環境における無線リソースひっ迫の解消を図る。

2. 政策的位置付け

- ・電波有効利用成長戦略懇談会 報告書（平成 30 年 8 月 31 日 総務省）

第 2 章 電波利用の将来像と実現方策

5. ワイヤレスがインフラとなる社会の実現に向けた取組

（2）ワイヤレス成長戦略政策パッケージ

（ア）技術を創る（研究開発プロジェクト、実証・イノベーション等）

⑥ 高い信頼性を備えたワイヤレス環境

- ・IoT 無線機器の爆発的な普及に伴い、IoT 無線機器の認証データの増大による無線ネットワークへの負担増大や、IoT 無線機器が DDoS 攻撃等の踏み台として悪用されるセキュリティ脅威等が増大している。このため、安心・安全なワイヤレス環境の実現に向けた、サイバーセキュリティに関する研究開発等を推進することが必要である。

・「サイバーセキュリティ戦略」（平成 30 年 7 月 27 日閣議決定）

4. 目的達成のための施策

4.4. 横断的施策

4.4.2. 研究開発の推進

(1) 実践的な研究開発の推進

- ・我が国が、サイバー攻撃に対する検知・解析能力を含むサイバー空間の状況把握能力を高め、防御等の対処能力や強靱性の確保等サイバー空間における安全保障の確保にも資する研究開発を推進する。具体的には、政府機関や企業等の組織を模擬したネットワークに攻撃者を誘い込み、攻撃活動を把握することや、ネットワーク上の脆弱な IoT 機器の調査のための広域ネットワークスキャンの軽量化を目指した研究開発等を進める。

・「サイバーセキュリティ研究・技術開発取組方針」（令和元年 5 月 17 日
サイバーセキュリティ戦略本部 研究開発戦略専門調査会）

4. 今後の取組強化の方向性

③ 攻撃把握・分析・共有基盤の強化

- ・サイバー攻撃の巧妙化・複雑化・多様化や、IoT 機器の普及に伴う脆弱性拡大等のサイバー攻撃の脅威動向に適切に対処するため、AI 等の先端技術も活用しつつ、サイバー攻撃の観測・把握・分析技術や情報共有基盤を強化する。

3. 目標

IoT 機器の急速な普及に伴う近年の多様な通信環境において、セキュリティ上の問題により発生する不正/不要/不健全な無線通信トラフィックに対応するため、（ア）各種サイバー攻撃データやマルウェアの解析に基づく、IoT マルウェアの挙動検知及び駆除技術、（イ）マルウェアに感染した IoT 機器を安全に無害化及び無機能化する技術をそれぞれ確立する。DDoS 攻撃の規模、被害は年々拡大しており、本研究開発が終了する令和 4 年には、平成 30 年の約 1.6 倍のトラフィックになるとの試算がある。本研究開発により、IoT 機器に感染し大規模な攻撃活動を行うマルウェアのうち 6 割に対して、駆除や無害化などを実現する。その結果、感染した IoT 機器による不正通信に対して 6 割程度の通信量削減効果を得ることで、無線リソースのひっ迫を解消し、電波の有効利用を図る。

4. 研究開発内容

(1) 概要

近年、IoT 機器を狙ったサイバー攻撃が増加している。マルウェアに感染するなどして攻撃者に IoT 機器を乗っ取られると、当該機器を踏み台としたサイバー攻撃に悪用され、不正な無線通信を大量に発生させるおそれがある。具体的な事例では、平成 29 年に国内通信キャリアが提供するモバイルルータが大量にマルウェアに感染し、1 日に最大で約 14,000IP アドレスからの攻撃が観測された。Mirai 等に代表

される IoT マルウェアは、感染時に 100Mbps を超える攻撃通信を発生させる能力があるとされており、大規模な感染が発生すると大量の不正通信によって無線リソースが消費される可能性がある。

このような IoT 機器を悪用した攻撃に起因する不正な無線通信を抑止するためには、IoT 機器の利用特性を考慮した上で、感染したマルウェアの駆除または無害化や、当該機器の使用停止などを行えるようにすることが重要である。従来、このような場合には端末にマルウェア対策ソフトをインストールすることが一般的であったが、IoT 機器においてはリソースの制約等により困難な場合が多く、マルウェア対策ソフトによらず、IoT マルウェアを駆除及び無害化/無機能化する新たな技術の確立を目指す。

本研究開発では、Web カメラ、ネットワークプリンタ、ルータ等の IoT 機器の通信に利用される LPWA、WPAN、無線 LAN、セルラー（LTE、4G、5G）、広帯域移動無線アクセスシステム（BWA）等の無線ネットワークにおいて、マルウェア感染による不正/不要/不健全な無線通信を抑止するため、様々な手法により収集したサイバー攻撃関連データ分析やマルウェア挙動解析に基づく IoT マルウェアの挙動検知及び駆除技術、マルウェアに感染した IoT 機器を安全に無害化及び無機能化する技術を開発する。これにより、従来時間を要していたサイバー攻撃やマルウェア挙動解析に要する時間、IoT 機器に感染しているマルウェアが存続する期間が大きく短縮され、その結果、不正/不要/不健全に利用される無線リソースを大幅に軽減することができる。

(2) 技術課題および到達目標

技術課題

ア IoT マルウェアの挙動検知及び駆除技術

ア① 高度 IoT ハニーポットによるマルウェア詳細分析及び駆除技術

IoT 機器を狙ったサイバー攻撃は多様化しており、従来から悪用されている Telnet を介した侵入だけでなく、IoT 機器が有する様々な脆弱性を突いた攻撃が増加している。また、これまで IoT 機器に感染したマルウェアの多くは、機器の再起動により自動的に削除されたり、活動を停止したりすることが知られていたが、2018 年に持続感染性を有する（再起動後も活動を継続する）マルウェア VPNFilter が報告され、その後も多くの持続感染性を有する IoT マルウェアの事例が見つかっている。

マルウェア挙動解析のためにはハニーポットによるマルウェアの捕獲が重要な技術となる。従来の IoT 向けハニーポットは、Telnet などの特定のサービスの脆弱性を狙う IoT マルウェアを対象としており、事前に想定されたサービス群への攻撃を観測するものであった。そのため、IoT 機器が有する様々な脆弱性を突いた新しい攻撃の観測を行い、最新の IoT マルウェア検体をタイムリーに収集できることが重要である。さらに、収集した IoT マルウェアに対して、持続感染性の有無や持続感染のメカニズムを分析する技術、IoT 機器の所有者

による駆除方法を導出する技術が求められている。このため、以下の研究開発を行う。

- ・Telnet など特定のポートやサービスに限定せず、攻撃対象となっている機器やサービスの変遷に応じて、様々な攻撃を柔軟に観測可能な高度 IoT 向けハニーポットを開発し、日々新たに発生する IoT マルウェアの収集技術を確立する。
- ・ハニーポットで収集したマルウェア検体の挙動解析により、持続感染性を有する IoT マルウェアの特徴的な挙動（例：不揮発性メモリ領域への書き込み等）を解析し、持続感染性の有無の判定及び持続感染メカニズムの解析を行う。さらに、これらの分析に基づき、IoT 機器上で IoT マルウェアを駆除する技術を開発し、感染機器の所有者自身で実施できる駆除方法を確立する。

ア② 各種サイバー攻撃情報に基づくマルウェア挙動分析及び早期検知技術

感染したマルウェアの活動が活性化すると、インターネット上の通信やシステムでの挙動などに、様々な形でその活動の痕跡が現れる。そのような情報の収集・調査によるサイバー攻撃の統計的な分析・評価は行われているが、マルウェア挙動分析を含めたサイバー攻撃の状況を正確に把握するには至っておらず、サイバー攻撃の初期挙動の自動的な検知・把握を行うことは重要な課題となっている。

近年、サイバーセキュリティに関連する大量のログデータなどの情報から特徴量を高速かつ効率的に処理・分析するために、機械学習の有用性が報告されている。そこで本研究開発では、機械学習等の技術を用いて、サイバー攻撃の全体像を把握し、サイバー攻撃の初期挙動を自動的に検知するための技術を確立する。具体的には、大量の通信データから収集できるサイバー攻撃関連情報、各種ブラックリスト等の脅威インテリジェンス情報、及び Web 上の様々なセキュリティに関する情報等を収集し、機械学習等の技術を用いてマルウェア挙動分析、攻撃の全体像の把握、及び攻撃の初期挙動を検知するため、以下の研究開発を行う。

- ・インターネット上で観測される、大量のスキャン等の攻撃通信データから IP アドレス、利用ポート番号、通信タイミング等の情報を抽出・整理し、機械学習等により分析することで、新たなマルウェアの発生や攻撃パターンを早期に検知する技術を開発する。
- ・マルウェアが C&C サーバ等の攻撃インフラに接続する通信の観測・分析を実施することにより、攻撃者の悪意ある挙動やその時間的な変化、マルウェア活性化のタイミング、攻撃インフラの変化（C&C サーバの変更等）など、サイバー攻撃活動の実態を把握し、IoT マルウェアによる大規模な攻撃の予測やテイクダウン等の対策に資する技術を開発する。

- ・セキュリティ監視機器等から出力される警告情報や各種ログ情報等について、機械学習等により異常性を分析・検知することで、悪性の通信やマルウェアの活動を効率的かつ早期に検知する技術を開発する。
- ・各種ブラックリスト等の脅威インテリジェンス情報や脆弱性情報、また Web 上のセキュリティに関する情報等を収集し、相互の関係性を分析することにより、マルウェアの活動や攻撃キャンペーン、そして攻撃者関連情報等を導出し、サイバー攻撃の早期検知に資する技術を開発する。
- ・上記の各種情報や課題ア①における IoT マルウェア解析情報（マルウェア感染情報、挙動情報等）等の異なる情報源について、様々な方法で多面的に機械学習等を用いて相関解析することにより、サイバー攻撃の全体像を把握するとともに、新たなサイバー攻撃の初期挙動を検知するための総合的な分析環境を構築する。

イ 遠隔からの IoT マルウェア無害化及び無機能化技術

マルウェアに感染した IoT 機器に対しては、ファイアウォール等で C&C サーバへの通信を遮断することにより無害化する対策が知られている。しかし、C&C サーバへの通信を完全に遮断することは難しいだけでなく、感染した IoT 機器内のマルウェアは活動し続ける可能性が高いため、IoT 機器本来の機能・性能に悪影響を与えてしまう。IoT 機器にマルウェア対策ソフトをインストールすることもリソースの制約等により困難な場合が多く、実用的な無害化の対策技術とはなっていないのが現状である。

さらに、本来は撤去・廃棄されるべき IoT 機器が、管理主体が曖昧なまま放置され続けることより、不要な無線通信やマルウェア感染による不正な無線通信を行い続けることについても問題となっていることから、IoT 機器への対策ソフト等のインストールを行わずに、マルウェアに感染した IoT 機器や不要となった IoT 機器による不正な無線通信を停止することを目的として、以下の研究開発を行う。

- ・課題アにおいて得られる結果を活用し、C&C サーバとマルウェアとの通信等の分析を行い、IoT マルウェアに対して自己停止を誘発させる等により無害化/無機能化するための情報（以下「無害化/無機能化情報」という）を抽出する。攻撃者の C&C サーバを模擬した疑似 C&C サーバを構築し、抽出した情報をマルウェアに対して送信することで、IoT 機器内でのマルウェアの活動を停止させる技術を開発する。
- ・マルウェアの亜種が大量に生成される中、最新の IoT マルウェアに対応するため、継続的にかつ迅速にマルウェア解析を行う必要がある。このため、無害化/無機能化情報の抽出を自動化し、常時更新することによって未知の脅威に迅速に対応する技術を開発する。
- ・不要となった IoT 機器を、外部モジュール等を用いて遠隔から安全に機能停

止させるための技術を開発する。停止対象の IoT 機器のみを安全に停止させるための、認証信号の生成手法、管理手法を確立する。

到達目標

ア IoT マルウェアの挙動検知及び駆除技術

ア① 高度 IoT ハニーポットによるマルウェア詳細分析及び駆除技術

高度 IoT ハニーポットによる攻撃観測に基づき、大規模攻撃の対象となっている IoT 機器群と当該機器を狙う IoT マルウェア検体群を特定する。さらにこれらの IoT マルウェア検体群と IoT 機器群の組み合わせに対して 90%以上の精度で持続感染性の有無を判定する技術を確立する。また、評価対象の IoT マルウェア検体群と IoT 機器群に対し、70%以上の成功率で駆除する技術を確立する。これにより、約 6 割の IoT 感染マルウェアを駆除し、大規模感染インシデント時に発生する DoS トラフィックを約 6 割削減できるため、無線リソースのひっ迫を解消することが可能となる。

ア② 各種サイバー攻撃情報に基づくマルウェア挙動分析及び早期検知技術

各種サイバー攻撃情報に基づく複数の分析結果及び課題ア①の分析結果を、機械学習等の技術を用いて多面的に統合・相関解析を行うことにより、攻撃の全体像を把握するとともに、攻撃の初期挙動を早期に自動検知する技術を開発し、重要なセキュリティイベントの発生検知に要する分析時間を、従来の人手で行っていた時間の 3/10 以下に短縮する。分析時間の短縮によりインシデント対応を早期に開始することで、大規模感染インシデントが発生した場合の無線リソースへの影響を軽減・抑止することができる。

イ 遠隔からの IoT マルウェア無害化及び無機能化技術

評価検証対象の IoT マルウェア検体群に対して 70%以上の精度で無害化/無機能化情報の有無及びその抽出可否を判定した上で、抽出可能な情報を自動抽出する技術を確立する。また、無害化/無機能化情報を抽出できた IoT マルウェアに対しては、90%以上の精度で実際に無害化/無機能化を行う。これにより、約 6 割の IoT 感染マルウェアを無害化し、大規模感染インシデント時に発生する DoS トラフィックを約 6 割削減できるため、無線リソースのひっ迫を解消することが可能となる。さらに、不要となった遠隔信号受信可能な IoT 機器に対して、99%以上の精度で安全に遠隔から機能停止を行うことを目標とする。

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

<令和2年度>

ア IoTマルウェアの挙動検知及び駆除技術

ア① 高度IoTハニーポットによるマルウェア詳細分析及び駆除技術

高度IoTハニーポットのプロトタイプを開発し、試験的にIoTマルウェア検体収集を開始する。また、マルウェア詳細分析手法及び駆除手法の検証のためのプロトタイプを開発し、試験用のIoTマルウェア検体群について持続感染性分析や駆除方法の導出が可能であることを実証する。

ア② 各種サイバー攻撃情報に基づくマルウェア挙動分析及び早期検知技術

インターネット上の攻撃通信データの分析や脅威インテリジェンス情報等から得られる複数の情報群を様々な方法で多面的に統合・相関解析を行う分析プラットフォームを設計し、そのプロトタイプを構築する。

イ 遠隔からのIoTマルウェア無害化及び無機能化技術

IoTマルウェアの無害化/無機能化情報を抽出するための解析環境のプロトタイプを構築し、基本方式を設計する。さらに、疑似C&Cサーバを試作しIoTマルウェアに無害化/無機能化情報を送る機能を検証する。また、IoT機器を遠隔で確実に機能停止させるための遠隔安全停止システムの基本設計及びプロトタイプを構築する。

<令和3年度>

ア IoTマルウェアの挙動検知及び駆除技術

ア① 高度IoTハニーポットによるマルウェア詳細分析及び駆除技術

高度IoTハニーポットの実装により、最新のIoTマルウェア検体収集を行う。また、マルウェア詳細分析手法及び駆除手法の実装により、IoTマルウェアの持続感染性分析や駆除方法の導出を行う。

ア② 各種サイバー攻撃情報に基づくマルウェア挙動分析及び早期検知技術

分析プラットフォームのプロトタイプを用いて、各種挙動分析・検知技術の機能評価、性能評価、運用性評価等を実施し、必要な改善を行う。また、課題ア①の成果をベースに、統合・相関解析機能を拡充し、より精度の高いサイバー攻撃の全体像把握や初期攻撃挙動の検知を行う。

イ 遠隔からのIoTマルウェア無害化及び無機能化技術

課題ア①と連携し、その成果を活用することにより、IoTマルウェアの無害化/無機能化情報を抽出するシステムを実装する。さらに、多種多様なIoTマルウェアから抽出した無害化/無機能化情報等をIoTマルウェアに送る疑似C&Cサーバを構築する。また、安全機能停止のコア機能とIoT機器を連動させ、遠隔安全停止システムを実装し、遠隔からの安全な機能停止を行うためのシステム全体を通じた機能検証を行う。

<令和4年度>

ア IoTマルウェアの挙動検知及び駆除技術

ア① 高度IoTハニーポットによるマルウェア詳細分析及び駆除技術

高度IoTハニーポットを実環境上で広域に展開し、最新のIoTマルウェア検体収集を充実化する。また、令和3年度に実装したマルウェア詳細分析手法及び駆除手法に対して総合評価を行い、各技術を改善する。

ア② 各種サイバー攻撃情報に基づくマルウェア挙動分析及び早期検知技術

分析プラットフォームの試験運用を開始し、サイバー攻撃早期検知情報をリアルタイムな警戒情報として掲示できるようにする。また、本試験運用を通じて分析プラットフォームの総合評価を行い、性能及び機能の改善を実施する。

イ 遠隔からのIoTマルウェア無害化及び無機能化技術

令和3年度に実装したシステムを改良し、IoTマルウェアの無害化/無機能化情報の抽出を自動化するとともに、疑似C&Cサーバと連動したシステムを構築する。本システムの総合的な評価を実施し、システムの改善を行う。また、令和3年度に実装した遠隔安全停止システムの総合評価を行い、機能および性能の最適化を実施する。

本研究開発により、IoT機器に感染し大規模な攻撃活動を行うマルウェアのうち6割に対して、駆除や無害化などを実現する。本研究開発が終了する令和4年には、平成30年の約1.6倍のトラフィックになるとの試算があることから、感染したIoT機器による不正通信に対して6割程度の通信量削減効果を得ることで、無線リソースのひっ迫を解消し、電波の有効利用を図る。

5. 実施期間

令和2年度から4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引き続き取り組む予定の「本研究開発で確立した技術

の普及啓発活動」及び令和9年度までの実用化・製品展開等を実現するために必要な取組を図ることとし、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。特に、関連機関へのサイバー攻撃早期検知情報の提供等を継続して行う方策を記載すること。

(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、実施計画及び年度目標について具体的かつ実効性のある提案を行うこと。

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頂くと共に、実際の研究開発の進め方について適宜指導を頂くため、学識経験者、有識者等を含んだ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。特に、先進的なサイバーセキュリティ研究に取り組んでいる大学、国立研究開発法人、セキュリティベンダー等による密な連携を前提とし、無線通信分野の研究者も交えて議論を行える体制を構築すること。加えて、技術開発だけにとどまらず、サイバーセキュリティに関する人材育成、普及にも留意すること。また、本研究開発成果がマルウェアによる無線通信トラフィックの抑制に効果があることを具体的に示すこと。

＜基本計画書＞

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

1. 目的

近年の社会経済活動のグローバル化・多様化に伴い、空や海における広範な活動領域におけるブロードバンド環境や、地上においても携帯電話網や光ブロードバンドのエリア外におけるネットワークなどへのニーズに基づき、衛星通信への期待が増大しつつある。また、大規模災害時において、陸上移動通信システムが復旧するまでの補完システムや緊急通信システムとしての衛星通信のニーズも高まっている。

一方、使用周波数帯の観点からは、Ku 帯までの比較的低い周波数帯については世界的にも周波数逼迫が懸念されているため、Ka 帯以上の周波数帯において広帯域を使用する衛星通信への関心が高まっている。

欧米では、ブロードバンド環境を提供しつつ上記のひっ迫状況に対応するため、ハイスループット衛星 (High Throughput Satellite : HTS) と呼ばれる通信容量の大容量化を狙った衛星通信システムの開発が進んでいる。HTS は広帯域を確保可能な Ka 帯以上の周波数帯の利用、100 ビーム級のマルチビーム構成による高い周波数利用効率、複数ゲートウェイ地球局の利用によって大容量化を実現する。しかしながら、Ka 帯においては近年、固定通信や移動通信などの地上回線と衛星回線の双方での利用が進み、周波数の効率的な運用や他のシステムとの共用が求められている。

従来の衛星通信においては、ユーザビーム毎に固定的に割り当てられた帯域内で各ユーザ端末に必要な帯域を割り当てており、通信可能なエリアやフィーダリンクなども固定的であった。一方で、技術試験衛星 9 号機 (ETS-9) に代表される次世代の HTS においては、衛星搭載機器の高速大容量化とともに、フレキシビリティ化として、ユーザビームの利用周波数帯域の幅や、ユーザビームの形状・位置、フィーダリンク及びゲートウェイ地球局が変更可能となっている。

しかし、限られた周波数の中でこれらを有効に機能させるためには、衛星通信システムとして、5G 網や IoT 網などへの接続に対応した衛星通信システムであると同時に、ユースケース毎のニーズやその変動、電波伝搬状況などを総合的に考慮して、各ビームの周波数帯域の幅、及び各ユーザ端末への帯域割当、各ビームの形状・位置の制御、フィーダリンク及びゲートウェイ地球局の選択などを最適化し、衛星が使える周波数を有効に利用する必要がある。

そのため本研究開発においては、次世代 HTS を用いた衛星通信システムにおいて、周波数リソースをより効率的に利用するために、5G 網など地上の通信システムと円滑な接続を実現する仕組みを研究するとともに、ユーザリンクにおいて、地理的・

時間的に変動する複数の衛星通信サービス（ユースケース）に対して必要とされる通信容量等に対し、割当てられる周波数リソース量の過不足を最小限に抑え、最適化を行う役割を持つ制御システムの研究開発を行う。さらに、フィーダリンクにおいては、気象状況に応じて、Ka 帯の地球局を変更し、伝送速度を維持/改善することや、気象状況に応じて他の回線を利用することにより、フィーダリンクで利用していた Ka 帯を他のシステムで使えるように解放する役割を持つ制御システムの研究開発を行う。

2. 政策的位置付け

- ・宇宙基本計画（平成 27 年 1 月 9 日 宇宙開発戦略本部決定）

「通信・放送衛星に関する技術革新を進め、最先端の技術を獲得・保有していくことは、我が国の安全保障及び宇宙産業の国際競争力の強化の双方の観点から重要である。このため、今後の情報通信技術の動向やニーズを把握した上で我が国として開発すべきミッション技術や衛星バス技術等を明確化し、技術試験衛星の打ち上げから国際展開に至るロードマップ、国際競争力に関する目標設定や今後の技術開発の在り方について検討を行い、平成 27 年度中に結論を得る。これを踏まえた新たな技術試験衛星を平成 33 年度（令和 3 年）をめどに打ち上げることを目指す」旨が記載されている。

- ・宇宙基本計画工程表（令和元年 12 月 13 日 宇宙開発戦略本部決定）

「技術試験衛星（9号機）の衛星バス及びミッション機器ともに詳細設計やプロトフライトモデル製作・試験、各種試験等を継続し、2022 年度の打上げを目指す。その後、5G・IoT 等の地上システムと連携した次世代ハイスループット衛星の実現のための実証実験等を行う。」旨が記載されている。

- ・統合イノベーション戦略 2019（令和元年 6 月 21 日 閣議決定）

「国際競争力強化を目指した H3 ロケットの開発、情報収集衛星の機数増及び機能保証強化、先進光学・レーダ衛星の開発、技術試験衛星の開発等を行う。」旨が記載されている。

- ・デジタル変革時代の ICT グローバル戦略懇談会 報告書（令和元年 5 月 31 日）

「衛星及び地球上のネットワークがシームレスに連携した基盤が実現する」旨が記載されている。

- ・宙を拓くタスクフォース 報告書（令和元年 6 月 7 日）

「衛星通信技術の高度化等」について記載されている。

3. 目標

衛星と各ユーザとの通信に用いる電波（ビーム）の周波数の幅や電波の届く範囲といった衛星の持つリソースの配分を最適化するための制御技術を確立することで、限られた周波数においても多様なサービスへの対応や大容量通信を可能とする。これにより、従来のフレキシビリティを持たないベントパイプ型 HTS 衛星通信システムに比べユーザリンク、フィーダリンクの相乗効果により周波数利用効率を2倍に改善し、周波数の有効利用の一層の向上に繋げる。

4. 研究開発内容

(1) 概要

従来の衛星通信の地上系システムにおいては、複数存在するユーザビーム毎に固定的に割り当てられた帯域内で各ユーザ端末に対して必要な帯域を割り当てていた。また、通信可能なエリアについても固定されていた。

一方、ETS-9 においては、衛星搭載機器の高速大容量化とともに、フレキシビリティ化を図ることにより、ユーザビームの利用周波数帯域や、ユーザビームの形状・位置、Ka 帯や他の回線を利用した複数のフィーダリンク及びゲートウェイ地球局などの選択及び周波数割り当てを変更することが可能な次世代の HTS 衛星の実現を目指している。

本研究開発では、フレキシビリティ化を実現し、衛星通信に対する多様なニーズに対応するため、各ユーザ側が用いている衛星端末システムとフレキシブルな HTS 衛星及びゲートウェイ地球局等の地上系システムからなる衛星通信システムが円滑に接続するとともに、ユーザ側のニーズや天候状況、及びそれらの変動を総合的に考慮して、各ビーム及び各ユーザ端末への帯域割当や、各ビームの形状・位置の変更によるエリアの制御、フィーダリンク及びゲートウェイ地球局の選択を適応的に最適化する技術の研究開発を行う。

本研究開発は、以下に提示する各技術課題の解決に向け、地上にて方式検討・作製・評価を行った後、2022 年度に打上げ予定の ETS-9 を利用して、軌道上実証実験を行うこととする。

そのため、各技術課題の受託者は互いに協力し、合意形成を図りつつ連携を行うこと。

※ 本研究開発は各ユーザビームの利用周波数帯域幅の変更機能（デジタルチャネライザ）や、ユーザビームの形状・位置の変更機能（デジタルビームフォーミング）、Ka 帯通信機能（ユーザリンク、フィーダリンク（アップリンク：27.0-31.0GHz、ダウンリンク：17.7-21.2GHz を想定）、光通信（フィーダリンク）の機能、及び電波通信と光通信の両方で使う共通部（ビーコンなど）の機能を持つ通信用機器（総務省が用意したものを利用可能^(注)。以下ミッションという。）を ETS-9 に搭載した上で研究開発を行うため、本研究開発の受託者はミッションの製作者や ETS-9 のバス部分を担当する宇宙航空研究開発機構（JAXA）と連携することが求

められる。

(注) 昨今の世界的な技術動向等を踏まえ、必要に応じてミッションの改修等を行うことは提案可能。

ただし、当該改修等の提案を行うにあたっては、事前に総務省に相談すること。また、光通信部分、共通部分については改修等を必要としないこと。

※ 本研究開発活動においては、従来の他通信システムにて実施している通信システムの制御に関する各種方式や知見を参考にし、課題ア～ウの活動を効率的に実施し効果的な成果を導出することが求められる。

(2) 技術課題および到達目標

技術課題

ア 衛星通信システムにおける衛星—地上接続技術

各種ニーズに対応した HTS 衛星通信システムと地上網といった他のシステムとの接続において、衛星通信ネットワーク区間の遅延（約 500msec）や、衛星通信と地上網との伝送速度差（約 100 倍）、衛星通信と地上網（5G、IoT 等）との通信規約（通信プロトコル）等の大幅な違い（TCP と UDP 等）によって、衛星通信と地上網との接続における TCP/IP 通信における実効伝送速度（実効スループット）の低下や、最悪の場合通信切断が発生し、エンド to エンドの適切な通信が出来ないという課題がある。

これらの課題に対応するため、各種ニーズに対応した衛星通信システムにおける通信方式に関し、特にサービス品質において重要な、衛星回線と地上網の遅延時間の差や回線速度の差、衛星／地上（5G、IoT 等）間の通信プロトコルの違いを考慮した QoS 対策に資する衛星—地上接続方式（衛星システムと地上システムを途切れずに接続するための方式）の検討を行う。

その上で、衛星—地上接続方式の検討結果に基づき、衛星—地上接続システムの詳細設計を行い、その実証のために必要となるハード及びソフトからなるシステムを製作し、単体評価を実施する。

また、課題ウによる ETS-9 の打ち上げ前の評価の結果、及び打ち上げ後の総合評価の結果を踏まえ、衛星—地上接続システムの最適化を行う。

さらに、課題アは課題ウによる評価の対象の一部になるため、課題ウの評価のために必要なインターフェイス（ソフトウェアのみでなくハードウェアや総合評価に必要な接続用の回線を含む）等を作成・準備し、評価における他システムへの接続、評価への協力を行う。

※ 衛星—地上接続における検討内容の例（提案はこれに縛られるものではない）：ネットワークスライシングの方式、タイマー値の見直し

イ 予測技術を活用した衛星通信システムの運用計画作成技術

本研究開発で目指すユーザリンク、フィーダリンクに関する衛星リソースの制御においてユーザを適切に收容するためには、フレキシビリティを有する衛星リソースを適切なタイミングで割り当てていくことが必要である。そのためには、従来のリソースが固定的な衛星通信と異なり、運用計画において衛星リソースを時間軸上で適切に割り当てる計画立案が必要である。

その際、時々刻々と変化する通信需要及び回線条件、並びに衛星リソースの制御周期を考慮して適切に運用計画を立案しなければ、呼損の発生や、衛星リソースの余剰が発生し、ユーザに適切な通信サービスを提供できない可能性がある。そのため、通信需要や天候などによる回線条件の変化をデータ解析に基づき予測を行い、ユーザリンク、フィーダリンクに関する衛星リソースを適切に割り当てる運用計画方式を検討する。

さらに、フィーダリンクにおいては、気象状況に応じてKa帯以外の回線を利用することにより、フィーダリンクで利用していたKa帯を他のシステムで使えるように解放する役割を持つ制御方式を検討し、上記の運用計画方式に反映する。

また、運用計画方式の検討結果に基づき、データベースを構築し、データを解析した上でリソース割当計画を作成する機能を持つ運用計画作成システムの詳細設計を行い、その実証のために必要となるハード及びソフトからなるシステムを製作し、単体評価を実施する。

また、ETS-9の打ち上げ前に実施する課題ウの評価の結果、及び打ち上げ後に実施する課題ウの総合評価結果を踏まえ、当該運用計画作成システムの最適化を行う。

ここで作成された運用計画に基づき課題ウにおけるリソース制御を行うため、研究開発においては課題ウの受託者と連携を行うこと。

さらに、課題イは課題ウによる評価の対象の一部になるため、課題ウの評価のために必要なインターフェイス（ソフトウェアのみでなくハードウェアや総合評価に必要な接続用の回線を含む）等を作成・準備し、評価における他システムへの接続、評価への協力を行う。

ウ 衛星リソース制御技術及び総合評価

本研究で技術開発を目指している使用周波数や通信エリアを柔軟に変更する衛星においては、それらが固定である従来の衛星とは異なり、ビーム毎の周波数幅やエリアなどを変更する運用計画を実行する際には、周波数の干渉を考慮した物理層等の制御が必要となる。

そのため、マルチビーム間の干渉や、ビーム内に複数いるユーザが通信に用いるそれぞれの通信キャリアの周波数間の干渉を考慮した周波数配列の最適化が必要である。

本研究開発においては、課題イの受託者と連携し、各種干渉を考慮した周

波数配列の最適化を実現するデジタルチャネライザ及びデジタルビームフォーミング、フィーダリンクのリソース制御のための方式を検討し、リソース制御システムについて詳細設計を行い、その実証のために必要となるハード及びソフトからなるシステムを製作し、単体評価を実施する。リソース制御システムには、デジタルビームフォーミングを適切に機能させるための励振係数の補正（キャリブレーション）技術、衛星ゲートウェイ局の詳細設計、製作、単体試験も含まれる。

また、下記の ETS-9 の打ち上げ前に実施する評価結果、及び打ち上げ後に実施する総合評価結果を踏まえ、当該リソース制御システムの最適化を行う。

さらに、上記の研究開発（リソース制御）は下記の総合評価の対象の一部になるため、総合評価のために必要なインターフェイス（ソフトウェアのみでなくハードウェアや総合評価に必要な接続用の回線を含む）等を作成・準備し、評価における他システムへの接続、評価への協力を行う。

課題ア、課題イ及び上記の研究開発（リソース制御）の有効性検証を実施し、更なる最適化を進めるためには、開発の前提となる衛星通信システム全体のネットワークアーキテクチャの設計及びその有効性検証のための実証環境の構築が必須である。さらにその前提として、実証環境の構築のためには、総合実証を行う際の評価方式の確立が必要である。

そのため、令和元年までの ETS-9 の開発成果と、上記の課題ア、課題イ及び上記の研究開発（リソース制御）を連携した、衛星そのもののシステム及び衛星通信のための地上系のシステム、一部の地上網を統合した総合実証環境の構築に資するための、総合評価の方式検討を行う。なお総合評価には、キャリブレーション技術（励振係数の補正技術）の評価も含まれる。

その上で、衛星そのもののシステム及び衛星通信のための地上系のシステム、一部の地上網を統合した全体を総合的に評価するための環境（計測器レンタル、機材設置、回線レンタル、通信用機器（ミッション）の別途用意される ETS-9 バスへの搭載）を構築し、評価を行い、研究開発成果の妥当性を確認する（例：地上網におけるコア網からユーザ端末（5G や IoT、航空機など）までのエンド to エンド通信による総合実証）。

評価としては、まず ETS-9 の打ち上げ前段階において必要な、衛星／地上系システムに関する評価（打ち上げ前評価）を実施し、課題ア、課題イ及び上記の研究開発（リソース制御）の妥当性を検証する。

さらに、上記に記載したように ETS-9 の打ち上げ後において、ETS-9 及び地上系の開発成果を併せた衛星通信システム全体の総合評価として、無線特性等の基礎実験及び、ユースケース観点からの応用実証を実施し、課題ア、課題イ及び上記の研究開発（リソース制御）の衛星通信システム全体としての妥当性を確認する（応用実証に関しては、多様なユースケースの検討を元にした実証が出来るよう、幅広い分野の人々が入った検討会を行うこと）。

※ ETS-9 のバス部分は JAXA が作成するため、JAXA と連携することが求められる。

到達目標

課題アについては、各種ニーズに対応した HTS 衛星通信システムと地上網といった他のシステムとの接続において、サービス品質において重要な、衛星回線と地上網の遅延時間の差や回線速度の差、通信プロトコルの違いを考慮した QoS 対策に資する新たな衛星—地上接続方式を確立する。

課題イについてはフレキシビリティを有する衛星リソースを適切なタイミングで割り当てていくための、衛星リソースを時間軸上で適切に割り当てる計画立案、すなわち、通信需要や回線条件の変化をデータ解析に基づき予測を行い、衛星リソースを適切に割り当てる運用計画方式を確立し、その成果に基づき、データベース構築、解析、運用計画機能の詳細設計、製作、システム単体評価を実施することで、運用計画作成システムの開発を実施する。これにより、周波数利用効率を理論的に2倍に改善できる方式を確立する。

課題ウについてはマルチビーム間の干渉や、ビーム内に複数いるユーザが通信に用いるそれぞれの通信キャリアの周波数間の干渉を考慮した周波数配列、複数のフィーダリンク及びゲートウェイ地球局などの選択及び周波数割り当ての最適化のために、課題イと連携し、各種干渉を考慮した周波数配列の最適化を実現するデジタルチャネライザ及びデジタルビームフォーミング、フィーダリンクのリソース制御技術を開発するための制御方式を確立し、その成果に基づき、リソース制御の詳細設計、製作、単体評価を実施することで、衛星リソース制御システムの開発を実施する。また、課題イで理論的に示す周波数利用効率2倍の改善効果の目標が技術的に実現できることを検証する。また、ETS-9 の打ち上げ後において、課題ア、イの成果を含め、ETS-9 及び地上系の開発成果を併せた衛星通信システム全体の総合評価として、無線特性等の基礎実験及び、ユースケース観点からの応用実験を実施し、衛星通信システム全体としての妥当性を確認する。また、周波数利用効率2倍の改善効果を実証環境における評価及びシミュレーション評価で検証する。

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

<令和2年度>

ア 衛星通信システムにおける衛星—地上接続技術

・衛星回線と地上網の遅延時間の差や回線速度の差、通信プロトコルの違い

を考慮した QoS 対策に資する衛星—地上接続方式の検討

- ・ HTS 衛星通信システムと地上網といった他のシステムとの接続に関わる衛星通信システムの基本設計、詳細設計

イ 予測技術を活用した衛星通信システムの運用計画作成技術

- ・ 通信需要や回線条件の変化をデータ解析に基づき予測を行い、衛星リソースを適切に割り当てる運用計画の基本方式の検討
- ・ 衛星リソースを適切に割り当てる運用計画の基本設計

ウ 衛星リソース制御技術及び総合評価

- ・ 各種干渉を考慮した周波数配列の最適化を実現するデジタルチャネライザ及びデジタルビームフォーミング、フィードリンクのリソース制御方式の検討
- ・ リソース制御システムの基本設計
- ・ アーキテクチャの構築や個々の機能設計など、衛星通信システム全体の基本設計
- ・ 課題ア、課題イ、および衛星リソース制御に関する研究開発の成果物に対する地上での検証方式の検討、衛星打ち上げ後の実証実験の総合評価方式の検討
- ・ 衛星システム及び衛星地上系システムを併せた衛星通信システム全体を総合的に評価するための評価環境の構築（試験治具製作、通信用機器（ミッション）を別途用意される ETS-9 バスへ搭載）

<令和3年度>

ア 衛星通信システムにおける衛星—地上接続技術

- ・ 衛星回線と地上網の遅延時間の差や回線速度の差、通信プロトコルの違いを考慮した QoS 対策に資する衛星—地上接続方式を実現するための基本設計、詳細設計、製作
- ・ HTS 衛星通信システムと地上網といった他のシステムとの接続に関わる衛星通信システムの製作

イ 予測技術を活用した衛星通信システムの運用計画作成技術

- ・ 衛星リソースを適切に割り当てる運用計画機能の詳細設計・製作
- ・ 通信需要等の予測を行うためのデータベース用装置の製作及びデータベースの構築

ウ 衛星リソース制御技術及び総合評価

- ・ 各種干渉を考慮した周波数配列の最適化を実現するデジタルチャネライザ及びデジタルビームフォーミング、フィードリンクのリソース制御システム

の詳細設計、製作の実施

- ・衛星システム及び衛星地上系システムを併せた衛星通信システム全体を総合的に評価するための評価環境の構築（令和2年度の続き）

<令和4年度>

ア 衛星通信システムにおける衛星—地上接続技術

- ・衛星回線と地上網の遅延時間の差や回線速度の差、通信プロトコルの違いを考慮したQos対策に資する衛星—地上接続方式の製作（令和3年度の続き）、単体評価
- ・HTS衛星通信システムと地上網といった他のシステムとの接続に関わる衛星通信システムの製作（令和3年度の続き）、単体評価

イ 予測技術を活用した衛星通信システムの運用計画作成技術

- ・衛星リソースを適切に割り当てる運用計画作成システムの製作（令和3年度の続き）、単体評価
- ・通信需要等の予測を行うためのデータベース構築（令和3年度の続き）、単体評価

ウ 衛星リソース制御技術及び総合評価

- ・リソース制御システムにおけるゲートウェイ局の制御方式検討
- ・各種干渉を考慮した周波数配列の最適化を実現するデジタルチャネライザ及びデジタルビームフォーミング、フィードリンクの衛星リソース制御システムの製作（令和3年度の続き）、単体評価
- ・衛星システム及び衛星地上系システムを併せた衛星通信システム全体の総合評価環境構築
- ・実証環境の構築
- ・ユースケースを想定した応用実験環境の検討（ESIM対応衛星端末の設計等）
- ・課題ア、課題イ、および衛星リソース制御に関する研究開発の成果物に対する打上げ前の総合評価作業を実施し、課題ア、課題イ、および衛星リソース制御に関する研究開発の成果の妥当性を検証

<令和5年度>

ア 衛星通信システムにおける衛星—地上接続技術

- ・令和4年度における課題ウの評価結果を踏まえた接続システムの課題抽出及び最適化

イ 予測技術を活用した衛星通信システムの運用計画作成技術

- ・令和4年度における課題ウの評価結果を踏まえた運用計画作成システムの課

題抽出及び最適化

ウ 衛星リソース制御技術及び総合評価

- ・令和4年度における課題ウの評価結果を踏まえた衛星リソース制御システムの課題抽出及び最適化
- ・実証環境の構築（令和4年度の続き）
- ・通信用機器（ミッション）に関わる IOT
- ・ユースケースを想定した応用実験環境の構築（ESIM 対応衛星端末の作製等）
- ・本制御システムの基本特性の確認
- ・無線特性等の基礎実験の実施

<令和6年度>

ア 衛星通信システムにおける衛星—地上接続技術

- ・課題ウでの総合評価に対する接続システムの有効性の検証

イ 予測技術を活用した衛星通信システムの運用計画作成技術

- ・課題ウでの総合評価に対する運用計画作成システムの有効性の検証

ウ 衛星リソース制御技術及び総合評価

- ・総合評価に対する衛星リソース制御システムの有効性の検証
- ・実証環境の構築（令和5年度の続き）
- ・本制御システムの基本特性の確認（令和5年度の続き）
- ・無線特性等の基礎実験の実施（令和5年度の続き）
- ・ユースケースを想定した応用実験
- ・本制御システムの総合的な特性及び周波数利用効率の確認

5. 実施期間

令和2年度から6年度までの5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

実際に衛星を打ち上げ、軌道上実証実験を行う本研究開発は、新技術の有効性や実用性を実証できる貴重な機会であり、その後の実用化への取組につながる強力なステップである。

研究開発期間終了後も引き続き取り組む予定の「本研究開発で確立した技術の普及啓発活動」及び令和6年度までの実用化・製品展開等を実現するために必要な取組を図ることとし、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。

(2) 提案および研究開発に当たっての留意点

本研究開発課題への提案にあたっては、各技術課題のいずれか一つ又は複数に提案することが可能。また、各技術課題に対して共同研究による提案も可能。ただし、各技術課題のうち一部の技術のみの提案は不可（例：課題イのうちデータベース構築技術のみでの提案は不可）。

提案にあたっては、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、実施計画及び年度目標について具体的かつ実効性のある提案を行うこと。

研究開発の実施にあたっては、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頂くと共に、実際の研究開発の進め方について適宜指導を頂くため、学識経験者、有識者等を含んだ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) ETS-9 を用いた実証に係る注意点

本研究開発は ETS-9 を用いる研究開発・実証を行うために、以下の作業や設備の作成・設置を受託者は行うこと。

なお、検討にあたっての ETS-9 自体の仕様の詳細、及び ETS-9 のミッション部や地球局の仕様（ユーザリンク・フィーダリンクの無線性能諸元、使用可能帯域、ビーム数、衛星ゲートウェイ局の諸元等）の詳細について必要な場合は、担当課（宇宙通信政策課）に問い合わせること。

(課題ウ)

衛星ゲートウェイ局：フィーダリンクの制御の実証（フィーダリンクの切り替えの実証）のために必要となる Ka 帯の衛星ゲートウェイ地球局（2 局以上）、光通信等のその他の周波数の通信用のゲートウェイ地球局（1 局以上）及びそれらの制御局

衛星通信管制局：衛星リソース制御の有効性の検証に必要となる、衛星バス側の管制局が有するコマンド／テレメトリ無線送受信機能を経由したミッション機器の監視制御、及び衛星通信システム全体を監視制御する管制局
ミッション部分の衛星バスへの組み込み・テスト（試験治具製作、AIT/PFTの実施）
衛星の射場への搬入後のミッション機器動作確認（射場試験）
軌道上実証（OR）
静止軌道後動作確認（IOT）
確認及び評価の際に必要な各種地上系設備の維持管理
総合実証に必要となる地上系システムの準備（ESIM 対応衛星端末、実証に必要な移動体など）
総合実証に必要な計測器
ミッション部分の運用管理
軌道上実証を行うための軌道・周波数確保のための調整

なお、ETS-9 のバスの作成・テスト（システムAIT、PFT）、静止軌道までの打ち上げ・軌道位置への移動（OR）、衛星静止化後の試験（IOT）、バスの制御は別のプロジェクト（4(1)※を参照）が担当するため、その担当者と連携をすること。

＜基本計画書＞

HAPS を利用した無線通信システムに係る周波数有効利用技術に関する研究開発

1. 目的

HAPS (High-Altitude Platform Station : 高高度プラットフォーム) の事業化に向け、近年、小型～中型の無人機の技術が急速に発展・普及し、また、携帯電話や IoT の技術が大幅に進展してきており、ITU や国際民間航空機関 (ICAO) においても勧告・規格化を目指した検討が始まるなど、HAPS 実現に向けた国際的な動きが加速し、環境整備と技術開発が進み、その普及拡大が見込まれている。

HAPS を利用した固定通信システムとしては、第 5 世代移動通信システム (以下「5G」という。) 等の次世代モバイル通信システムの普及に伴う基地局へのバックホール回線の冗長化要求が増すことや既存携帯電話システムの更なるトラヒックひっ迫が想定されるとともに、昨今の風水害の激甚化に伴い、地上の通信インフラ網の強靱化が喫緊の課題となっている中、上空経由にて冗長経路が確保できる HAPS によるブロードバンド通信の早急な実現への期待が高まっている。

また、HAPS を利用した移動通信システムとしては、超広域カバーエリア、災害に強いネットワーク及び上空を含む三次元空間エリアへの通信サービスの提供を実現するプラットフォームとしての利用が期待されている。特に、2.7GHz 以下の携帯電話向け地上移動通信システムと同一の周波数帯を利用する上での共用技術を確立することで、既存の端末をそのまま使用可能なシステムを構築し、地上のセル境界におけるスループット向上や災害時の通信手段確保といった、現在の移動通信システムが抱える課題を解決することが求められている。

このため、本研究開発では HAPS を利用した無線通信システムの研究開発を実施することで、上空経由で冗長経路を確保できるブロードバンド通信等を実現するとともに、地上移動通信システムとの干渉による影響を抑え周波数共用を可能とする技術を確立し、固定通信システム及び移動通信システムそれぞれにおける周波数の効率的な利用を実現する。

2. 政策的位置付け

- ・「日本経済再生本部」の「未来投資会議」(令和元年 6 月 21 日) の配付資料「成長戦略フォローアップ案」(令和元年 6 月 21 日) において、「HAPS(High-Altitude Platform Station) を用いた通信システム等に関する研究開発を推進する」旨の記載あり。

3. 目標

【固定通信システム】

過去に実施された「無人航空機を活用した無線中継システムと地上ネットワークとの連携及び共用技術の研究開発」において対象とした 5GHz 帯及び 2.4GHz

帯の7～10倍の周波数であり、HAPSを利用した高速ブロードバンド通信のための帯域の確保が期待されるミリ波帯の利用を想定し、過去の研究開発では実現していないHAPS搭載の指向方向を回線状況に合わせて柔軟に変更可能なスポットビームアンテナ技術確立し、サービスエリアを細分化するとともに複数のビームを生成することによって、周波数の再利用度合いを向上させる。さらに、自律的に位置変動するHAPS方向を常に追尾捕捉可能なHAPS向け地上局用アンテナ技術を開発し、他の無線システムとの干渉軽減も達成することを目指す。

また、HAPS機体タイプ（飛行船タイプ、固定翼タイプ等）に応じたシステム設計を行い、これらの技術開発により、通信需要が増大した携帯電話基地局に設置された地上局に対して、細分化されたビームを指向させ、設定可能な通信経路数をビーム数に応じて増加することにより、通信経路設定の冗長性を大幅に改善させることを実現する。

また、地上ネットワークと連携を図ることによって、降雨時に地上付近の降雨の分布状況（特に激しくミリ波を減衰させる局所的な強雨）に応じて、HAPS搭載アンテナの指向性を動的に1つの地上基地局の方向から、降雨がないか弱い別の場所にある地上基地局の方向に切替えることにより、サイトダイバーシティ補償を行う技術の開発を行う。更に、災害時に携帯電話ネットワークが通信断となった場合、HAPS回線経路にて通信継続を実現するため、携帯電話の国際標準規格に準拠した動的な回線制御技術確立する。

この技術開発により、ミリ波帯における降雨減衰問題を克服するだけでなく、災害に強靱な地上通信インフラ網の実現に貢献することを目指す。

（過去の研究開発においては、指向性ビームを活用したサイトダイバーシティによる降雨減衰補償を想定した取り組みには至らなかったことから、本研究開発において新たに取り組むもの。）

【移動通信システム】

非常時の移動通信手段としてHAPSシステムを考えた場合、地上システムが全て落ちるとは限らず、基地局ごとに障害発生状況が異なり、HAPSシステムと地上システム間で必要に応じて周波数共用が求められる。また、平常時の移動通信手段としてHAPSシステムを考えた場合、昨今の周波数ひっ迫状況を鑑みると、HAPSシステムと地上システムが同一エリアで同一周波数を共用することによる周波数利用効率の向上が求められる。これらの場合、システム間で相互に干渉が発生することが課題となるが、これまで十分な検討は行われてこなかった。そこで、本研究開発では、HAPSシステムと地上システム間でネットワーク連携し、時間分割した無線リソースを相互に干渉とならないように割当制御を行う干渉回避技術及びHAPSシステムと地上システムが連携して干渉を除去する干渉キャンセル技術を令和5年度までに確立し、これらの技術を用いない場合に比べて1.2倍以上の周波数利用効率（1.2倍以上のスループット）を達成することを目指す。

4. 研究開発内容

(1) 概要

【固定通信システム】

HAPS を用いたミリ波帯（Q/V 帯）の広帯域な周波数（38.0-39.5GHz を中心とした 36.0-42.5GHz 帯）を利用して、既存携帯電話網の 5G 化における基地局のバックホール回線の増速要求に対して、タイムリーな高速・大容量回線を提供できる無線システムを開発し、ミリ波帯における周波数利用効率の向上を実現する。

【移動通信システム】

HAPS システムと地上システムとの間で発生する相互干渉を抑圧するため、ネットワーク連携による干渉回避技術及び干渉キャンセル技術を開発する。また、移動通信に適した 2.7GHz 以下の周波数帯を用いて提案技術を評価するための試作装置開発を行い、室内実験による実時間での動作の検証を実施する。

(2) 技術課題および到達目標

技術課題

【固定通信システム】

ア HAPS 搭載の動揺補償型ミリ波帯多地点スポットビームアンテナ技術 (可動型)

上空約 20km 程度の成層圏環境における特有の風の影響や飛行状況等により、HAPS 機体は常に動揺しており、直進性が高いミリ波の場合、地上局に対して安定的にサービスエリアを維持することに技術的な課題がある。また、HAPS カバレッジ直下とカバレッジエッジとを比較すると通信距離が 3～5 倍近く（約 60～100km）になり、通信品質に大きな差が生じるといった課題がある。これらを解決するには、HAPS の姿勢動揺を補償する機能を持ち、HAPS カバレッジの直下とエッジの通信品質の差を低減するためのアンテナ設計を行うとともに、携帯電話網の要求に連携して、アンテナの指向方向をビームごとに独立に変更できる多地点スポットビームアンテナの実現が求められる。

イ ミリ波帯の電波伝搬損失の補償技術

ミリ波帯を用いた通信システムの場合、降雨減衰により通信品質劣化が発生するという課題がある。HAPS と携帯電話基地局間のバックホール回線において通信品質劣化が発生すると、当該携帯電話基地局がカバーしているエリア全体の通信サービス品質が劣化してしまうため、大きな問題となる。

これらを解決するには、降雨減衰による通信品質劣化の発生を検知する

機能に加え、降雨減衰が発生していない近隣の他の携帯電話基地局を経由した通信経路に変更するネットワーク制御技術を実現することが課題となる。

ウ HAPS 向け地上局用アンテナ技術

昨今の周波数ひっ迫状況を鑑みると、WRC-19 議題 1.14（固定業務に分配済みの周波数帯域における HAPS への規制措置の検討）にて検討されている HAPS 用のミリ波帯周波数においても様々既存システムとの共用が課題となっており、専用的に周波数帯が割り当てられることは考えにくい。したがって、周波数有効利用の観点から、他の無線システムと同一周波数で共用可能な HAPS 向け地上局用アンテナ技術の実現が必要不可欠である。

これらを解決するには、自律的に位置変動する HAPS 方向を常に捕捉追尾しつつ、同一周波数を利用する他の無線システムとの間の干渉状況を把握し、HAPS 向け地上局用アンテナの送信特性を活用した干渉軽減技術の実現が課題となる。また、5G 等の携帯電話システムと共用する場合には、携帯電話システムと連携した干渉軽減技術の実現が求められる。

エ 携帯電話網（5G 等）と連携した回線制御技術

携帯電話基地局網が使用する光ファイバーによるバックホール回線は固定的に割り当てられているため、災害時の回線追加等に遠隔で即時対応できないという課題がある。HAPS 回線を携帯電話基地局のバックホール回線として使用した場合、災害時の即時対応が期待される。

また、現在の携帯電話システムは、ノード間インターフェースに 3GPP 等の国際標準規格を採用して構築されているため、HAPS 回線を適用する場合には、HAPS 回線のインターフェースを携帯電話の国際標準規格に準拠させなければならない。

このため、携帯電話の国際標準規格に準拠させた上で、災害時等に HAPS 回線を柔軟に適用できる制御技術を実現することが課題となる。

オ 周波数共用技術

WRC-19 議題 1.14 において検討されている 38.0-39.5GHz 帯は、固定局や陸上移動局等の既存無線システムに加え、5G の利用も検討されている周波数帯である。課題ア～エの検討状況を踏まえて、既存システム等との適切な周波数共用を実現することが課題となる。

【移動通信システム】

カ ネットワーク連携干渉回避技術

HAPS システムと地上システム間で同一エリアにおいて同一周波数を共用

する場合、システム間で相互に干渉が発生するため、大きく通信品質が低下することが課題である。このため、無線リソースを時間分割し、相互に干渉とならないようにリソース割当制御を行うネットワーク連携干渉回避技術を開発する必要がある。特に、高度 20km を飛行する HAPS 中継局と地上基地局間において干渉回避制御を適用するためには、既存の無線リソース時間分割による干渉回避技術を発展させるだけでなく、高精度な時間同期制御を飛行に合わせて動的に行う技術を実現する必要がある。

キ ネットワーク連携干渉キャンセル技術

HAPS から地上システムへの干渉が非常に大きい場合においては干渉回避技術が必要である一方、干渉レベルが同等程度以下である場合においては、HAPS からの干渉を除去するように HAPS 中継局と地上基地局が連携して信号送信制御を行う干渉キャンセル技術が求められる。このため、高精度な時間同期制御のもとで基地局からの信号送信タイミングを適切に制御する技術を確立するとともに、干渉状況やトラフィック状況に応じて、干渉回避技術と干渉キャンセル技術を適応的に切替制御する技術を実現する必要がある。

到達目標

【固定通信システム】

HAPS に搭載するミリ波帯アンテナシステム及びそれと対向する固定通信システム用地上局を開発し、HAPS の滞留位置変動下や姿勢動揺下においても、他の地上システムからの干渉を軽減させながら無線回線を成立させるとともに、HAPS と携帯電話網と連動したダイバーシチ技術を用いて、降雨減衰の影響が大きい 38GHz 帯においても、従来の国内 Ku 帯静止衛星システムを利用した携帯電話向けバックホール回線と同等の総合回線稼働率を確保し、静止衛星システムでは 3 (bit/symbol) 前後であった周波数利用効率を 1.1 倍以上（スループットを 1.1 倍以上）の 3 (bit/symbol) 後半から 4 (bit/symbol) 台に改善させることを目標とする。各技術課題についての具体的な内容は下記のとおり。

ア HAPS 搭載の動揺補償型ミリ波帯多地点スポットビームアンテナ技術 (可動型)

HAPS と地上局の間の距離に応じた 3 種類程度の利得に配分され成層圏環境に対応した複数のミリ波アンテナ素子とその指向性制御方式及び通信中継機を開発し、HAPS 機体の姿勢動揺や方向転回時の指向方向誤差を抑制する機能並びにビーム指向方向を独立に切替え制御できる機能を開発する。

イ ミリ波帯の電波伝搬損失の補償技術

ミリ波帯における降雨減衰問題を解決するため、降雨減衰が発生しているエリアに向けて使用中の HAPS 回線を、降雨減衰が発生していない近隣の他の携帯電話基地局に向けた通信経路に変更することで通信品質劣化を回避するネットワーク制御技術を開発する。携帯電話基地局のバックホール回線における品質劣化は、当該基地局がカバーしているエリア全体の品質劣化に直結するので、降雨減衰検知から経路変更完了までの一連のプロセスを人為的な判断を含まない自動制御を実現することで早期復旧を目指す。なお、HAPS を用いた携帯電話のバックホール回線の実証実験結果を基に、降雨減衰や地上干渉による要素も含め、マルチビームによる通信回線容量の増大度合いをシミュレーションにより確認する。

ウ HAPS 向け地上用アンテナ技術

HAPS 向け地上用アンテナ技術として、自律的に位置変動する HAPS 方向を常に捕捉追尾する技術とともに、同一周波数帯を用いる他の固定無線局との間の干渉状況を把握し、指向性パターン等の送信特性を活用した干渉軽減技術を開発する。

また、携帯電話網との同一周波数帯共用を実現するため、携帯電話網と連携した通信制御技術を開発する。

エ 携帯電話網（5G 等）と連携した回線制御技術

地上の携帯電話網において基地局間の回線に異常が発生した際に、異常発生箇所に対して HAPS 経由で別の回線を設定することを想定し、突発的かつ可変的な回線要求へ速やかな対応が可能であり、かつ、携帯電話網のノード間インターフェース規格に適合した回線制御技術を開発し、実用化を目指す。

オ 周波数共用技術

38.0 - 39.5GHz 帯付近の既存システムとの周波数共用の検討結果を踏まえ、令和 5 年度頃の法制化を目指し、共用可能となる干渉低減方策や技術条件を明確化する。特に 38.0 - 39.5GHz 帯以外の固定業務に分配されている帯域については、必要となる周波数共用検討を行い、他システムとの周波数共用に係る技術条件を令和 4 年度までに提言し、成果を必要に応じて国際標準化（ITU-R WRC-23）に反映する。

【移動通信システム】

HAPS システムと地上システムがネットワーク連携した干渉回避技術及び干渉キャンセル技術を確立し、連携しない場合に比べて周波数利用効率を 1.2 倍

以上（スループットを 1.2 倍以上）に改善することを目標とする。各技術課題についての具体的な内容は下記のとおり。

カ ネットワーク連携干渉回避技術

HAPS システムと地上システム間でネットワーク連携し、時分割的に無線リソース割当制御を行うことで干渉回避を実現する技術を確立する。また、制御を行う上での基盤として、高度 20km を飛行する HAPS 中継局と地上基地局間で伝搬距離差を考慮した高精度な時間同期制御を行う手法についても併せて研究開発を行い、±1 マイクロ秒以下の同期精度を実現する。さらに、開発したシステムを評価するための試作装置の開発及び室内実験による実時間での動作の検証を行う。

キ ネットワーク連携干渉キャンセル技術

HAPS システムと地上システムが連携して干渉を除去する干渉キャンセル技術を実現する。また、HAPS システムと地上システム間の干渉状況に応じて干渉回避技術又は干渉キャンセル技術から最適なものを選択する動的切替制御技術についても併せて確立する。さらに、開発したシステムを評価するための試作装置の開発及び室内実験による実時間での動作の検証を行う。

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

【固定通信システム】

＜令和 2 年度＞

ア HAPS 搭載の動揺補償型ミリ波帯多地点スポットビームアンテナ技術 (可動型)

- HAPS 搭載の動揺補償型ミリ波帯多地点スポットビームアンテナの全体設計・開発
 - ・ HAPS 機体タイプ（飛行船タイプ、固定翼タイプ等）毎の要件検討
 - ・ HAPS に要求されるアンテナ方式及び通信系機器仕様の検討
 - ✓ HAPS の機体の運航特性に係る基本要件の整理
 - ✓ ミリ波帯の回線設計と HAPS アンテナ・通信系要件の整理
 - ✓ 課題イで整理した降雨減衰補償対策として必要となる要件の整理
 - ✓ 項目エで整理した携帯電話網に係る基本要件の整理
 - ✓ 項目オで整理した周波数共用に必要となる要件の整理
 - ・ HAPS と携帯電話網の融合システムとしての全体設計への反映
 - ・ 上記を踏まえた HAPS 搭載アンテナ・通信装置の基本／詳細設計
 - ・ 上記を踏まえた HAPS 搭載アンテナ・通信装置の部分試作

イ ミリ波帯の電波伝搬損失の補償技術

- ミリ波帯の電波伝搬損失の補償技術に関する伝搬特性分析・全体設計
 - ・ミリ波帯の電波伝搬特性の調査、分析
 - ✓ HAPS が指向するビーム方向に応じた特性
 - ✓ 国内の各地域における降雨特性
 - ・HAPS と携帯電話網の融合システムとしての全体設計への反映
 - ・上記を踏まえた降雨減衰補償対策技術の検討

ウ HAPS 向け地上局用アンテナ技術

- HAPS 向け地上局用アンテナの全体設計・開発
 - ・HAPS と携帯電話網の融合システムとしての全体設計
 - ・全体設計で地上局用アンテナ及び通信機器に要求される仕様の検討
 - ✓ HAPS の成層圏における運航性能を加味した要件整理
 - ✓ ミリ波帯における回線設計と地上局用アンテナ系の要件整理
 - ✓ 携帯電話網の基地局と接続するための要件整理
 - ✓ 項目オで整理した周波数共用に必要な要件の整理
 - ・上記を踏まえた地上局用アンテナ・通信装置の全体設計と詳細設計
 - ・上記を踏まえた HAPS 向け地上局用アンテナの詳細設計と部分試作

エ 携帯電話網（5G 等）と連携した回線制御技術

- 携帯電話網と連携した回線制御モデルの検討
 - ・災害・障害発生時の携帯電話網と連携した回線制御モデルの検討
 - ・携帯電話網に HAPS システムを組み込む要件整理
 - ・項目オで整理した周波数共用に必要な技術要件の反映
 - ・ノード間インターフェースに係る 3GPP 等の国際標準規格との整合

オ 周波数共用技術の検討

- 既存の無線システムとの周波数共用検討
 - ・WRC-19 議題 1.14 で HAPS に割当が検討帯域（38.0—39.5GHz）周辺の固定無線業務に分配されている帯域（36.0 - 43.5GHz）における既存無線システムとの周波数共用検討
 - ・既存無線システムとの周波数共用に必要な技術要件の整理
 - ・WRC-19 議題 1.14 の結果の反映

<令和3年度>

ア HAPS 搭載の動揺補償型ミリ波帯多地点スポットビームアンテナ技術
(可動型)

- HAPS 搭載の動揺補償型ミリ波帯多地点スポットビームアンテナの機器

開発

- ・ アンテナ・通信装置の全体設計を基にした以下の要素技術の開発
 - ✓ 単素子アンテナ、複数素子アンテナの開発
 - ✓ 追尾制御装置の開発
 - ✓ HAPS 搭載通信装置の開発

イ ミリ波帯の電波伝搬損失の補償技術

●ミリ波帯の降雨減衰補償技術の開発

- ・ 以下の項目を踏まえた降雨減衰補償技術の開発を行う
 - ✓ 携帯電話網との融合ネットワークに組み込むアルゴリズム開発
 - ✓ HAPS 搭載通信機器に組み込むアルゴリズム開発
 - ✓ 地上用アンテナに組み込むアルゴリズム開発

ウ HAPS 向け地上用アンテナ技術

●HAPS 向け地上用アンテナ通信技術の開発

- ・ 以下項目を踏まえた地上用アンテナ・通信装置の開発
 - ✓ HAPS 方向の捕捉追尾技術
 - ✓ 携帯電話網と連携した通信制御、アンテナビーム制御技術
 - ✓ 他システムとの干渉低減技術

エ 携帯電話網（5G 等）と連携した回線制御技術

●携帯電話網と連携した回線制御アルゴリズムの開発

- ・ 以下項目を踏まえた HAPS の回線制御アルゴリズム開発
 - ✓ 携帯電話網のノード間のインターフェース条件
 - ✓ 災害・障害発生時の携帯電話網の復旧手順
 - ✓ 降雨減衰補償対策としての隣接セル基地局との連携手順
 - ✓ HAPS の通信回線、ビーム等の利用状況

オ 周波数共用技術

●国際標準化に向けた活動

- ・ HAPS の周波数に係る具体的な活動は以下
 - ✓ WRC-19 議題 1.14 の結果に応じた ITU-R への対応
 - ✓ 必要に応じた、アジア太平洋地区における標準化に対する対応

<令和4年度>

ア HAPS 搭載の動揺補償型ミリ波帯多地点スポットビームアンテナ技術（可動型）

●単体地上試験

- ・ HAPS 搭載アンテナシステム（追尾技術、降雨補償含む）の開発

- ・地上におけるアンテナシステムの単体試験
- ・地上における HAPS 搭載通信システムの単体試験
- ・単体試験結果に基づく HAPS 搭載通信システムの改造
- ・上記を踏まえた統合実証試験の準備

イ ミリ波帯の電波伝搬損失の補償技術

●地上試験

- ・携帯電話網との融合ネットワークに組み込むアルゴリズム検証
- ・HAPS 搭載通信機器、地上用アンテナに組み込むアルゴリズム検証
- ・検証結果に基づくアルゴリズムの改修
- ・上記を踏まえた統合実証試験の準備

ウ HAPS 向け地上用アンテナ技術

●地上試験・試験基地局の整備

- ・地上用アンテナシステム（追尾技術、降雨補償含む）の開発
- ・地上における地上用アンテナシステムの試験
- ・試験結果を踏まえた地上用アンテナシステムの改造
- ・可搬型試験基地局への地上用アンテナシステムの組み込み
- ・可搬型試験基地局と地上用アンテナシステムとの接続試験
- ・上記を踏まえた統合実証試験の準備

エ 携帯電話網（5G 等）と連携した回線制御技術

●携帯電話網と連携した回線制御ソフトウェアの開発・試験

- ・HAPS の回線制御ソフトウェアの検証試験
 - ✓ 災害・障害発生時の対応
 - ✓ 降雨減衰補償対策時の対応
- ・回線制御ソフトウェアの検証結果を踏まえた改造
- ・上記を踏まえた統合実証試験の準備

オ 周波数共用技術

●WRC-23 に向けた活動

- ・HAPS の周波数に係る具体的な活動は以下
 - ✓ WRC-19 議題 1.14 の結果に応じた ITU-R への対応
 - ✓ 必要に応じた、アジアパシフィック地区における標準化に対する対応

<令和5年度>

ア HAPS 搭載の動揺補償型ミリ波帯多地点スポットビームアンテナ技術

(可動型)

- HAPS 機体へのアンテナ艙装、アンテナ単体試験の実施
 - ・ HAPS への実験通信機器・アンテナシステムの艙装
 - ・ 低空飛行中の HAPS におけるアンテナ単体試験の実施

イ ミリ波帯の電波伝搬損失の補償技術

- 総合実証試験
 - ・ 統合実証試験の実施にあたっての準備
 - ✓ 現地調査、実験環境構築、法制度手続き等
 - ・ 統合実証試験の実施

オ 周波数共用技術

- WRC-23 対応
 - ・ HAPS の周波数に係る具体的な活動は以下
 - ✓ 必要に応じた、WRC-23 に対する対応
 - ✓ WRC-23 の結果を踏まえた以降の ITU-R への対応方針の検討

【移動通信システム】

<令和2年度>

カ ネットワーク連携干渉回避技術

- 干渉回避アルゴリズムの検討及びシミュレーション基盤の構築
 - ・ 時分割無線リソース割当て制御技術のアルゴリズム設計
 - ・ 高精度時間同期制御技術のアルゴリズム設計
 - ・ 機能評価用計算機シミュレーションソフトウェアの開発

キ ネットワーク連携干渉キャンセル技術

- 干渉キャンセルアルゴリズムの検討及びシミュレーション基盤の構築
 - ・ 干渉キャンセル信号処理技術のアルゴリズム設計
 - ・ 機能評価用計算機シミュレーションソフトウェアの開発

<令和3年度>

カ ネットワーク連携干渉回避技術

- アルゴリズムの試作装置 BB 部への実装及び機能実証評価
 - ・ 試作装置の基本機能部 (BB 部) の仕様設計及び実装
 - ・ 試作装置を用いた室内での機能実証評価

キ ネットワーク連携干渉キャンセル技術

- アルゴリズムの試作装置 BB 部への実装及び機能実証評価
 - ・ 試作装置の基本機能部 (BB 部) の仕様設計及び実装

- ・試作装置を用いた室内での機能実証評価

<令和4年度>

カ ネットワーク連携干渉回避技術

●試作装置へのRF部追加実装及び機能実証評価

- ・試作装置のRF部の仕様設計及び実装
- ・高精度同期制御技術の仕様設計及び実装
- ・HAPSシステム及び地上システムからの受信信号レベルを模擬した室内での機能実証評価

キ ネットワーク連携干渉キャンセル技術

●試作装置へのRF部の追加実装及び機能実証評価

- ・試作装置のRF部の仕様設計及び実装
- ・HAPSシステム及び地上システムからの受信信号レベルを模擬した室内での機能実証評価

<令和5年度>

カ ネットワーク連携干渉回避技術

●統合システムの実装及び総合評価

- ・統合システムの装置仕様設計及び実装
- ・総合評価試験の実施及び周波数利用効率1.2倍以上達成の確認

キ ネットワーク連携干渉キャンセル技術

●統合システムの実装及び総合評価

- ・統合システムの装置仕様設計及び実装
- ・要素技術間の動的切り替え制御技術の装置仕様設計及び実装
- ・総合評価試験の実施及び周波数利用効率1.2倍以上達成の確認

5. 実施期間

令和2年度から5年度までの4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引き続き取り組む予定の「本研究開発で確立した技術の普及啓発活動」及び令和10年度までの実用化・製品展開等を実現するために必要な取組を図ることとし、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。

(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、実施計画及び年度目標について具体的かつ実効性のある提案を行うこと。

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頂くと共に、実際の研究開発の進め方について適宜指導を頂くため、学識経験者、有識者等を含んだ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。

以上

<基本計画書>

5G の普及・展開のための基盤技術に関する研究開発

1. 目的

我が国の移動通信トラヒックは、LTE 等のモバイルブロードバンドサービスの加入数の増加や高精細映像配信サービス等の普及により、年間約 1.3 倍と爆発的な増加が続いている。今後もモバイル環境での 4K/8K 視聴など高精細動画の伝送需要の増大や、モバイルとクラウド・コンピューティングサービスとの連携拡大等により、移動通信トラヒックの更なる増加が見込まれている。

これまで、超高速・超低遅延・多数同時接続といった特長を有する第 5 世代移動通信システム (5G) の実現に向け、超高速通信実現に必要となる超広帯域を確保できる高 SHF 帯 (主要国で検討されている 28GHz 帯) 等を活用し、5G の要素技術を確認するための無線技術を中心とした研究開発等が進められてきた。例えば、平成 27 年度から平成 30 年度にかけて実施された「第 5 世代移動通信システム実現に向けた研究開発」では大容量・超高速の特長を実現するための基礎技術に関する研究開発を実施しており、当該研究開発の成果を用いて 5G 導入のための基地局装置等が製作されている。一方で、今般 5G の実用化が各国で進展しているところ、5G 基地局装置等を様々な環境やユースケースに応じて柔軟に展開するための応用技術が新たに求められている。特に、2023 年頃の 5G を活用したサービスの本格的な普及・展開には、高 SHF 帯 (6GHz 以上) や EHF 帯 (30GHz 以上) を活用した基地局を街灯、ビルの壁面等への柔軟な設置を実現する必要があるとあり、基地局の低消費電力化・小型軽量化を実現する基地局構成技術の確立が求められている。また、高 SHF 帯、EHF 帯は電波の特性から直進性が強く、減衰が大きいとため、特定の方向に指向性を持たせるビームフォーミング技術を用いることが期待されている。ビームフォーミングの適用により、カバレッジの拡大、複数ユーザとの同時通信によるセル容量の拡大等を実現できるものの、高速移動する端末に適切に追従する機能が不可欠である。併せて、これら新技術に対応した基地局用機器は多様な供給者により提供されることが想定されるため、それらの機器の相互運用性を迅速に確保・検証可能であることが、これら新技術を柔軟に組み合わせたサービスの実際の展開に際し必要となる。そのため基地局用機器間の相互運用性確保・検証のための技術を早期に確立することが重要であり、また基地局用機器間の相互運用性を検証するための施設の計画が米国・中国にて進捗していることや、我が国においても 5G の商用化を控えていることも踏まえ、国内外に適用可能な技術となることが求められている。

本研究開発では、「高 SHF 帯」及び「EHF 帯」の高周波数帯 (以下、「ミリ波帯」という。) において、基地局の低消費電力化・小型化を実現する基地局構成技術や高速移動体向けミリ波帯基地局連携技術、さらに基地局用機器間の相互運用性の確保・検証技術を確立し、周波数の効率的な利用を促進するとともに、高い周波数帯

への移行を加速させる。

2. 政策的位置付け

- ・未来投資戦略2017（平成29年6月9日閣議決定）

「第2 具体的政策 II Society 5.0に向けた横割課題 A. 価値の源泉の創出 1. データ利活用基盤の構築 (2) 新たに講ずべき具体的施策 vii) 第5世代移動通信システム(5G)等の情報通信基盤の活用」において、「自動走行等の社会実装に寄与する情報通信基盤整備のため、超高速、多数接続、超低遅延が可能となる第5世代移動通信システム(5G)の2020年までのサービス開始に向けた取組等を推進する。本年夏に、周波数確保に向けた基本戦略を取りまとめ、技術的条件や周波数確保の検討を加速する。あわせて、本年度以降、交通などの分野で具体的な利活用を想定した総合的な実証試験を、地方都市を含めた試験場所において実施するとともに、国際標準化活動への参画や電波利用環境の整備を積極的に推進する。」旨、記載されている。

- ・新しい経済政策パッケージ（平成29年12月8日閣議決定）

「第3章 生産性革命 3. Society 5.0の社会実装と破壊的イノベーションによる生産性革命 (4) Society 5.0のインフラ整備 ①通信インフラの強化 ii) 第5世代移動通信システム(5G)の実現・活用 - 超高速・大容量・多数接続・超低遅延の通信を可能とする5Gについて、2020年を目途に、世界に先駆けて実現し、自動走行などの具体的な用途を開拓しつつ、地方への普及展開を一気に進める。」旨、記載されている。

3. 目標

本研究開発は、2023年頃の5Gを活用したサービスの本格的な普及・展開に向けて、街灯、ビルの壁面等への柔軟な基地局展開を行うため、基地局の低消費電力化・小型化を実現するミリ波帯基地局構成技術、高速移動に対して追従可能なビーム制御や高速かつ安定したセル間のビーム切り替えを実現する高速移動体向けミリ波帯基地局連携技術及び基地局用機器間の相互運用性の確保・検証技術確立するものである。これにより高周波アンプでの帯域内消費電力を削減し、基地局の小型化や、多様な供給者による基地局用機器の提供に貢献するとともに、高速移動体で高速伝送を実現することで、周波数の効率的な利用や高い周波数の利用を加速させることを目標とする。

ア 基地局の低消費電力化・小型化を実現するミリ波帯基地局構成技術

28GHz帯等の高SHF帯において、1GHz幅程度の広帯域全体について効率20%以上の信号増幅を可能とし、実用化済みの移動体基地局用高周波アンプと比較して、消費電力の1/3の削減、高周波アンプサイズ1/3化による基地局サイズ1/3化を実現する。

また、70GHz 帯等の EHF 帯において、従来の基地局用高周波アンプと比べて熱抵抗を 30%削減し、1km 程度のカバレッジに必要となる出力を可能とする EHF 帯基地局用結晶・デバイス技術を実現する。

イ 高速移動体向けミリ波帯基地局連携技術

28GHz、39GHz 帯等のミリ波帯を用いる時速 90km 以上の高速移動体において、例えば、将来の数百 Mbps を超える映像コンテンツを 10 以上同時に安定して通信できる 4Gbps の高速データ通信の提供を可能とするために、周波数帯域幅 1GHz 程度における高能率な変調符号化方式及び複数ストリームの空間多重を通信に適用できる技術確立し、端末あたり 4 ビット/秒/Hz の周波数利用効率(同時収容端末数を 2 以上とする)を実現する。

ウ 基地局用機器間の相互運用性の確保・検証技術

基地局のオープン化を世界的に牽引しデファクト標準となっている O-RAN アライアンス[※]の仕様に準拠した基地局用機器間の相互接続性、および運用性を検証するための技術確立し、さらに当該技術をソフトウェアに実装して基地局用機器実機による実際の検証を実現する。

具体的には、現状、相互接続性や運用性の検証に要する期間がベンダの新機能リリースの期間に比べ 3 割程度長く、適時に各ベンダの製品の導入を検討することができていないことから、その期間を整合させるため、基地局用機器間の相互接続性及び運用性を検証するために必要十分な試験パターンの抽出・管理、試験シナリオの生成・管理、及び試験結果の解析・管理等の技術確立することで、検証に要する期間を 30%以上短縮する。この技術を適用し、これまで実質的に困難であった複数ベンダの基地局用機器を組み合わせた導入を実現することで、各ベンダがそれぞれ強みを持つ周波数有効利用技術(例：多層セル構成による大容量化技術、高速・低消費電力無線アクセス技術)が組み合わせられることにより、単一のベンダの基地局のみ利用する場合に比べて、全体で 30%の利用効率向上を実現する。

※ O-RAN アライアンス (<https://www.o-ran.org/>) : 5G 等の次世代無線ネットワークをよりオープンに構築することを目的として設立された業界団体

4. 研究開発内容

(1) 概要

ミリ波を活用したスモールセル基地局の電柱や街灯といった場所への柔軟な展開を行うため、基地局の低消費電力化・高効率化・小型化を実現するミリ波帯基地局構成技術、高速移動体に対して追従可能なビーム制御や高速かつ安定したセル間のビーム切り替えを実現する高速移動体向けミリ波帯基地局連携技術の研究開発を行う。さらに、異なるベンダ間の基地局用機器を組み合わせ、ネットワークの拡張性向上や運用の効率化を図ることも必要となるため、基地局用機器間の相互運用

性の確保・検証技術の研究開発を行う。グローバルには既に 5G の商用化が開始されているところ、これらの技術を確立することで 5G の普及・展開を加速させるため、当初の予定を前倒しして実施する。

ア 基地局の低消費電力化・小型化を実現するミリ波帯基地局構成技術

街灯やビルの壁面等への柔軟な基地局配置を可能とする 5G 基地局用高周波アンプに適用する半導体デバイス技術の開発。

イ 高速移動体向けミリ波帯基地局連携技術

鉄道や自動車等の移動体に搭載あるいは持ち込んだ 5G 移動局が時速 90km 以上の高速移動時においてもミリ波帯基地局との間において安定した高速データ通信を実現するための 5G 無線アクセス（又は無線エントランス）技術の確立。

ウ 基地局用機器間の相互運用性の確保・検証技術

0-RAN アライアンスの仕様に準拠した基地局用機器間の相互接続性及び運用性を検証するための技術の確立。より具体的には、基地局用機器間の相互接続性及び運用性を検証するために必要十分な試験パターンの抽出・管理、試験シナリオの生成・管理、及び試験結果の解析・管理等の技術。なお、課題ア、イにおける新技術の内容、及び動作検証における検証観点を共有することで、課題ウを効果的・効率的に実施すること。

(2) 技術課題および到達目標

技術課題

ア 基地局の低消費電力化・小型化を実現するミリ波帯基地局構成技術

(a) 高 SHF 帯 5G 基地局の普及・展開に向けたデバイス・回路技術の研究開発

アンテナ素子数について、4 素子程度を用いる 4G と比べ、5G では 256 素子以上の利用が検討されている。このため、既存の高 SHF 帯基地局用の高周波アンプを 5G 基地局に用いた場合、実装方法にもよるが、例えば、アンプサイズは約 6 倍となり、消費電力の増大による冷却部の肥大化も含め、基地局サイズは既存の 4G 基地局の 3 倍以上になる見込みである。このため、2023 年頃の 5G を活用したサービスの本格的な普及・展開に向けて、既に街灯や壁面へ設置されている 4G 用の基地局よりも低消費電力化・小型軽量化を実現する基地局構成技術が求められている。

高周波アンプの小型・高効率化を実現する手法として、トランジスタと高周波回路を半導体チップ上に集積化する技術（MMIC: Microwave Monolithic IC）が用いられているが、GaAs デバイスでは、高 SHF 帯基地局用途として十分な出力が得られないことが従前の課題となっている。また、SiC 基板上の GaN デバイスでは、元来 MMIC を適用することが困難であることに加え、消費電力が高く、ITU

において IMT-2020（いわゆる 5G）の要求条件として規定されている最大帯域幅 1GHz といった広帯域全体について、高効率化が難しいという課題がある。

本研究開発では、高周波回路を集積化するアンプモジュール技術を確立することで、単一の高周波アンプによって上記課題を解決し、高 SHF 帯における 1GHz 幅程度の広帯域全体を 20%以上の効率で信号増幅する基地局構成技術を開発する。

(b) EHF 帯 5G 基地局の普及・展開に向けた基板・結晶技術の研究開発

EHF 帯については、2016 年 7 月、米国 FCC は 64-71GHz 帯を 5G 用に開放することを発表した。また、ITU においても、2019 年の WRC-19 に向けて、86GHz 以下の周波数帯について、IMT 用への特定に向けた検討が進められている。これら 70GHz 帯等の EHF 帯 5G のユースケースとしては、現時点ではラストワンマイルの通信容量確保、将来的にはマイクロセルとしての運用等が検討されており、4G と同等のカバレッジを可能とする高出力な EHF 帯 5G 基地局の実現が期待されている。

高 SHF 帯基地局用に集積化・小型化したアンプをより高い周波数で動作させようとした場合、高 SHF 帯に向けて設計されたデバイス性能では、効率・性能が劣化する。このため、十分な出力を持つ EHF 帯基地局の実現には、数 W/mm の高出力動作を可能にする電流密度・耐圧を持ちうる半導体材料において、高速動作に必要な微細ゲート構造を可能にする結晶構造成長技術を確立する必要がある。さらに、動作周波数の増加に伴い、動作波長の縮小による集積回路面積の縮小、さらに回路の効率低下による発熱により、デバイスの熱抵抗に対する要求が厳しくなる。そこで、数 W/mm の高出力動作を可能にする半導体材料系において高品質の結晶性を保ちつつ熱抵抗低減技術を確立する必要がある。

本研究開発では、基地局アンプ用デバイス的高速・高出力化を可能とする半導体結晶構造を、絶縁特性や放熱特性に優れた基板上へ直接成長により作製する技術を確立する。さらに、半導体結晶を剥離により薄化し所望の基板上に転写する基盤技術を確立することにより、従来のデバイスと比べて熱抵抗を低減し、十分なカバレッジ確保に向け高出力動作が可能な EHF 帯基地局用デバイス技術を開発する。

イ 高速移動体向けミリ波帯基地局連携技術

5G によって、国民生活に不可欠な移動手段である鉄道の乗車時等においても容易に利用できる高速データ通信を提供可能とすることで、地域格差の無い高度情報化社会の実現に寄与することが求められている。米国、韓国等の主要国においても、高速移動時に 28GHz 帯、39GHz 帯等を用いて、Gbps オーダーの高速データ通信の実現を目標に検討が進められている。都市部から郊外地域に至るまで広範囲に鉄道等の交通網が発達した我が国においても、これまでの 5G 実証試験を踏まえて、高速移動時で数百 Mbps を超える映像コンテンツを 10 以上同時に安定し

て通信できる 4Gbps の高速データ通信の実現などが求められている。

高い周波数帯での活用が検討されているビームフォーミング技術を用いた場合、端末の方向に正確にビームを向けることが必要となるが、特に、高速移動体への追従性の確保やセル間の円滑なビーム切り替えを実現することが課題となっている。また、セル間の連携を強化するために光張出し構成によりセル間協調制御機能を適用しようとする、光伝送帯域幅の占有が増大することが課題となっている。このため、ITUにおいて IMT-2020（いわゆる 5G）の要求条件として規定されている周波数利用効率[※]についても、高速移動時には条件が緩和されているが、高速移動中も含めて 5G 利用を拡大するためには、上記課題の解決を通してさらなる周波数利用効率の向上が求められている。

本研究開発では、高速移動体に対応したビーム追従や、セル間の円滑なビーム切り替えを実現するための、ビーム制御技術やセル間協調制御技術の開発を行う。

※Report ITU-R M. 2410 において規定される要求条件

最高周波数利用効率 30 ビット/秒/Hz（下り） 15 ビット/秒/Hz（上り）

移動性能 1.12 ビット/秒/Hz（30km/h） 0.8 ビット/秒/Hz（120km/h）

ウ 基地局用機器間の相互運用性の確保・検証技術

ミリ波のビームフォーミングを始めとする 5G の新要素技術に対応した基地局用機器は多様な供給者により提供されることが想定されるが、基地局用機器間の相互運用性は一般に確保されておらず、機能や性能に優れた基地局用機器が市場に提供される場合であっても、相互運用性の制約により通信事業者のネットワークに導入されない場合があるという課題がある。

これに対し、5G をはじめとする次世代の無線アクセスネットワークのオープン化及びインテリジェント化を世界的に牽引している業界団体である、0-RAN アライアンスが、たとえば基地局の親局（0-DU：0-RAN Distributed Unit）と子局（0-RU：0-RAN Radio Unit）の間のフロントホールインターフェスの仕様を規定するなど、基地局用機器間のインターフェース仕様や、その使い方であるプロファイル仕様を仕様書として規定している。

本研究開発では、0-RAN アライアンスが規定した仕様どおりに基地局用機器が実際に動作して相互運用可能であることを検証するための技術の開発を行う。

到達目標

ア 基地局の低消費電力化・小型化を実現するミリ波帯基地局構成技術

- (a) 高 SHF 帯 5G 基地局の普及・展開に向けたデバイス・回路技術の研究開発
 - ・ 6 インチ等の大口径基板上に高密度に微細ゲート加工トランジスタを作製するための基地局用デバイス製造技術
 - ・ 高周波回路を集積化するためのアンプモジュール技術

上記の技術を確立し、28GHz 帯等の高 SHF 帯において、1GHz 幅程度の広帯域全体について効率 20%以上の信号増幅を可能とし、実用化済みの移動体基地局

用高周波アンプと比べて消費電力の 1/3 の削減、高周波アンプサイズ 1/3 化による基地局サイズ 1/3 化を実現する。

(b) EHF 帯 5G 基地局の普及・展開に向けた基板・結晶技術の研究開発

- ・ 50nm 以下のゲート長においても性能劣化しない高電子移動度トランジスタを作製するための構造設計・結晶成長技術
- ・ 数 W/mm の高出力動作を可能にする半導体材料系においても熱抵抗の削減を可能にする高品位結晶技術

上記の技術を確認し、70GHz 帯等の EHF 帯において、従来の基地局用高周波アンプと比べて熱抵抗を 30%削減し、1km 程度のカバレッジに必要となる出力を可能とする EHF 帯基地局用結晶・デバイス技術を実現する。

イ 高速移動体向けミリ波帯基地局連携技術

- ・ ベースバンド集約装置において効率的にビーム探索を行い、高速移動体への追従性能を向上するビーム制御技術
- ・ ベースバンド集約装置に接続する複数の超多素子アンテナ間を高速に切り替えるセル間ビーム切替え技術
- ・ 複数のベースバンド集約装置が接続されているセル間協調制御装置において、安定したセル移行（ハンドオーバ）を実現するセル間協調制御技術
- ・ セル間協調制御装置の機能の一部をベースバンド集約装置へ移すことで光伝送帯域幅を低減しつつ、追従性能をほぼ同等水準で維持できる機能分離技術

上記の技術を確認し組み合わせることで、28GHz、39GHz 帯等のミリ波帯を用いる時速 90km 以上の高速移動体において、周波数帯域幅 1GHz 程度を前提に端末あたり 4 ビット/秒/Hz の周波数利用効率(同時に基地局とデータ伝送を行う端末数を 2 以上とする)を実現する。

ウ 基地局用機器間の相互運用性の確保・検証技術

0-RAN アライアンスの仕様に準拠した基地局用機器間の相互接続性及び運用性を検証するために以下の技術を確認する。

- ・ 装置、構成、機能、パラメータ、処理シーケンス等の組合せによる試験パターンを、技術的難易度に基づく不具合発生リスクの重み付け等により検証精度の劣化を回避しつつ抽出し、実際に試験する試験パターンを全組合せに対して 40%以上削減し基地局用機器間の相互接続性及び運用性の検証を効率的に実施する技術
- ・ 試験シナリオ生成において、試験対象項目に付随して変更を要するパラメータのうち 20%以上を機械的に変更することで、正確性を犠牲にすることなく試験シナリオ生成ロジックを自動化する技術
- ・ 試験結果である各機能部のログデータの解析において、結果として出力さ

れる項目のうち 30%以上の項目を機械的に判定し効率化する技術
また、上記の技術をソフトウェアに実装し、基地局用機器実機による実際の
検証を実現する。以上により、検証効果を損なうことなく検証に要する期間を
30%以上短縮することを目標とする。

なお、当該技術を用いた検証の実施にあたっては、0-RAN アライアンスの成
果物として提供される予定のテスト仕様により、検証の要件、項目、網羅性を
チェックするものとし、また、テスト仕様は継続的な改版が見込まれるため、
本研究開発開始時点での最新仕様に基づいて開始し、開始後に改版される仕様
については実現性を踏まえつつ原則随時反映するものとする。

なお、上記の目標を達成するに当たっての年度毎の目標については、以下の例
を想定しているが、提案する研究計画に合わせて適宜設定して良いこととする。

<平成 30 年度>

ア 基地局の低消費電力化・小型化を実現するミリ波帯基地局構成技術

- ・ 6 インチ等の大口径基板上における高 SHF 帯 5G 基地局用の微細ゲート加工
デバイスの基本設計、試作による性能評価
- ・ EHF 帯 5G 基地局用デバイスの基板・結晶成長技術の検討、ゲート微細化を
含むプロセス技術の検討、構造設計、試作による性能評価
- ・ 数 W/mm の高出力動作を可能にする半導体材料系における、薄化高品位結晶
基板の剥離手法の検討、試作による性能評価
- ・ 薄化高品位結晶基板と熱伝導性に優れた基板との接合技術の検討、シミュ
レーション評価

イ 高速移動体向けミリ波帯基地局連携技術

- ・ 超多素子アンテナ及びベースバンド集約装置、移動局装置の開発、屋内実
験による基本性能評価
- ・ 高速移動に追従可能なビーム制御アルゴリズム及びセル間ビーム切り替え
アルゴリズムの検討、シミュレーション評価
- ・ セル間協調制御アルゴリズムの基本検討、シミュレーション評価

<令和元年度>

ア 基地局の低消費電力化・小型化を実現するミリ波帯基地局構成技術

- ・ 6 インチ等の大口径基板上での高 SHF 帯 5G 基地局用の微細ゲート加工デバ
イスの改良、MMIC アンプモジュールの基本設計
- ・ EHF 帯 5G 基地局用デバイスの基板・結晶成長技術及びプロセス技術の改良、
試作による性能評価
- ・ 薄化高品位結晶基板と熱伝導性に優れた基板を用いた転写法による高品位
結晶技術の検討、試作による性能評価

イ 高速移動体向けミリ波帯基地局連携技術

- ・ 超多素子アンテナ及び移動局装置の改良
- ・ ビーム制御アルゴリズム及びセル間ビーム切り替えアルゴリズムのベースバンド集約装置への実装
- ・ 屋外実験による基本性能評価
- ・ セル間協調制御アルゴリズムの検討、シミュレーション評価、同アルゴリズムを実装したセル間協調制御装置の開発

<令和2年度>

ア 基地局の低消費電力化・小型化を実現するミリ波帯基地局構成技術

- ・ 高 SHF 帯 5G 基地局用 MMIC アンプモジュールの試作による性能評価
- ・ 結晶成長技術及びプロセス技術を用いた EHF 帯 5G 基地局用デバイスの試作、性能評価
- ・ 高品位結晶技術の改良、性能評価

イ 高速移動体向けミリ波帯基地局連携技術

- ・ 超多素子アンテナ、ベースバンド集約装置、セル間協調制御装置、移動局装置を用いた屋外実験による総合評価
- ・ 屋外実験に基づいた各種アルゴリズムの最適化・改良

ウ 基地局用機器間の相互運用性の確保・検証技術

- ・ 装置、構成、機能、パラメータ、処理シーケンス等の組合せによる試験パターン抽出技術の開発
- ・ 試験シナリオ生成ロジック自動化技術の開発
- ・ 試験結果の機械的解析技術の開発

5. 実施期間

技術課題ア及びイ：平成30年度から令和2年度までの3年間

技術課題ウ：令和2年度の1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引き続き取り組む予定の「本研究開発で確立した技術の普及啓発活動」及び令和7年度までの実用化・製品展開等を実現するために必要な取組を図ることとし、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、課題ウについては、我が国において相互接続性の検証を行う体制が今後構築される際に当該研究開発の成果が活用されるよう必要な取組を図ることとし、その内容を提案書に具体的に記載すること。

(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、想定される5Gの利活用シーンを考慮しつつ、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、実施計画及び年度目標について具体的かつ実効性のある提案を行うこと。

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頂くと共に、実際の研究開発の進め方について適宜指導を頂くため、学識経験者、有識者等を含んだ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（海外の研究開発プロジェクト等との連携を想定する場合も含む）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。