

＜基本計画書＞

安全な無線通信サービスのための新世代暗号技術に関する研究開発

1. 目的

4Gや5Gといった無線通信において広く利用されている暗号技術については、近い将来実用化が想定される大規模量子コンピュータに、できるだけ早く対応していく必要がある。

公開鍵暗号方式については、実用的な大規模量子コンピュータが登場した場合、Shor のアルゴリズムにより多項式時間で効率的に解けるようになり、指数的な解読速度向上をもたらすことから、暗号として利用することができなくなる。このため、耐量子計算機暗号 (Post-Quantum Cryptography:PQC) と呼ばれる、大規模量子コンピュータにおいても計算困難性を有する新しい種類の暗号技術への移行が必要である。現在、PQC として様々な暗号技術が開発・提案されているが、現在公開鍵暗号方式として利用されている RSA 暗号の仕組みを利用した Post-quantum RSA 暗号を利用する場合、暗号文サイズは1ギガバイト(=2³⁰バイト)以上が必要であり、これは従来の RSA 暗号で必要とされる 2048 ビット(=2⁸バイト)に比べて段違いに大きいサイズとなる。この場合、通信路を流れる膨大な暗号文データのため帯域がひっ迫することになる。その他、多数の PQC の方式が提案されており、例えば鍵長が長い暗号文サイズが小さいものといったように、鍵長や暗号文サイズ、鍵生成や暗号化処理の時間といった多くの要素においてトレードオフの関係になっている(例えば、米国 NIST (国立標準技術研究所) に提案されている PQC の鍵長を見ても、数百バイト程度のものから数百キロバイト程度のものまで多様である。)

また、共通鍵暗号方式については、大規模量子コンピュータを用いても Shor のアルゴリズムのような効率的な解法は知られていないものの、Grover のアルゴリズムにより従来の古典コンピュータに比べて鍵探索の速度向上が可能となるため、鍵長をおよそ2倍程度の256ビットに増やすことが必要とされている。鍵長が増えると、暗号化に要する計算量や処理に要する時間も増えることとなり、処理能力が同じであると仮定すると、単位時間あたりに処理可能なデータ量は減少することとなる。このため、数十 Gbps といった超高速通信においては、暗号化処理がボトルネックとなることが想定され、無線リソースを有効活用できない状態となる。

本研究開発は、大規模量子コンピュータの利用を想定し、5G及びより高度な無線通信が求める超高速・大容量・多用途に対応した新世代暗号技術に関する研究開発を実施する。具体的には、鍵長を256bitにしても暗号化処理に要する計算量や処理時間を約50%低減させ、超高速な暗号処理を可能とする高速共通鍵暗号方式を設計するとともに、5G等が利用される様々なユースケースに応じて、オーバーヘッドがより少なくなるように公開鍵暗号に基づく耐量子計算機暗号(PQC)の機能付

加技術等を研究開発することで、暗号文サイズ等のオーバーヘッドを最大8%以内に抑えつつ大規模量子コンピュータへの安全性を担保しながら、限られた通信容量（無線資源）においてより多くのデータ送受信を可能とし、周波数のひっ迫状況の解消を図るものである。

2. 政策的位置付け

○統合イノベーション戦略 2020（令和2年7月17日閣議決定）

第三部

第1章 知の源泉

（2）信頼性のある自由なデータ流通の実現及びデータ駆動型社会の社会実装

②目標に向けた施策・対応策

＜サイバーセキュリティ統合知的基盤の構築＞

○5Gに対応したセキュリティ検証技術、IoT機器や通信機器等のコネクテッドデバイスのセキュリティ検証技術のほか、データのセキュリティやプライバシーを確保し、安全なデータ流通と利活用を促進する技術の創出を行うとともに、暗号技術の安全性評価や耐量子計算機暗号などの新たな暗号技術の開発により、量子計算機時代に安全に利用できる暗号基盤技術を確立する。

○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

④暗号等の基礎研究の促進

＜具体的取組＞

既存の暗号システムの危殆化につながる量子コンピュータ等の国際動向を把握しつつ、耐量子計算機暗号や量子暗号等の安全なセキュリティ技術の研究・技術開発に取り組む。

3. 目標

本研究開発では、5G、及びより高度な無線通信において、近い将来実用化が想定される大規模量子コンピュータに対応できるよう、①現状と同等の安全性を確保するために鍵長を倍にしつつ、超高速・大容量に対応した共通鍵暗号方式、②5G等の様々なユースケースに合わせた耐量子計算機暗号（PQC）への機能付加技術等を確立し、256ビット鍵を用いた共通鍵暗号処理に係る時間を最大50%削減すること、およびPQCにおける暗号文サイズ等のオーバーヘッドを最大8%以内に抑えることで、無線通信リソースの効率的な利用環境を提供することにより、無線リソースのひっ迫を抑止し電波の有効利用を図る。

4. 研究開発内容

（1）概要

5 G等無線通信の高度化においては、将来的に実用化が想定される大規模量子コンピュータに対応する必要がある。共通鍵暗号方式においては、鍵長の増加、公開鍵暗号方式においては、PQC への移行という課題がある。一方、それらの技術を適用する際には、5 G等が求める超高速・大容量等の通信特性を損なわず、計算資源や通信リソースにも影響を与えないよう配慮する必要がある。

本研究開発では、5 G等の特性を損なわない形で、①現状と同等の安全性を確保するために鍵長を256ビットにしつつ、超高速・大容量に対応した共通鍵暗号方式、②5 G等の様々なユースケースに合わせたPQCへの機能付加技術等を確立し、無線リソースのひっ迫を抑止することで電波の有効利用を図る。また、実用化に向けて暗号アルゴリズムやPQC活用ガイドラインの国際標準化に取り組む。

(2) 技術課題および到達目標

技術課題

ア 5 G等のための超高速・大容量に対応した共通鍵暗号方式技術（高速共通鍵暗号）

5 G、及びより高度な無線通信(端末と基地局の間の通信)においては、さらなる高速大容量化が図られると考えられ、既存の暗号方式よりも高速な共通鍵暗号方式が求められる。また、大規模量子コンピュータが実用化されると鍵の解読にかかる計算時間が削減されるため、現在利用されている鍵長(128ビット)を2倍に伸ばし、256ビット鍵を利用可能とする必要がある。一般に、速度と鍵長はトレードオフの関係にあり、既存の暗号方式で256ビット鍵を使用した場合には、速度低下を引き起こすため、5 G等の無線通信に求められるようなさらなる高速化は実現できない。そのため、計算機リソースが限られた携帯端末にも実装が可能であり、大規模量子コンピュータへの安全性を確保しながら、5 G等に適した高速な共通鍵暗号方式の確立が必要となる。

また暗号方式は、最新の解読手法、及び耐用年数を考慮しても十分な安全性を保持することが求められるため、最新の攻撃手法を調査するとともに、将来想定される攻撃手法の改良に対しても検討を行う必要がある。併せて、暗号方式の実用性を評価するためには、実利用に近い環境において、その性能等を実証評価する必要がある。

本課題においては、大規模量子コンピュータに対する安全性を確保しつつ、暗号化処理に要する計算量や処理時間を低減させた高速共通鍵暗号方式の確立を目的として、以下の研究開発を行う。

①高速共通鍵暗号方式の設計

大規模量子コンピュータにおいても、現実的な計算時間で解読できず、かつ計算機リソースが限られた携帯端末にも実装が可能な、5 G等が求める超高速・大容量に対応した共通鍵暗号方式の設計を行う。

②高速共通鍵暗号方式の評価

最新の攻撃手法を調査し、将来想定される攻撃手法の改良も考慮に入れた安全性評価指標を検討し、第三者評価も含め、高速共通鍵暗号方式の安全性評価を行う。加えて、セキュリティ機能のパッケージとして、耐量子性を持つ認証・鍵共有方式と組み合わせた無線通信プロトコルを実装し、無線通信環境において実証評価を行う。また、5G等の無線通信において、鍵の管理方法や鍵のライフサイクルが拡張される可能性も考慮して、課題イにおいて検討する耐量子計算機暗号である公開鍵暗号を用いた鍵共有と共通鍵暗号による暗号化を組み合わせた評価も行う。

イ 5G等のための耐量子計算機暗号の機能付加技術等（耐量子コンピュータセキュリティ技術）

5G環境では、すでに規格化された暗号化、認証、鍵管理技術が活用されているが、5Gの高度化の一環として、将来の大規模量子コンピュータの実用化を見据え、5Gの特性を損なわずに、PQC技術を実装する必要がある。

PQCに関しては、現在、米国NIST（国立標準技術研究所）が標準化のための評価(NIST PQC)を実施しており、格子問題、線形符号の復号問題、多変数連立方程式の求解問題等の計算困難性に基づいた複数方式の選定が見込まれる。将来の大規模量子コンピュータの実現を想定した5G等の無線環境においてこれらPQCを利活用するためには、鍵長や暗号文サイズ、鍵生成・暗号化・復号の処理時間などをユースケース毎に適切に検討することによる、無線リソースを逼迫させないためのPQCの選定、および当該方式におけるパラメータの選択などが重要となる。一例として、医療サービスにおける「遠隔手術」のユースケースを想定した場合、扱われる手術関連データの完全性、手術システムの可用性や低遅延性などが重要な特性と考えられ、これらの特性を加味した形でPQCの適用方法、実装方法の検討を進める必要がある。また、その際には、計算機リソースが限られた端末でも5Gの特性（低遅延等）を実現するため、物理層セキュリティについても併せて検討を行うことが重要となる。

本課題においては、5Gの様々なユースケースに応じてオーバーヘッドがより少なくなるような、NIST PQCの選定候補を含めた複数のPQCへの機能付加技術、管理運用技術、最適化技術（総称して耐量子暗号系セキュリティ技術）、及び耐量子暗号系セキュリティ技術において計算機リソースをより効率的に利用するための物理層セキュリティ技術（耐量子暗号系セキュリティ技術と総称して耐量子コンピュータセキュリティ技術）を確立することを目的として、以下の研究開発を行う。

①耐量子計算機暗号への機能付加技術

通信事業者が提供する5G基盤サービスを対象として、5Gの特性を維持した上で、既存の鍵配送方式、公開鍵暗号方式等を、耐量子計算機暗号と置き換えるための耐量子計算機暗号への機能付加技術の研究開発を実施する。具体的には、暗号文サイズを削減することで高速大容量通信の効果を上げ、暗号に動的アクセス制御機能等を付加することによりネットワーク内端末の多数接続状態を安全に管理し、復号時間を削減することで低遅延の効果を上げるための研究開発を行う。

② 5Gのアプリケーションに特化した耐量子計算機暗号の管理運用技術

医療系、交通系等、5Gを活用する様々なセクタにおけるユースケースを整理し、ユースケース毎に異なるセキュリティの機能要件(機密性、完全性、可用性等)を明確にすることで、5Gに対応した耐量子暗号系セキュリティ技術の研究開発を行う。具体的には、抽出した機能要件に基づき、それらに適合する耐量子計算機暗号の要素技術(公開鍵暗号、鍵配送、デジタル署名等)の選択、様々なユースケースに応じてパラメータ設定を適切に調整・管理するための管理運用技術を確立する。管理運用技術により、伝送速度、遅延、信頼性、トラフィック密度、接続密度等の観点から、高速・大容量、低遅延、多数接続の特性を最大限に生かすためのセキュリティ用プロトコルの設計を行う。

③ 5Gアプリケーション上の耐量子計算機暗号の最適化技術

医療サービス、交通サービス、金融サービス、放送サービス、教育サービス等の幅広いサービスが最適な形で耐量子暗号系セキュリティ技術を活用するためには、①耐量子計算機暗号への機能付加技術および②5Gのアプリケーションに特化した耐量子計算機暗号の管理運用技術について、ユースケースに応じて適切に融合する必要がある。具体的には、5Gの特性を損なわないよう、様々なユースケースに応じた機能選択やパラメータ設定を行うための耐量子計算機暗号の最適化技術を構築する。さらに、最適化手法を導出する時間などの観点から、本研究開発による最適化技術を定量的に評価する。

④ 5Gに適応する物理層セキュリティ技術

①～③で開発した技術を、計算機リソースが限られた端末でも実現するため、物理層セキュリティを5G用に発展させたモデルおよびセキュリティ要件を構築する。5Gの特性それぞれを活かした鍵配送方式や暗号化方式の構築を行うことを目標とし、実装および実証を通して、開発技術の有効性を通信速度や遅延時間などの観点から定量的に評価する。

到達目標

ア 5G等のための超高速・大容量に対応した共通鍵暗号方式技術（高速共通鍵暗号）

共通鍵暗号として、大規模量子コンピュータにおいても、現実的な計算時間で解読できない方式、かつ計算機リソースが限られた携帯端末にも実装が可能な設計を行う。さらに、一般的に入手可能な既存の計算機環境における暗号処理のスループットとして50Gbpsを達成すること、および暗号処理に要する時間を従来方式と比較して最大50%程度削減する。

イ 5G等のための耐量子計算機暗号の機能付加技術等（耐量子コンピュータセキュリティ技術）

通信事業者が提供する5G基盤サービスや各種ユースケースにおける5Gサービスにおいて、その特性を損なわない形の耐量子コンピュータセキュリティ技術を構築し、技術付与前と比較してそのオーバーヘッド（暗号文サイズ、処理時間等）を最大8%以内に抑える。また、PQCの活用の視点から、計算機リソースが限られた携帯端末等でも実装が可能な技術開発も行う。

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。

<令和3年度>

ア 5G等のための超高速・大容量に対応した共通鍵暗号方式技術（高速共通鍵暗号）

共通鍵暗号方式に関して、処理速度と安全性の観点から設計要件を抽出し、機能部品の選択等による設計指針の検討を行う。また、攻撃手法の調査等により、安全性及び機能性の観点から評価指針の検討を行う。

イ 5G等のための耐量子計算機暗号の機能付加技術等（耐量子コンピュータセキュリティ技術）

NIST PQCの選定候補を含めた複数の耐量子計算機暗号について、無線通信仮想環境における機能評価を行う。また、機能付加技術・最適化技術・管理運用技術に関する技術仕様設計および物理層セキュリティ技術のセキュリティ要件を検討する。

<令和4年度>

ア 5G等のための超高速・大容量に対応した共通鍵暗号方式技術（高速共通鍵暗号）

令和3年度に検討した設計指針に基づき、アルゴリズムの設計を行う。また、新たな攻撃手法の発見等、最新の情勢等に併せて評価指針の改良を行う。

イ 5G等のための耐量子計算機暗号の機能付加技術等（耐量子コンピュータセキュリティ技術）

令和3年度に設計した技術仕様に基づき、機能拡張技術・最適化技術・管理運用技術の構築を行い、無線通信の仮想環境において評価を行う。また、物理層セキュリティ技術の構築及び評価を行う。

<令和5年度>

ア 5G等のための超高速・大容量に対応した共通鍵暗号方式技術（高速共通鍵暗号）

令和4年に設計したアルゴリズムに対して、考えられる攻撃手法の計算量を見積もることで安全性の評価を実施する。また、アルゴリズムの実装を行い、処理速度等の機能性の評価を実施する。そして、抽出された課題に基づいて方式の改良を行う。

イ 5G等のための耐量子計算機暗号の機能付加技術等（耐量子コンピュータセキュリティ技術）

令和4年度に構築した機能拡張技術・最適化技術・管理運用技術および物理層セキュリティ技術に対して、実用性の立場から課題を抽出し、技術改良を行う。また、特定ユースケースにおける評価を実施する。

<令和6年度>

ア 5G等のための超高速・大容量に対応した共通鍵暗号方式技術（高速共通鍵暗号）

設計・改良したアルゴリズムについて、将来の無線通信環境を想定した環境で実証評価を行うとともに、課題イとの統合評価を行う。

イ 5G等のための耐量子計算機暗号の機能付加技術等（耐量子コンピュータセキュリティ技術）

令和5年度までに開発した機能拡張技術・最適化技術・管理運用技術および物理層セキュリティ技術に対して、将来の無線通信環境を想定した環境で実証評価を行うとともに、課題アとの統合評価を行う。

5. 実施期間

令和3年度から6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 11 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、多方面から関連する分野の学識経験者、有識者等を含んだ研究開発運営委員会等を定期的に開催する等、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、暗号技術を必要とする無線通信システムや先進的な暗号研究などの幅広い分野の研究機関が参加する等、研究開発を推進し、かつ技術開発状況や標準化動向に柔軟に対応出来る体制を構築すること。

＜基本計画書＞

無線・光相互変換による超高周波数帯大容量通信技術に関する研究開発

1. 目的

5G の商用サービスがスタートし、ユーザスループットとして 1Gbps を超える高速モバイル通信が普及しつつある。しかし、瞬間ピークレート 20Gbps を目指す 5G (3GPP における要求仕様) において、リモートアンテナ局と基地局内ベースバンドユニットを結ぶデジタル伝送システムを用いたモバイルフロントホールの容量不足 (4G と同じ方式では 20Gbps の無線接続のためにモバイルフロントホール区間の伝送容量として 200Gbps 超が必要。) が課題となっている。端末数及び通信容量の激増に伴いスモールセルも急激な増加が見込まれるが、地理的・コスト的要因等から全ての基地局・スモールセル間に光ファイバを敷設することは困難であるため、敷設が容易で 200Gbps を超える伝送容量が確保可能な無線通信技術の開発が急務である。また、北東アジアにおけるモバイルバックホールについて、2025 年にかけて、有線通信方式に対し無線通信方式のシェアが増加することが予測されており、今後無線バックホールの需要が高まっていくことが想定される。さらに、5G の進展に当たっては、更なるユーザスループットの向上に加え、Swarm IoT 応用等の超多数接続が要求されるため基地局とリモートアンテナ局を結ぶモバイルフロントホールの必要容量が激増することが予想されている。

さらに、新型コロナウイルス感染症 (COVID-19) の感染拡大に伴い、デジタル技術を活用したテレワークや遠隔会議、教育現場での遠隔講義等のリモート化があらゆる場面で急速に広がり、社会のデジタル化やサイバー空間とフィジカル空間の一体化 (CPS : Cyber Physical Systems)、デジタル・トランスフォーメーションの進展が求められている。そこで、極めて大量のデータ流通に対応すべく、通信インフラを高度化するため、光通信技術だけでなく、高周波数帯を利用した超高速・大容量無線通信を実現する必要がある。

一方、現行のマイクロ波を用いた商用固定無線通信システムは山間部等の光ファイバ敷設困難地域を中心に、モバイル通信用の基地局と基幹通信網を結ぶ無線バックホール回線として活用されているが、それらは高々数 Gbps の伝送容量にとどまるため、モバイルフロントホールとしての利用は困難である。このため、既存の技術のみで 5G の進展に伴うモバイルバックホール・フロントホールの容量拡大に対応しようとする膨大な周波数帯域が必要となり、周波数のひっ迫が予想される。300GHz 帯においては固定および移動通信システムの開発が進められているが、複数の業務での共用が必要であることと、200Gbps 以上の高速伝送実現には帯域幅が不足するという課題がある。Beyond 5G/6G では高周波ミリ波帯の活用によりユーザサイドでの実効速度のさらなる向上が図られるが、一方で、スモールセル化によりセル半径は 100m 以下となるため、無線バックホール・フロントホールで必要となる伝送距離は 100m 程度とな

る。

また、モバイルバックホール・フロントホール以外にも、工場内における大型可動装置の遠隔操作やワンマン運転を行う鉄道における車上からのホーム監視等、光ファイバを新規に敷設することが困難な、又は有線接続ができない箇所において、短距離伝送区間における超高精細映像の低遅延無線伝送が求められている。

本研究開発では、大気減衰の大きさからこれまで利用が進んでいなかった 350GHz 以上の周波数を利用した 200Gbps 超の低遅延・大容量無線伝送を実現することで、5G における無線バックホール・フロントホールに使用する周波数帯をマイクロ波・ミリ波よりも高い周波数帯に移行することにより、将来のマイクロ波・ミリ波の周波数ひっ迫を緩和する。また、多数の短距離高速無線リンクと光ファイバリンクでネットワークを構成するためには多数の光・無線変換部が必要となるため、光・無線変換部の構成の簡素化と処理遅延の低減を行うためには、モバイルバックホール・フロントホールにおいて光信号と無線信号がシームレスに接続されることが必須となることから、光ファイバ区間とのインタフェースを簡便化した構成についても研究開発を行う。

2. 政策的位置付け

・「Beyond 5G 推進戦略－6G へのロードマップ」

(令和2年6月30日報道発表)において「超高速・大容量といった 5G が有する特長の更なる高度化に加えて、自律性や拡張性といった新たな機能を実現するには、テラヘルツ波や光・量子、AI 等の非連続な飛躍的進化を可能とする先端技術を含む無線技術、ネットワーク技術、省エネ技術、セキュリティ技術、そして、これらの基盤となるソフトウェア関連技術等の開発・高度化・標準化が不可欠である。」旨の記載あり。

・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「なお、「5Gの次」も視野に入れ、新たな要素技術に関する研究開発や、その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。また、産業・ビジネス創出に寄与する産学連携等を同時並行で進めることとする。」の記載あり

3. 目標

本研究開発は、350-600GHz 帯を利用した無線伝送基盤技術を確立し、100m 以上の距離で 200Gbps 超の伝送容量、100 μ s 程度の遅延といった、超大容量低遅延無線伝送技術の実現を目指す。また、ミリ波帯も有効活用するとともに、マルチホップ方式に対応することにより、安定的かつ長距離の伝送を実現する。

また、無線バックホール・フロントホールは光ネットワークとシームレスに接続されることが必須となるため、光信号と RF 信号を直接変換するデバイスの実現を目指

す。その際、Beyond 5G /6G での無線セル狭小化に伴うフェムトセル基地局への信号配送を可能とするモバイルバックホール・フロントホールネットワークの低コストでの構築に資するため、光ファイバ区間とのインタフェースの簡便化を図る。

本技術の利用を通じて、5G における無線フロントホール・バックホールに使用する周波数帯を、5G で利用が想定されるマイクロ波・ミリ波よりも高い周波数帯に移行することにより、将来のマイクロ波・ミリ波の周波数逼迫を緩和する。

4. 研究開発内容

(1) 概要

超高周波数帯（350–600GHz 帯）における RF 技術及び光ファイバ信号との相互変換技術を開発し、ミリ波帯域も活用した 200Gbps 超の無線伝送システムの研究開発を行うとともに、これらの技術を組み合わせたテラヘルツ波・ミリ波統合ネットワークによる大容量通信の実証実験を実施する。

(2) 技術課題および到達目標

技術課題

ア テラヘルツ帯 RF 技術

本課題では、350–600GHz 帯で動作可能な通倍動作回路を基本要素とし、光ネットワークからの信号を直接無線信号に変換する化合物半導体チップを開発する。

従来の無線通信システムでは、有線（光）ネットワークからの信号をベースバンド部でデジタル化した上で波形等価・誤り訂正処理等を行った後、アナログ無線回路の変復調部に信号を受け渡すことで通信を行っている。また、必要な伝送容量の増大に伴い、ベースバンド部の回路規模が大きくなるため、従来と同様に CMOS により実現しようとする、消費電力や開発・製造コストの増加が問題となってくる。

そこで本課題では、これらのベースバンド処理は既に光ネットワーク側で行われたものを用い、比較的 low コストで大容量光信号波形を無線信号に変換可能な化合物半導体デバイスで直接変換することにより行うことでこれらの問題を解決する。具体的には、信号発生部に超高速光ファイバ通信技術が開発された部材・技術を援用し、RF 部開発に注力し、最低限のリソースで実用的な化合物半導体チップの開発を目指す。また、信号受信のための周波数変換デバイスや送受信オンチップアンテナ等の技術の開発及び実装も行う。これらを通じて、大容量無線通信システムを低遅延・低消費電力・低コストで早期実用化・展開に資することを目指す。

イ 光電気相互変換技術

本課題では、低位相雑音かつ高い基本発振周波数を有する光電気発振技術を基盤とし、光信号とミリ波・テラヘルツ信号を効率的に相互変換する技術の研究開

発を行う。

一般的な無線通信システムは 1GHz 程度のマイクロ波帯原振を逡倍することで無線基準信号を発生させているが、350-600GHz 帯へ逡倍するには 1GHz 原振では最低でも 350 逡倍が必要となり、その信号劣化が信号品質に影響を及ぼす。また、ガン・ダイオードによるミリ波帯原振も開発されているが、ガン・ダイオードのみで光信号に直接変換することはできず、信号品質を確保できないといった課題もある。そこで、光電気発振器により光信号から電気信号への直接変換を実現することで、高速光伝送向けに開発されたベースバンド信号処理を活用することが可能となる。

そこで本課題では、ミリ波帯周波数を基本周波数として生成可能な光電気発振器（光入出力、高周波入出力をもつ低位相雑音発振器）を開発することでテラヘルツ帯への逡倍数を削減し、信号品質の劣化の防止を図る。具体的には、光電気発振器を広帯域信号へ適用可能とする集積モジュール技術を開発し、簡便な構成で、信号形式を維持したまま帯域を大きく変化させる技術を開発する。また、光・無線変換部の構成の簡素化と処理遅延の低減を目的として、テラヘルツ帯/ミリ波帯と光ファイバ信号とを効率的に相互変換する技術を開発する。さらに 200Gbps 超の通信速度を 100GHz 程度の帯域で実現するため、光信号・無線信号の直通技術と逡倍に適した振幅多値変調等の信号形式について研究・開発を行い、周波数利用効率向上を図る。

ウ テラヘルツ波・ミリ波統合ネットワーク技術

本課題では、テラヘルツとミリ波を組み合わせることにより、高い可用性を有する無線ネットワーク技術の研究開発を行う。

テラヘルツ帯のアンテナは自由空間伝搬減衰を補償するために低周波数帯よりも相対的に指向性が鋭い。そのため、無線機設置時に精緻な方向調整が必要となるだけでなく、例えば、工場内等の可動装置や駅における列車停止時の列車-ホーム間の位置関係の変化や、暴風、経年変化によるアンテナ方向のずれ等が通信品質に大きな影響を及ぼすことが懸念されるなど、アンテナの方向調整にコストがかかることから、ミリ波帯リンクを用いて方向調整を自動的に行う必要がある。また、豪雨等の厳しい環境下においても可用性を維持するためには、環境変化に応じて信号形式を変化させずに適切な周波数帯へ切り替える必要がある。くわえて、テラヘルツ帯無線は自由空間伝搬減衰が大きく、単一の無線送受信機では必要な伝送距離を確保できない場合も想定される。

そこで、本課題では大容量通信のテラヘルツ帯と環境変化に比較的耐性のある通信のミリ波帯の効果的な切り替えや双方を組み合わせる技術を開発し、その実証を行う。具体的には、ミリ波帯リンクの受信状況とテラヘルツ波帯リンクの受信状況の相関について分析を行い、ミリ波受信状況からテラヘルツ帯アンテナの方向推定を行うとともに、設置時、経年変化時等のアンテナ方向を自動的に調整する技術の実装を行う。また、パケット・フレーム構造などを極力変えることな

く伝搬特性状況とユーザ要求により周波数帯を効果的に切り替え・組み合わせる伝送技術を開発することにより、接続可用性を高める制御技術の確立を行う。併せて、約 400m 離れた基地局の双方向接続を目指したマルチホップ型無線接続技術の実装を行う。その際、マルチホップ伝送時に課題となる信号劣化や伝送遅延の抑圧、各無線区間の可用性最適化によるシステム最適化についての研究を行う。

最終的に、課題ア～ウの技術を組み合わせた統合システムの構築を行い、屋内又は地下空間におけるシステム実証試験を実施する。具体的には、5G モバイルフロントホールと同等 140Gbps 超の回線容量が必要となる 8K 非圧縮映像の伝送実証を行う。

到達目標

課題アについては、課題イで生成される信号を IF として用い、逓倍による 350-600GHz 帯 RF 信号を生成する送信用化合物半導体素子とテラヘルツ帯 RF 信号から IF に変換する受信用化合物半導体素子を実現する。送信側の出力は 0dBm 以上とし、オンチップアンテナ実装やアンテナとの導波管インタフェースを有する構成により無線装置へ組み込み可能なモジュール化を実施する。キャリアアグリゲーションや偏波多重等を併用することにより、合計 100GHz 程度の帯域幅で伝送速度 200Gbps 超、変換処理遅延・伝搬遅延を含む遅延量として 100 μ s、通信距離 100m（1 対向時）程度の通信が可能となる無線システムを実現する。

課題イについては、350-600GHz 帯信号を効率の高い 3 逓倍器 2 直列に相当する 9 逓倍以下の周波数逓倍数で実現可能な光電気発振技術を開発し、高い信号品質を担保するため 10kHz 周波数オフセット時単側波帯位相雑音-90dBc/Hz 以下を実現する。また、課題アにて開発されるモジュールとの統合を考慮し、無線装置へ組み込み可能なモジュール化を実施する。光信号とテラヘルツ信号を相互変換するシステム技術を開発し、周波数帯域幅 50GHz 以上の信号相互変換を実現する。また、振幅多値変調など逓倍に適した多値変調形式の検討を行い、より周波数利用効率の高い無線システムを実現する。

課題ウについては、受信信号と気象等外部情報からアンテナ方向を推定するアルゴリズムを開発する。可動域（5 度程度）の範囲で無線機を設置した際に自動的にアンテナ方向を調整し、リンクを確立するとともに、当該可動域内で生じたずれに対する自動アンテナ方向制御により接続性を向上・維持する技術を確立する。また、ミリ波帯（例えば 60GHz、100GHz 等。当該ミリ波帯信号の生成に当たっては、利用周波数帯に応じて、課題イにて開発する光電気発振器だけでなくガン・ダイオード等も考慮し、最適な構成となるよう留意すること。）を制御信号及び小容量ユーザ信号伝送に用い、大容量伝送をテラヘルツ帯で実現するための制御機構を実現する。併せて、双方向マルチホップ伝送により伝送遅延をマ

ルチホップ数×100 μ s以下とし、伝送距離400mを実現するための波形等価増幅技術を確立する。開発した技術成果の実証として、屋内又は地下空間等におけるシステム実証試験を実施する。具体的には、5Gモバイルフロントホールと同等の140Gbps超の回線容量が必要となる8K非圧縮映像（例えば、8K120p YCbCr=4:4:4フォーマット、ビット深度12bit）の伝送実証を行う。

なお、上記の目標は課題毎（課題ウ技術成果の実証部分を除く。）に達成するとともに、課題ウ技術成果の実証部分において各技術を統合した際にも同等の目標を達成することを目指す。これら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3年度>

ア RF・信号処理技術の研究開発

- ・化合物半導体デバイスを設計するためのモデリング環境を構築し初期検証を実施する。
- ・送受信機に実装するためのテラヘルツモジュールの設計を行う。

イ 光電気発振技術の研究開発

- ・基本周波数を60GHz帯として動作する光電気発振技術の原理実証を行う。
- ・光電気発振モジュールへ実装するための光及び電気素子のモジュール設計並びに試作を行う。

ウ アンテナ方向制御技術の研究開発

- ・実験室環境においてアンテナの姿勢を推定するための基礎データ取得を行う。
- ・通信時に得られる諸データを利用し、アンテナ姿勢を推定するアルゴリズムを構築する。

<令和4年度>

ア RF・信号処理技術の研究開発

- ・350-600GHz帯において、半導体のモデリングと基本・要素回路の設計を行う。
- ・無線装置への実装へ向けたテラヘルツモジュールの試作及び評価を行う。
- ・8K120p非圧縮映像を伝送するための評価環境を構築し検証を行う。

イ 光電気変換技術の研究開発

- ・光電気発振モジュールの集積化に係る設計、試作及び評価を行う。
- ・光電気発振システムの動作原理を確認し実証を行い、課題の抽出及びフィードバックを行う。
- ・ミリ波帯信号と光信号を相互に変換する光電気相互変換技術の設計と原理検証を行い、課題の抽出及びフィードバックを行う。

ウ アンテナ方向制御・統合制御技術の研究開発

- ・前年度までに取得したデータ及びアルゴリズムを用い、アンテナ方向推定時の精度の検証を実施し、アルゴリズム等へフィードバックを行う。
- ・推定されたアンテナ方向から適切な方向へ補正する制御システムの試作を行い評価する。
- ・ミリ波とテラヘルツ波の周波数帯を同時に利用した制御・ユーザ信号を分離・結合するためのアルゴリズムを検討する。

<令和5年度>

ア RF・信号処理技術の研究開発

- ・送信・受信を行う統合回路の試作と検証を行う。
- ・テラヘルツモジュール用アンテナインタフェース及びオンチップアンテナ構造の設計・試作を行う。
- ・8K120p 非圧縮映像を伝送するテラヘルツ帯無線試作機の設計を行う。

イ 光電気変換モジュール技術の研究開発

- ・光電気発振モジュールを小型化する試作機の設計及び試作を行う。
- ・テラヘルツ帯信号と光信号を相互に変換する光電気相互変換技術の原理検証を行い、統合化へ向けた課題の抽出及びフィードバックを行う。
- ・周波数逡倍に対応した変調技術の設計・実装・基礎検証を実施し、課題の抽出を行う。

ウ 統合制御システムの研究開発

- ・無線機設置時を含む信号受信状況モニタリングによるアンテナ方向推定・制御システムを無線機へ実装する。
- ・ミリ波帯・テラヘルツ帯の受信状況に応じて適切な周波数帯へ切り替える適応型メディア選択手法の検討及び検証を行う。
- ・マルチホップ方式によるネットワーク接続距離の延伸技術の設計、実装及び検証を行う。また、マルチホップ時に増大する信号劣化や伝送遅延の抑制を目指した中継技術の設計を行う。

<令和6年度>

ア RF・信号処理技術の研究開発

- ・350-600GHz 帯無線送受信システムを構築し、動作実証を行う。
- ・8K120p 非圧縮映像を伝送するための信号処理装置を構築し、その動作実証を行う。

イ 光電気相互変換技術の研究開発

- ・小型化した光電気相互変換システムを構築し、その動作実証を行う。
- ・周波数逡倍に対応した変調システムを構築し、その動作実証を行う。

ウ 統合システムの研究開発

- ・ミリ波・テラヘルツ帯の周波数帯を同時に接続又は適時選択によりネットワークの高可用性を実現する総合無線システムの原理検証を行う。

- ・各課題における開発技術を統合したテラヘルツ無線システムの構築及び信号伝送に係る統合実証を行う。

5. 実施期間

令和3年度から6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。

なお、本研究開発が取り組む周波数帯域では450GHzまでの一部の帯域は既に固定通信業務に特定されているとともに、275GHz～1000GHzまでの研究課題が成立している。標準化活動の計画においては、特定されている450GHz以下の周波数に対しては他業務との周波数共用など周波数分配に向けた寄与文書を提案する計画、及び特定されていない450GHzを超える周波数に関しては275GHz～1000GHzまでの研究課題にのっとり、固定通信業務への特定に向けた基礎特性の寄与文書を提案する計画を含めること。

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研究開発成果の情報発信をはじめとする「本研究開発で確立した技術の普及啓発活動」及び令和11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。

<基本計画書>

アクティブ空間無線リソース制御技術に関する研究開発

1. 目的

無線通信の用途は日々拡大しており、中でも高精細な画像や動画の伝送は画像検査などの産業分野、遠隔手術や見守りなどの医療・介護分野、イベントにおける映像配信などの娯楽分野など、多岐にわたる様々な用途での活用が始まりつつあり、今後もこの流れは加速すると考えられる。5G時代やBeyond 5G時代においては、これらのアプリケーションが生み出す大量かつ低遅延性が求められるトラヒックを、無線通信ネットワークを通じて伝送する必要があり、携帯電話ネットワークのみならずプライベートなローカルエリアネットワーク（LAN）も、重要な役割を担う必要がある。

代表的なプライベート無線ネットワークである無線LAN（Wi-Fi）は周波数を切り替えることなくベストエフォートのCSMA（キャリアセンスにより無線チャネルの利用有無を確認し、他の機器が送信している間は送信を停止する方式）方式を用いるため、大容量・低遅延伝送を大量に收容するためには、一定量の通信帯域を継続して確保する点が課題となる。特に、民間予測において「2025年にはトラヒック量は4倍になる」という試算もあることを踏まえると、トラヒックの多いプライベートネットワークが互いに隣接した場合、大容量・低遅延トラヒックの收容に必要な通信帯域や通信機会の確保が困難な「干渉爆発」の状態になり、前述の課題がより顕著となる。

また、アプリケーションの利便性および信頼性を確保する観点からは、大容量・低遅延伝送を行う端末が電波の不感地帯に陥らないようにすることが重要である。

さらには、大容量・低遅延伝送を行うにはまとまった通信帯域が必要となることから、そのような通信を行う際には比較的高い周波数帯域を用いることが必要となるが、高い周波数帯域においては遮蔽により不感地帯が発生しやすくなるため、通信端末において良好な伝搬状況を維持することも大きな課題となる。

そのため、本研究開発課題では今後のプライベート無線ネットワークにおけるトラヒック増加に伴う干渉爆発、ならびに不感地帯の発生を回避すべく、伝搬路状況や干渉発生状況に応じてアンテナ指向性や信号の空間多重度を適応的に制御する技術（アクティブアンテナシステム）と、反射波の発生状況を変化させるIntelligent Reflecting Surface（IRS）や受信信号を再生して再放射するレピータといった伝搬路状況可変機構を用いて伝搬路状況を制御する技術と連携動作させ、通信端末の位置に応じて伝搬路を動的に制御して干渉や不感地帯を低減する、インテリジェント伝搬路制御技術を確立する。これに加えて、無線環境を把握して、必要となる無線リソースを効率的に管理して大容量・低遅延トラヒックの收容を可能とするレイヤ間連携アクセス制御技術を確立する。これらの技術の活用により、プライベート無線ネットワークの周波数利用効率の一層の向上を図る。

2. 政策的位置付け

- ・「統合イノベーション戦略 2020」（令和 2 年 7 月 17 日閣議決定）

「第Ⅲ部 各論 第 1 章 知の源泉 （1）社会のデジタル化を支える基盤整備」において、「研究開発として、超低遅延や超高信頼性等を保証可能な通信機能複合型ネットワーク技術や、光・電波融合アクセス技術として 6 G 時代以降のアクセス網での Tbps 級通信容量の実現に資するサブ Tbps 級メディア調和アクセス基盤技術の確立、複数の自動運転システム群・ドローンに確実にかつ効率的に接続するための無線技術の研究開発、極限的な環境でも確実に接続するためのワイヤレス拡張技術等の 5 年をめどとした技術の確立を目指す。」旨の記載あり。

- ・「新たな情報通信技術戦略の在り方」（令和 2 年 8 月 5 日情報通信審議会答申）

「第 2 章 国として重点的に取り組むべき研究開発」において、「タフ環境に適応する無線アクセス技術の研究開発：外来干渉や複雑な構造によるマルチパス等によって電波の利用が困難な環境（タフ環境）において、低遅延・高信頼を提供する無線ネットワークが必要になる群ロボットの制御等への適用を想定し、リアルタイム性を備えた電波の伝わり方の可視化技術、可視化された情報をもとにした周波数チャネル・通信経路等の通信資源最適化技術、高信頼・低遅延・多数同時接続を両立させる無線アクセス技術、及び電力・周波数の利用効率や接続性の向上を図る無線ネットワーク技術を確立する。」旨の記載あり。

- ・「周波数再編アクションプラン（令和 2 年度第 2 次改定版）」（令和 2 年 11 月 13 日総務省公表）

「新しい電波利用の実現に向けた研究開発等」において、「施設内等の狭空間において、無線 LAN や IoT システムの無線通信システムの稠密な利用を可能とするため、電波環境に応じて周波数・通信方式等を制御する技術や、既存チャンネルを複数に分割・冗長化し高信頼性の無線通信を実現する技術等の研究開発を推進する。」、「920MHz 帯、2.4GHz 帯及び 5GHz 帯の電波を利用する IoT システムにおいて、IoT の超多数同時接続や低遅延化に対応するため、ネットワーク仮想化技術やプラットフォーム技術等を応用することにより、IoT 機器とネットワークの有線・無線一体となった IoT システム全体を最適に制御し、周波数の有効利用を図る技術等の研究開発を推進する。」旨の記載あり。

3. 目標

以下の課題ア、課題イで研究開発した技術を統合して、それらの技術を使用しない場合に対し、大容量・低遅延トラヒックに関する面的周波数利用効率（単位面積・単位周波数当たりの収容可能トラヒックの比）を 4 倍以上に改善する。また、アクセスポイントを増やすことなく不感地帯を減らすために大容量・低遅延トラヒックを収容可能な場所率（エリア全体に対する大容量・低遅延トラヒックを利用可能

なエリアの面積比) を 2.25 倍以上 (距離換算で 1.5 倍以上) に改善する。

4. 研究開発内容

(1) 概要

本研究開発ではプライベート無線ネットワークにおける多数の大容量・低遅延トラフィック收容の実現に向けて、課題ア 干渉抑圧と不感地帯対策を両立させるインテリジェント伝搬路制御技術、課題イ レイヤ間連携アクセス制御技術の研究開発を行う。なお、確立する技術の適用先周波数帯としては 2.4 GHz 帯、5 GHz 帯 (ならびに将来的な 6 GHz 帯への適用も含む)、および 60 GHz 帯を想定する。

(2) 技術課題および到達目標

技術課題

課題ア 干渉抑圧と不感地帯対策を両立させるインテリジェント伝搬路制御技術

アー1 インテリジェント伝搬路制御技術の研究開発

大量の大容量・低遅延トラフィックを同時に收容するためには、同一無線チャネルを利用する無線装置 (アクセスポイントや端末) 間での与・被干渉を極力抑えるとともに、場所率改善のために端末が電波の不感地帯に陥らず、アクセスポイントとの間で良好な伝搬状況を維持する必要がある。そのためにはレピータや IRS などにより構成される伝搬路状況可変機構を導入するとともに、これとアクティブアンテナシステムとを適切に制御し、与・被干渉の低減と所望信号の受信電力の確保を実現する必要がある。

そのため、同一無線チャネルを利用するアクセスポイントや端末が多数存在する干渉爆発環境下において、アー2にて確立する端末トラッキング技術との連携や、既存技術の適切な制御等を行うことにより、与・被干渉の低減と不感地帯を解消し、大容量・低遅延トラフィックの收容数改善に寄与する伝搬路状況可変機構とアクティブアンテナシステムの制御技術の確立に向けて、以下の技術の研究開発を実施する。

アー1-(a) 伝搬路状況可変機構方式の検討

与・被干渉を極力抑えるとともに、場所率を改善するように伝搬路状況可変機構を適切に制御するためには、無線装置間や、無線装置と伝搬路状況可変機構の間などの伝搬路状況を正確に把握する必要がある。これを行うにはプローブ信号などを送信する必要があるが、特に送受信機で多数のアンテナ素子を利用する場合や、レピータや IRS を活用する場面は把握すべき伝搬路が多く、オーバヘッド増大の原因となり得る。そのため、低コストで伝搬路状況を正確に把握可能な技術を開発する。

また、伝搬路状況可変機構を構成する IRS については、プライベート無線ネッ

トワークでの利用を想定し、低アンテナ高や屋内環境などの利用環境に適した IRS の構成について検討を行う。さらに、同一無線チャネルを利用するアクセスポイントや端末が多数存在する干渉爆発環境下において与・被干渉や不感地帯の解消が可能となるよう、無線装置のキャリアセンス等を考慮した上で、適切に伝搬路状況可変機構を制御する指針、および小さな制御オーバーヘッドで伝搬路状況可変機構を制御する具体的な手法を開発する。

アー１－(b) アクティブアンテナシステムの検討

伝搬路状況可変機構が利用可能な環境に適したアクティブアンテナの構成を確立するとともに、伝搬路状況可変機構制御方式やアー２にて確立する端末トラッキング技術と連携し、これらを効率的に活用して与・被干渉の低減と不感地帯を解消するアクティブアンテナ制御手法を開発する。開発するアクティブアンテナは 2.4 GHz 帯、5 GHz 帯、60 GHz 帯などの複数の周波数帯に適用可能なものとし、6 GHz 帯以下では 8 多重程度、ミリ波帯では、ビーム幅 10～20 度、2～4 多重程度とする。

アー２ 端末トラッキング技術の研究開発

利用可能な周波数幅が広いミリ波帯などでは回折や散乱による見通し外伝搬が期待できないことから、端末の位置を高精度に把握しておくことにより、インテリジェント伝搬路制御における伝搬路状況可変機構およびアクティブアンテナシステムの制御に際して、制御の高精度化や制御オーバーヘッドの著しい低減が実現できると期待される。

高精度に位置情報を取得する手段として GPS があるが、無線 LAN が主に利用されている屋内ではこれを利用することができない。現在の無線 LAN ではフレームの受信側において既知信号を用いた伝搬路推定を行っているものの、それにより得られる伝搬路情報のみからでは、端末位置を推定することはできない。

そのような状況下で、トラフィックが削減される事を目指し、端末位置を推定するため、以下の技術の研究開発を実施する。

アー２－(a) 端末位置検出技術

既存の位置検出技術として、受信電力や電波の到来方向を用いる方法が存在する。しかしながら、屋内では電波の反射波の影響により、電波の到来方向と端末位置の一致が難しく、また、デッドスポットと呼ばれる電波の弱い場所が生じるため、電波の強度・方向のみでは正確な位置の推定が難しい。一方、端末内には、GPS 以外にも位置情報把握の一助になりうる様々なセンサが内蔵されていることから、端末位置検出に有効な手段と考えられる。これらの状況を踏まえ、複数のアクセスポイントからの電波や異なる周波数の電波、端末内のセンサ情報などを適切に活用して、位置情報の検出精度を向上させる技術を確立する。

アー２－(b) 移動端末位置予測技術

屋内では電波の到来方向は複雑となり、またフェージングにより電波の強度も大きく変動するため、距離と受信電力が必ずしも対応しない。よって、電波のみを用いる位置推定方式では、複数の位置候補が検出される可能性がある。予め端末の位置や動きを予測することが出来れば、複数の位置候補の中から正しい端末位置を特定することができる。そのため、端末の属性や移動ベクトル、過去の移動履歴などを活用して端末位置を予測する技術を開発する。

課題イ レイヤ間連携アクセス制御技術

常に高い通信レートを必要とするような大容量アプリケーションを安定的に伝送するためには、無線リソースを十分に確保する必要があるが、干渉爆発が生じると無線リソースの割当てが困難な状況に陥ることとなる。また、従来の考え方では、ネットワークインターフェース層(物理層、媒体アクセス制御層)による時間・空間・周波数領域の無線リソース制御と、アプリケーションの要求条件に直接影響を与えるアプリケーション層ならびにトランスポート層におけるプロトコル制御は、独立に行われてきたため、例えば、アプリケーションの要求条件に対して、過剰な無線リソースが設定され、他のアプリケーションに設定する無線リソースが枯渇するような状況が発生する。特に無線リソースが限られる干渉爆発環境下においては、その影響は大きい。

そのため、無線リソースが限られる干渉爆発環境下においてもアプリケーションの要求を満たすために、時間・周波数・空間の各無線リソースの効率的な活用、並びに無線リソース制御によって達成し得るネットワークインターフェース層の通信品質をトランスポート層やアプリケーション層と共有し、レイヤ間の効率的な情報連携を実現するインターフェースを備え、各アプリケーションに設定する伝送プロトコルの動的制御を行うことにより、従来手法とは異なり、アプリケーション層から、無線レイヤまでを一括して制御する、レイヤ間連携アクセス制御技術が必要となる。

到達目標

課題ア 干渉抑圧と不感地帯対策を両立させるインテリジェント伝搬路制御技術

アー１ インテリジェント伝搬路制御技術の研究開発

伝搬路状況可変機構を利用しない従来のアクティブアンテナシステムと比較して高い伝送レートで通信可能なエリアを拡大し、面的周波数利用効率を、伝搬路状況の制御に必要となるオーバーヘッドを加味した上で2倍以上に改善し、大容量・低遅延アプリケーションが実現可能な場所率を1.5倍以上改善することを性能目標とする。

アー２ 端末トラッキング技術の研究開発

端末位置の推定精度として、最も近いアクセスポイントから5m離れた位置に

において誤差 10cm を性能目標とする。

課題イ レイヤ間連携アクセス制御技術

アプリケーションを実行したとき、レイヤ間連携アクセス制御を用いない場合と比較して、レイヤ間連携アクセス制御を用いた場合に、利用可能な周波数帯や帯域幅を変えずに、面的周波数利用効率を 2 倍以上に改善し、大容量・低遅延アプリケーションが実現可能な場所率を 1.5 倍以上改善することを性能目標とする。

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 3 年度>

課題ア 干渉抑圧と不感地帯対策を両立させるインテリジェント伝搬路制御技術

アー 1 インテリジェント伝搬路制御技術の研究開発

- ・伝搬路状況可変機構の構成に関する基本検討を行うと共に、伝搬路制御方式の基本方式を考案する。
- ・伝搬路状況可変機構の利用を念頭においた、アクティブアンテナシステム制御の基本方式を考案する。

アー 2 端末トラッキング技術の研究開発

- ・端末位置の推定に用いる情報の選定と、その入手手法およびこれを用いた端末位置推定手法の基本設計を行う。

課題イ レイヤ間連携アクセス制御技術

- ・アクセスポイント単体における空間多重・マイクロ波・ミリ波連携に関する基本検討を行うとともに、無線リソース制御方式の基本方式を考案する。
- ・アクセスポイント単体におけるレイヤ間連携アクセス技術のプロトコルに関する基本検討を行うとともに、レイヤ間インターフェースの基本方式を考案する。

<令和 4 年度>

課題ア 干渉抑圧と不感地帯対策を両立させるインテリジェント伝搬路制御技術

アー 1 インテリジェント伝搬路制御技術の研究開発

- ・伝搬路状況可変機構の構成に関する詳細検討を行うと共に、伝搬路制御方式の改良方式を考案する。
- ・伝搬路状況可変機構の利用を念頭においた、アクティブアンテナシステム制

御の改良方式を考案し、計算機シミュレーションによる機能検証を行う。

アー２ 端末トラッキング技術の研究開発

- ・ 端末位置の推定に用いる情報の入手手法および端末位置推定手法に関する詳細設計を行い、実デバイスを用いた機能検証を行う
- ・ インテリジェント伝搬路制御技術への端末位置情報提供方式の基本設計を行う。

課題イ レイヤ間連携アクセス制御技術

- ・ アクセスポイント連携も含めた時空間リソース最適制御方式に関する詳細検討を行うとともに、計算機シミュレーションによる機能検証を行う。
- ・ 大容量アプリケーションの実行を念頭において、レイヤ間連携アクセス技術の改良方式を考案し、評価用無線通信システムへの機能実装を進める。

<令和５年度>

課題ア 干渉抑圧と不感地帯対策を両立させるインテリジェント伝搬路制御技術

アー１ インテリジェント伝搬路制御技術の研究開発

- ・ 伝搬路状況可変機構とアクティブアンテナシステムの統合制御手法を考案し、性能目標達成の見通しを得る。
- ・ 端末位置推定系と連携動作するインテリジェント伝搬路制御系を構築し、機能検証を行う。

アー２ 端末トラッキング技術の研究開発

- ・ インテリジェント伝搬路制御技術と連携動作する端末位置推定系を構築し、機能検証を行う。
- ・ 必要に応じて端末位置推定手法を改良し、性能目標達成の見通しを得る。

課題イ レイヤ間連携アクセス制御技術

- ・ 評価用無線通信システムへの機能実装と評価を実施し、性能目標達成の見通しを得る。
- ・ 課題アとの技術連携への拡張性も確保しつつ、各種アルゴリズム改良について検討を行う。

<令和６年度>

課題ア 干渉抑圧と不感地帯対策を両立させるインテリジェント伝搬路制御技術

アー１ インテリジェント伝搬路制御技術の研究開発

アー２ 端末トラッキング技術の研究開発

課題イ レイヤ間連携アクセス制御技術

- ・インテリジェント伝搬路制御系、端末位置推定、レイヤ間連携アクセス制御系の各要素技術が連携動作する系を構築する。
- ・干渉爆発環境下において各要素技術を統合したシミュレーションや実験による評価を実施し、必要に応じて各種制御技術の改良および拡張可能性について検討を行い、総合的な性能目標の達成を確認する。

5. 実施期間

令和3年度から6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。

＜基本計画書＞

リアルタイムアプリケーションを支える 動的制御型周波数共用技術に関する研究開発

1. 目的

5G等の技術進展に伴い、工場自動化や建設機械の遠隔制御、医療分野での遠隔診断等の様々なサービスへの活用を念頭に、次世代の無線規格では低遅延・高信頼化に向けた検討が始まっている。特に、工場等ではIoT機器の導入が急速に進められ、これまで有線で接続されていた機器の無線化が進んでおり、有線通信と無線LAN、5G等の複数の無線システムが融合したヘテロジーニアスなローカルエリアネットワークとしての無線通信の活用に期待が高まっている。

他方、無線通信には特有の課題として、ノイズや他通信からの干渉、パケットロス等により常に通信が途絶・遅延する可能性があるため、有線系ネットワークの技術を無線通信にそのまま適用することは困難である。また、製造現場等における制御システム等のリアルタイム性の高いアプリケーションからの通信に対して、従来の無線通信ではデータ到達時間の保証を行うことができないといった課題がある。さらに、一般に大容量通信と、データの到達時間保証や高信頼性を求める通信はどちらも多くの周波数リソースが必要であり、限られた周波数資源において固定的なスケジューリング・リソース配分をすると、通信要件の異なる多様なアプリケーションを同時に収容できなくなるといった問題が発生する。今後、ポストコロナ等の状況を踏まえると、更に広範な分野において無人化・遠隔作業等のニーズが急速に高まり、データの到達時間保証や高信頼性を要求するユースケースの増加・拡大に伴い周波数需要の急激な増大が予測される。

このような課題に対応するため、無線通信と有線系ネットワークが融合し、通信要件の異なる複数のアプリケーションが混在する環境において、データの到達保証を行いつつ多数のアプリケーションを収容するためのネットワーク最適制御を行う技術の実現が必要である。本研究開発では、複数の異なる周波数帯の無線リソースを仮想的に1つのリソースとみなして動的に管理することにより通信の到達保証を行う技術、有無線ネットワークを動的にスライシングすることにより最適制御を行う技術を確立することで、既存の周波数を用いた高信頼性の無線通信を実現しつつ、周波数の共用及び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

- ・「統合イノベーション戦略2020」（令和2年7月17日閣議決定）

「Ⅱ. 3. ③レジリエントで持続可能な社会・経済構造の構築」において5G等の情報通信技術の製造現場での本格活用のための技術開発や先行事例の創出に向けて取り組む」旨が記載されている。

- ・「成長戦略フォローアップ」（令和2年7月17日閣議決定）
「4.（2）v）次世代産業システム ①サプライチェーンにおけるデータ連携・活用の促進」において、「5G等の情報通信技術の製造現場での本格活用のための技術開発や先行事例の創出に向けて取り組む」旨記載されている。
- ・「新たな情報通信技術戦略の在り方」第4次中間答申（令和2年8月5日）
「4. 2. 1. 2（3）②製造分野」において、「制御系のワイヤレス化への期待から更なる低遅延や遅延保証等への要求を満たすための標準化作業が見込まれ、この動きを活用する視点が重要」の旨が記載されている。

3. 目標

通信要件の異なる複数のアプリケーションが混在する環境下においても、リアルタイム性の高いアプリケーションに対して確実な通信を行うための技術として、ローカルエリアネットワークにおける無線リソースの仮想化・動的管理技術及び遅延保証技術、オンデマンドネットワークスライシング技術を確立する。これらの取組により、製造現場における制御システム等の優先度の高いアプリケーションの動作に必要な一塊のデータブロックを規定時間内に配送する遅延保証（パケット多重化した通信に対して10～100msec以内）を可能としつつ、スライシングによるネットワーク全体の最適制御を行い、周波数利用効率及び同時利用可能なアプリケーション数を2倍以上とすることを目指す。

4. 研究開発内容

(1) 概要

本研究開発では、通信要件の異なる複数のアプリケーションが混在する場合においてもリアルタイム性の高いアプリケーションに対して確実に到達保証時間内の通信を可能とするため、Wi-Fi、Bluetooth、特定小電力無線、ローカル5G等の様々な無線通信と有線通信が融合したヘテロロジーニアスなネットワーク環境において、ネットワーク内に分散された複数の異なる周波数帯の無線リソースを仮想的に1つのリソースとみなし特定のアプリケーションに対して優先度に応じた割り込み処理や時限的な専用帯域を予約・確保することにより通信の到達保証を行う技術、ネットワークの状態を考慮しつつアプリケーションの要求に応じて動的に最適制御を行うネットワークスライシング技術の確立に向け、以下の区分により研究開発を実施する。

- ア 無線リソースの仮想化・動的管理及び遅延保証技術
- イ オンデマンドネットワークスライシング技術

なお、各技術の開発に当たっては、各区分の研究成果を周波数有効利用技術として統合して研究開発目標を達成するため、本研究開発全体の取りまとめを行う実施者を定めるとともに、各区分の研究開発実施者は相互に連携・協力して研究開発を

実施する。

更に、これらの研究開発成果を広く展開することで、社会実装にも寄与するため、国内及び海外の動向を調査し、実用化や国際標準化を目指した取組を推進する。

(2) 技術課題および到達目標

ア 無線リソースの仮想化・動的管理及び遅延保証技術

技術課題

無線通信特有の課題として、ノイズや他通信からの干渉、パケットロス等により常に通信が途絶・遅延する可能性があるため、従来のローカルエリアネットワークにおける固定的なスケジューリングではリアルタイム性の高いアプリケーションからの突発的な通信に対応し、データ到達時間の保証を行うことができない。また、とりわけ製造分野における有線系ネットワークは集中制御を前提としているため、自律分散制御を前提としている無線 LAN 等の複数の無線システムが有線系ネットワークと融合したヘテロロジーニクスなネットワーク環境においては、統合的なリソース制御・管理をどのように実現するかという課題がある。こうした課題に対応し、通信要件の異なる複数のアプリケーションが混在する場合においてもリアルタイム性の高いアプリケーションに対してデータ到達時間を保証し、高信頼な通信を可能とするため、以下の研究開発を実施する。

- ・ローカルエリアネットワーク内に分散された無線リソースを仮想的に一つのリソースとみなして集中的に制御することで高速かつ最適なスケジューリングを行う技術
- ・周囲の電波環境等を踏まえ、無線区間の特徴的な環境変動を推定しつつ実際の無線環境情報を加味して、アプリケーションの動作に必要なデータ全体が到達するまでの到達時間を含めて通信環境を評価する技術
- ・無線ネットワークの通信状況、アプリケーションからの要求条件等を高速で収集・分析するエッジ処理技術
- ・上位層のアプリケーションの許容遅延に応じて、下位層の無線環境の情報を踏まえつつ、割り込み処理や時限的な専用帯域の事前確保を行うことで、アプリケーションが必要とするデータブロックの到達時間保証を行う技術

到達目標

ネットワークにおける統合的なリソース管理のための情報収集及び分析を高速に行いつつ、制御システム、AGV (Automated Guided Vehicle) 及び高精細画像伝送等、到達時間保証が必要な少なくとも 3 種類の異なるアプリケーション (10msec、20msec、100msec の遅延保証が必要と仮定) に対して、時限的な専用帯域の確保により各アプリケーションの動作に必要な特定のデータブロックの到達時間保証を可能とする有無線ネットワーク制御技術を開発する。なお、到達時間保証の実現にあたっては、他のシステム等からの電波干渉があり通信要件の異なる複数のアプリケーションが混在する環境を前提とし、共用周波数における

最小帯域幅のチャンネル（例：各アプリケーションが 802.11a (AGV)、802.11ac (リモート制御)、802.11ax (高精細映像監視) を使用している場合、最小帯域は 20MHz) を用いて遅延保証を行う。当該技術及び課題イで開発する技術を連携させることにより、遅延保証と周波数利用効率の向上を両立し、パケット多重化した通信に対しては、End-to-End で 10msec, 20msec, 100msec 以下の遅延保証を行いつつ、固定割り当てと比較して周波数利用効率 2 倍以上の向上を実現する。

イ オンデマンドネットワークスライシング技術

技術課題

一般に、到達時間保証及び高速大容量通信には多くのリソースが必要であり、固定的なリソース配分では多様なアプリケーションを同時に收容することができず、常時専用帯域を確保すると周波数の逼迫が生じるという課題がある。加えて、マルチパスフェージングや同一チャンネル間干渉等の影響等により動的に通信環境が変動する無線通信においては、有線ネットワークで固定的に実施されているネットワークスライシング技術をそのまま適用することも困難である。こうした課題に対応し、多様な通信要件のアプリケーションを限られた周波数資源内に收容することを可能とするため、以下の研究開発を実施する。

- ・各無線通信の送信電力やデータレート等を協調制御することにより無線通信の干渉低減を行う技術
- ・ハードウェアの応答時間や制御限界等を考慮しつつアプリケーションの要求に応じて動的に変動する有無線ネットワークの資源を仮想化し、データリンク層の制御により適応的にスライシング（資源割り当て）することでネットワーク全体の最適制御を行う技術
- ・仮想化された無線リソースを基にアプリケーションの通信要件を満たす通信経路を高速に確保する技術

到達目標

到達時間保証が必要な少なくとも 3 種類の異なるアプリケーション（10msec、20msec、100msec の遅延保証が必要と仮定）が共存する状況において動的に変動する有無線ネットワークを適応的にスライシングすることによりネットワーク全体の最適制御を行い、多様な通信要件のアプリケーションを同時に收容することを可能とする。また、無線通信でネットワークスライシングを実現するために、無線通信の到達範囲や通信環境を考慮しつつ、各無線通信の送信電力及びデータレート等の協調制御により干渉回避を行うとともに、アプリケーションの要求に応じて適切な通信経路を高速に確保する技術を開発する。当該技術及び課題アで開発する技術を連携させることにより、時限的に確保された仮想の専用帯域に対して必要な周波数及び送信タイミング等の制御を可能とし、各アプリケーションに必要なデータ到達時間について 10msec、20msec、100msec の遅延保証を行う。また、限られた無線リソースを動的かつ最適に配分することで、周波数利用効率

を固定割当ての場合と比較して2倍以上に向上させ、同種のアプリケーションについて同時利用可能な数を2倍以上に増加させる。

なお、上記課題ア、イ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、以下を記載例として、提案する研究計画に合わせて設定すること。

(例)

<令和3年度>

ア 無線リソースの仮想化・動的管理及び遅延保証技術

- ・動的リソース最適割当て技術の開発
- ・動的専用帯域確保技術の開発
- ・無線環境アセスメント技術の開発
- ・高速エッジ処理技術の開発

イ オンデマンドネットワークスライシング技術

- ・協調制御技術の開発
- ・オンデマンドネットワークスライシング最適化アルゴリズム検討のためのシミュレーション
- ・オンデマンドネットワークスライシング評価システムの開発
- ・適応的高速通信経路確立技術の開発

<令和4年度>

ア 無線リソースの仮想化・動的管理及び遅延保証技術

- ・動的リソース最適割り当て技術及び動的専用帯域確保技術統合
- ・無線環境アセスメント技術を用いた評価システム設計
- ・高速エッジ処理技術の改良

イ オンデマンドネットワークスライシング技術

- ・協調制御技術及びオンデマンドネットワークスライシング技術統合
- ・適応的高速通信経路確立技術の改良

<令和5年度>

ア 無線リソースの仮想化・動的管理及び遅延保証技術

- ・統合システム実装
- ・統合システム評価・実証

イ オンデマンドネットワークスライシング技術

- ・オンデマンドネットワーク技術及び適応的高速通信経路確立技術統合
- ・統合システム実証

5. 実施期間

令和3年度から令和5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。標準化活動の推進にあたっては、社会実装・製品展開と合わせて検討を行うことが効果的であるため、関連企業との連携も見据えた提案を行うこと。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、従来技術との差異を明確にした上で、各技術課題の解決手段が主にソフトウェア開発又はハードウェア開発のいずれによるものかを明記し、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。

＜基本計画書＞

100GHz 以上の高周波数帯通信デバイスに関する研究開発

1. 目的

我が国では、2020年3月から移動体通信事業者によって、第5世代移動通信システム(5G)の商用サービスが開始された。5G 及びその後継となる移動通信システムは、これまでの人と人がコミュニケーションを行うことを想定したツールとしてだけでなく、生活基盤、更には産業・社会基盤となることが期待されている。5G は「超高速通信」、「超低遅延通信」、「多数同時接続」といった特長を有しているが、後継となる移動通信システムにもおいても、こうした特長は更に進化していくものと考えられ、その特性ゆえ、ありとあらゆるものがインターネットを通してつながる IoT(Internet of Things)時代における基盤として幅広く活用されることが期待されている。

IoT デバイスの規模と成長性を分野・産業別にみても、コネクテッドカー(通信機能の搭載された自動車)や、通信機能の搭載された工場オートメーション(FA)機器などの、産業機器における IoT 化は着実に進んでいる。ウェアラブル機器を使った健康管理や、人の目による管理や作業が困難な場所でのセンサーを使った保守・管理など、多様な用途が考えられている。まず先行する一般コンシューマ用途は数が 50 億以上と大きく、かつ今後も年率 10%前後の成長が見込まれる。次に IoT の成長の牽引役の一つとして産業用途は、いわゆる M2M(Machine to Machine)の普及に伴い大きく成長し、デバイス数は既に 30 億個に達しており、今後も引き続き拡大する用途の一つである。現在のところ、通信トラヒックは約 1.3 倍/年で増加しているものの、5G の普及期においては、先述の IoT 機器の爆発的な普及に伴い、通信トラヒック量も飛躍的に増加し、現在移動体通信システムに割当てられている周波数がひっ迫することが想定される。

このため、今後の移動通信システムの更なる周波数需要の高まりに応えるために、新たに広帯域を確保可能と見込まれる 100GHz 超帯の周波数帯を移動通信システムに活用するための研究開発を行う。今までにない高い周波数帯を移動通信システムに活用するに当たって、高周波数帯の伝搬特性を考慮して移動通信システム(送受信装置)全体の最適化を図るための技術及び高出力の送信が可能となる半導体を用いたアンテナシステムを実現に向けた研究開発に取り組む。特に伝送距離の延伸化のためには、送信系統の高出力化が必要となることから、損失を局限するアンテナシステムの回路構成及び高周波数帯でも高出力送信が可能と見込まれる化合物半導体を用いた増幅器の出力の向上を実現する。

2. 政策的位置付け

- ・ Beyond 5G 推進戦略懇談会提言(令和2年6月)

「4. Beyond 5G 推進戦略 4-2. (3) (開発・製造基盤の強化)」において、「(略)このため、5G の機能強化に対応した情報通信システムの中核となる技術を開発することにより、その開発・製造基盤強化に取り組む。」旨の記載あり。

- ・ まち・ひと・しごと創生基本方針 2020(令和2年7月17日閣議決定)

「6. 新しい時代の流れを力にする(1)②(a)5Gなどの情報通信基盤の早期整備」において、「(略)5Gやローカル5Gによる地域の課題解決、5Gの高度化・高信頼化を推進する。」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2年7月17日閣議決定）

「7 社会基盤の整備(2) 次世代インフラの整備」において、「また、Society 5.0をより高いレベルで実現していくためには、サイバー空間と現実世界（フィジカル空間）をより高度に一体化させる必要があり、それを支える中核的なインフラとしては5Gよりも更に高度なネットワークが求められる。」旨の記載あり。

3. 目標

社会基盤・産業基盤を支える5G以降の移動通信システムにおいては、現在の移動通信システムを超える高速・大容量の通信の実現が必要となる。そこで、新たに屋内外で利用可能な移動通信システムに活用することを前提として、広帯域を確保可能な100GHz超帯の高周波数帯を用いた高速・大容量通信にて、通信伝送距離の延伸化を実現するための研究開発を行う。

伝送距離を延伸化する手段として、送信系統にて大きな等価等方輻射電力(EIRP: Equivalent Isotropic Radiated Power)を実現することが挙げられる。この実現のための一つ目のアプローチとして、100GHz超帯における高出力送信が可能な送信系統の構築にて、アクティブフェーズドアレイアンテナ(APAA: Active Phased Array Antenna)を構築する際には、アンテナシステムを構成する回路による電力損失を極小化することが挙げられる。そこで、APAAを構成する素子アンテナと給電を行う増幅器を含むフロントエンド部の線路長を極小化できるアンテナオンチップ型のデバイスを実現する。複数のアンテナ一体型フロントエンドICにて、100GHz超帯で動作する100素子以上のAPAAを開発し、50dBm以上のEIRPを実現することを目標とする。

また、EIRPを増大させる二つ目のアプローチとして、アンテナへ給電する電力増幅器の高出力化が挙げられる。そこでガリウムナイトライド(GaN)及びインジウムリン(InP)等の化合物半導体を用いた高出力増幅器を実現する。これら材料を用いたデバイスの高周波数化及び高耐圧化を実現するデバイス構造等を検討し、デバイスを生成するプロセス等の最適化を図ることで、100GHz超帯及び将来の高速伝送実現を視野に入れた300GHz帯で動作する電力増幅器を実現する。この電力増幅器は、100GHz超帯において10W以上、300GHz帯において100mW以上の出力の実現を目標とする。また、100GHz超帯で動作する移相器及び周波数コンバータ等の機能有する集積回路を開発し、電力増幅器と組み合わせることで、ビームフォーミングを実現する。300GHz帯電力増幅器を実現することで、将来の高速伝送を可能にするデバイス技術を確立する。

100GHz超帯の周波数帯を移動通信システムに適用し、これまでになかった長距離伝送を実現するために、無線システムと無線装置の構成を見直し、無線装置の各構成部品への性能配分を行うとともに、各通信諸元の最適化を行う。更に、100GHz超帯の屋内外

の基本伝送特性を把握し、前述の送信系統の高出力化に関する研究開発での検討内容を踏まえつつ、無線装置を構成することで、見通し内の伝送距離 100m 以上において、スループット 100Gbps を実現する技術を確立することを目標とする。更に見通し外の通信における通信伝送距離を評価し、伝送距離の延伸化について検討する。

4. 研究開発内容

(1) 概要

これまで報告されている 100GHz 超帯の無線通信では伝送距離が 10m 程度であり、移動通信システムへの活用する際には、広帯域伝送を確保しつつ更なる伝送距離の延伸化が望まれる。そこで、移動通信システムに適応できる 100GHz 超帯を用いた高速・大容量通信を可能とする無線装置に関する研究開発を行う。移動通信システムにおいて、変調方式、多重方式、キャリア数などを検討することで、100GHz 超帯に適した移動通信システムを明らかにする。無線装置の実現に当たって、無線装置をなす各構成部品に対して、性能配分等の全体設計を行うと共に、シミュレーションにおいて、通信諸元等の最適パラメータを導出する。無線装置の設計に当たっては、後述の高周波数帯の送信系統に関する検討内容を考慮して行う。また、高周波数帯の実験用無線装置を用いて、屋内外において伝送実験を行い、基本伝送特性を把握し、無線装置を改良する。最終的に 100GHz 超帯において、見通し内外における伝送実験を行い、伝送距離及びスループットを評価する。

100GHz 超帯の高周波数帯を扱う無線装置には、それ以下の周波数帯を扱う無線装置と比較して、無線回路の線路や各素子にて損失が増大することが予想される。そこで、損失の発生する回路の線路長の極小化するアンテナオンチップ型のデバイスに関する研究開発を行う。アンテナオンチップ型のアンテナ一体型フロントエンド IC の実現に向けて、100GHz 超帯で動作する移相器、周波数コンバータ及び電力増幅器等から構成されるフロントエンド IC 及び素子アンテナ構造について検討する。さらに素子アンテナとフロントエンド IC の一体型構造に関して検討し、アンテナ一体型フロントエンド IC を試作・評価する。複数のアンテナ一体型フロントエンド IC を用いて APAA を構成して、100GHz 超帯でのビームフォーミングの実現を図る。最終的に、APAA の EIRP を評価する。

また、送信系統の EIRP の増大するためには、アンテナ（素子アンテナを含む）へ電力を給電するトランジスタ等の電力増幅器の高出力化も求められている。従来と比較して更なる高出力化と高周波数帯での動作が求められる。GaN 及び InP 等の化合物半導体の材料からなる電力増幅器の高周波数化及び高出力化に関する研究開発を行う。今までにない高周波数及び高出力を兼ね揃えた化合物半導体からなるデバイスを開発するために、デバイスの高周波数化及び高耐圧化を実現するための構造及びデバイスを試作する製造プロセスを検討する。その後、化合物半導体デバイスを試作し、耐圧や高周波数特性等の電気特性を評価する。また、低損失な移相器及び周波数コンバータの機能を有する集積回路及び 100GHz 超帯及び 300GHz 帯で動作する電力増幅回路を設計・試作する。最後に、試作した電力増幅器の出力等の特

性を評価し、数素子程度のアレイアンテナからなるビームフォーミングの試験系を構築し、ビーム指向性制御に関する検証を行う。

(2) 技術課題及び到達目標

技術課題

ア 高周波数帯における無線システム構成技術

現在までに、100GHz 超帯の高周波数帯において、10m 程度の見通しでの無線伝送が可能であることが報告されている。高周波数帯を用いたこれまで以上の高速・大容量通信が可能な移動通信システムの社会実装のためには、更なるスループットの増大と伝送距離の延伸化が求められており、加えて、見通し外又は通信器材の周辺における電波環境（伝搬路周辺の電波反射物体の移動等）が変化する状況においても継続的な通信の確立が求められている。送信及び受信のフロントエンドの共通化を前提とした場合、送受信の両方のビーム制御及び受信システムの最適化を検討する必要がある。また、高周波数帯デバイスの使用帯域内の周波数特性のフラットネスさ及び高周波数帯の電波の強い直進性を考慮して最適な変調方式等を検討する必要がある。技術課題イ及びウの成果を利用しながら、これらの検討をすることで、100GHz 超帯の高周波数帯を送信するアンテナシステムだけで無く、変調方式、多重化方法及び受信システムを含めた無線システム全体を最適化することに課題がある。

イ アンテナ一体型フロントエンド IC 技術

これまで、ミリ波帯の APAA を構成する際の素子アンテナとフロントエンド部の接続に関する手法として、マルチチップモジュール (Multi-chip Module) により集積化する方法、素子アンテナと MMIC (Monolithic Microwave Integrated Circuit) を多層基板により一体化する方法 (FOWLP (Fan Out Wafer Level Package) / AiP (Antenna in Package)) 等が開発されている。高周波数帯の損失を極小化するためには、回路の線路長を可能な限り短くすることが求められており、既存の方法より更に線路長を極小化することが必要となる。また、100GHz 超帯の高周波数帯を使用する場合において、準ミリ波帯（例えば、28GHz 帯、39GHz 帯）と比較して素子アンテナを密に配置する必要があることから、素子アンテナとフロントエンド IC 等のダウンサイジングが求められている。これらを実現する低損失な実装手法であるアンテナオンチップ構造を実現するために、素子アンテナとフロントエンド IC を一体化する技術が課題となる。

ウ 高出力送信を可能とする化合物系半導体技術

電波を送信する際の半導体の電力増幅器の出力は高周波化に伴い低下するが、GaN 及び InP 等の化合物半導体は、高周波数帯での高出力化が可能な材料として期待されている。これまでも化合物半導体を用いた 100GHz 超帯の増幅器の出力に関して報告がなされているが、移動通信システムの通信伝達距離の延伸化の

ためには、電力増幅器の更なる高出力化が必要である。高出力化の実現のためには、GaN 系デバイスの高周波化及び InP 系デバイスの高耐圧化による高出力増幅器の実現が課題となる。なお、増幅器の実用化のためには消費電力に関わる電力効率も考慮する必要がある、出力と効率の両立が求められる。また、APAA は電力増幅器の他、移相器等の機能を有する集積回路で構成される。移相器には、高速通信に向けた広帯域性能実現のため、高周波、広帯域、高分解能の全てを満たす性能が求められる。さらに、この機能を有する集積回路によって構成されるモジュールの低損失実装の実現が課題となる。

到達目標

ア 高周波数帯における無線システム構成技術

無線システム全体として最適となるよう設計し、システム内の構成品への機能・性能配分した後、技術課題イ及びウの検討内容を反映した評価装置を試作する。同装置を用いて、見通し内外において移動通信システムの伝送実験を実施し、100GHz 超帯の移動通信システムの実現性を評価し、見通し内の伝送距離 100m においてスループット 100Gbps を達成する技術を確立する。見通し外での無線通信において、伝送距離 100m にてスループット 100Gbps を可能にする技術課題を明らかにする。

イ アンテナ一体型フロントエンド IC 技術

低損失な実装技術であるアンテナオンチップとして、素子アンテナとフロントエンド IC を一体化させる技術を確立する。技術課題ウの APAA の検討と連携しながら、素子アンテナとフロントエンド IC を集積した基板を波長に依存する素子アンテナ間隔で複数配置することで、100GHz 超帯で動作する APAA を実現する。最終的に、100 素子以上からなる APAA において、100GHz 超帯で 50dBm 以上の EIRP を実現する。

ウ 高出力送信を可能とする化合物系半導体技術

化合物半導体を用いて、100GHz 超帯において出力 10W 以上かつ効率 20%以上、300GHz 帯において出力 100mW 以上かつ効率 5%以上の高出力増幅器を開発する。また、APAA に関しては技術課題イの検討と連携しながら、開発した高出力増幅器やビームフォーミングのための移相器及び周波数コンバータの機能を有する集積回路により構成される低損失モジュールを実現する。

<令和3年度>

ア 高周波数帯における無線システム構成技術

- ・ 技術課題イ及びウの検討内容を踏まえつつ、スループット 100Gbps を実現可能な無線システムについて、各構成品の性能配分及び基本設計を行う。
- ・ 100GHz 超の伝搬特性の文献調査をするとともに、技術課題イ及びウの検

討内容を含めたシミュレーションによる伝送評価を行い、見通し内の伝送距離 100m においてスループット 100Gbps を実現するための通信諸元等の最適なパラメータを導出する。

イ アンテナ一体型フロントエンド IC 技術

- ・ 移相器、周波数コンバータ、電力増幅器などの単体機能回路の設計、試作及び評価を行う。
- ・ 技術課題アの検討内容を含めたアンテナ一体型フロントエンド IC の実現のためのアンテナの構造、アンテナ一体型フロントエンド IC を複数搭載するモジュールの構造の基本設計を行う。

ウ 高出力送信を可能とする化合物系半導体技術

- ・ 化合物半導体電力増幅器の高周波数化・高耐圧化を実現するためのデバイスの要素技術を開発する。
- ・ 技術課題アの検討内容を含めた 100GHz 超帯及び 300GHz 帯の電力増幅器を試作するプロセスを検討し、試作環境を構築するとともに、デバイスの評価環境を構築する。

<令和 4 年度>

ア 高周波数帯における無線システム構成技術

- ・ 技術課題イ及びウの検討内容を用いた実験用無線装置を試作する。
- ・ スループット 100Gbps に向けた屋内伝送実験による評価として、屋内環境の伝送特性を把握する。

イ アンテナ一体型フロントエンド IC 技術

- ・ 令和 3 年度に試作・評価した単体機能回路を集積化したフロントエンド IC の設計、試作及び評価を行う。
- ・ 令和 3 年度に基本設計を行ったアンテナ構造、モジュール構造の部分試作を行い、性能を評価する。

ウ 高出力送信を可能とする化合物系半導体技術

- ・ 電力増幅器に用いる化合物半導体デバイスの試作を行い、耐圧及び高周波特性などの電気特性を評価する。
- ・ 100GHz 超帯及び 300GHz 帯電力増幅回路の設計・部分試作・評価を行う。
- ・ 電力増幅器、ビームフォーミングのための移相器及び周波数コンバータの機能を有する集積回路により構成される低損失モジュールの設計・試作・評価を行う。

<令和5年度>

ア 高周波数帯における無線システム構成技術

- ・ 技術課題イ及びウの検討内容を利用した屋内及び屋外伝送実験による無線装置の性能評価を行う。また、無線装置の実用化に向けた技術課題を明らかにする。
- ・ 見通し内外において 100GHz 超帯を用いた移動通信システムの伝送実験及びその評価を行い、伝送特性を把握する。
- ・ 見通し内の伝送実験において、通信距離 100m においてスループット 100Gbps を可能にする技術を実現する。将来の実用化に向けた技術課題を明らかにする。
- ・ 見通し外の伝送実験において、通信距離 100m においてスループット 100Gbps を可能にする技術課題を明らかにする。

イ アンテナ一体型フロントエンド IC 技術

- ・ 令和4年度に試作・評価した単体機能回路を集積化した IC に、さらにアンテナを集積化し、ビーム制御を実現するアンテナ一体型フロントエンド IC の設計、試作及び評価を行う。
- ・ アンテナ一体型フロントエンド IC を複数搭載したモジュールの設計、試作・評価を行い、100GHz 超帯で実効等方輻射電力が 50dBm 以上の 100 素子以上のフェーズドアレイ送信機を実現する。
- ・ 技術課題アにおける評価結果を基に、アンテナ一体型フロントエンド IC 及びそれを複数用いたモジュールの実用化に向けた課題を明らかにする。

ウ 高出力送信を可能とする化合物系半導体技術

- ・ 令和4年度に開発したデバイスを改良して、電力増幅器の最終試作・評価を行い、同増幅器で 100GHz 超帯において出力 10W 以上かつ効率 20%以上、300GHz 帯において出力 100mW 以上かつ効率 5%以上の性能を実現する。
- ・ 100GHz 超帯電力増幅器モジュールを用いて、数素子程度のアレイアンテナからなるビームフォーミングの試験系を構築し、ビーム指向性制御の実験検証を行う。
- ・ 技術課題アにおける評価結果を基に、電力増幅器モジュールを搭載したシステムの実用化に向けた課題を明らかにする。

5. 実施期間

令和3年度から5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) 提案及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＞

基地局端末間の協調による動的ネットワーク制御に関する研究開発

1. 目的

我が国では、2020年3月から移動体通信事業者によって、第5世代移動通信システム(5G)の商用サービスが開始された。5G及びその後継となる移動通信システムは、スマートフォン及びモバイル端末のような単なるコミュニケーション基盤としての活用にとどまらず、生活基盤、更には産業・社会基盤となることが期待されている。特に、2020年に発生したCOVID-19の感染拡大によって、新たな生活様式が社会に浸透し、デジタルベースでの非接触のコミュニケーション及び生活様式がニューノーマルとなる中、ユーザ端末にて大容量のデータを消費するだけでなく、高品質画像やリアルタイム性を重視した遠隔医療や遠隔地にある重機等のリモート操作、リモートオフィスや遠隔授業など、ユーザ端末側から大容量・高速なデータの伝送が必要となるユースケースの実現が求められている。

こうした大容量・高速伝送が要求されるユースケースにおいては、広帯域が確保可能なミリ波帯である高周波数帯を利用することが考えられる。しかしながら、ミリ波帯はSHF帯以下に比べ、直進性が強く障害物に弱いという性質がある。このため、建造物等の陰での不感地帯が発生する。高周波数帯の不感地帯を局限するための解決方法の一つとして、高周波数帯の基地局を稠密に設置する必要があるが、設置コスト及び消費電力等の観点で現実的な方法ではない。そこで、本研究開発では、基地局の設置に依らず、高周波数帯の不感地帯を局限するための取組として、任意の方向に電波を反射させることで、高周波数帯の不感地帯を局限するIRS(Intelligent Reflecting Surface)を移動通信システムへ適用するための研究開発を行う。

また、通信距離の延伸化を図るためには、利得の大きなアンテナ(径の大きなアンテナ)や高出力デバイスを用いて有効放射電力の増大を実現する必要があるが、可搬性を考慮すると携帯する端末への適用は困難である。このため、下りリンクに対して、上りリンク通信性能劣位が発生し、それがボトルネックとなることが高周波数帯の利用促進を阻害する要因となっており、高周波数帯をより有効に活用するための手段が求められている。そこで、本研究開発では、上りリンクを高速化するための解決するための取組として、高周波数帯の上りリンクの中継システムを移動通信システムへ適用するための研究開発を行う。

2. 政策的位置付け

・Beyond 5G 推進戦略懇談会提言(令和2年6月)

「4.Beyond 5G 推進戦略 4-2.(3)(開発・製造基盤の強化)」において、「(略)このため、5Gの機能強化に対応した情報通信システムの中核となる技術を開発することにより、その開発・製造基盤強化に取り組む。」旨の記載あり。

・まち・ひと・しごと創生基本方針 2020(令和2年7月17日閣議決定)

「6.新しい時代の流れを力にする(1)②(a)5Gなどの情報通信基盤の早期整備」において、「(略)5Gやローカル5Gによる地域の課題解決、5Gの高度化・高信頼化を推

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2年7月 17 日閣議決定)

「7 社会基盤の整備(2) 次世代インフラの整備」において、「また、Society 5.0 をより高いレベルで実現していくためには、サイバー空間と現実世界(フィジカル空間)をより高度に一体化させる必要があり、それを支える中核的なインフラとしては 5G よりも更に高度なネットワークが求められる。」旨の記載あり。

3. 目標

ミリ波帯は、広帯域を利用できるため大容量・高速通信の実現が期待出来る一方で高周波数帯の直進性に起因し、ビル等の建造物や電波の遮蔽物によって不感地帯が多数発生しうる。基地局を多数設置せずに不感地帯への対策として、伝搬環境の変化に応じて、電波の反射方向を動的に変更可能な高機能な反射板(IRS)が有効であると考えられる。IRS をビル壁等の様々な場所に設置し、エリア内に発生する不感地帯へ適切に電波を反射させることで、ビル陰に位置する歩行者などが利用するユーザ端末との通信の実現が期待できる。5G 以降の移動通信システムにて今後利用が想定される EHF 帯(47.2-48.2GHz、66-71GHz 等)の周波数にて、ユーザ端末と基地局間に位置する電波遮蔽物を迂回した伝搬路を構築するための IRS システムを実現する。5G NR の通信規格として、一定時間(discard timer :最長で 1.5 秒)電力が低い状態が続くとパケットが損失し、通信サービスが切断する可能性があることから、IRS を用いて不感地帯をエリア化し、当エリア内において電波の反射方向をユーザ端末の移動に追従することで、通信中の受信電力が最低受信感度以下となる連続時間を 1.5 秒以内かつ時間率 1%以下とすることを目標とする。

ミリ波帯を用いた移動通信システム(28GHz 帯や今後利用が想定される EHF 帯の移動通信システム)では、ユーザ端末の可搬性から生じるアンテナサイズや最大送信電力などの制約により、ユーザ端末から基地局への上りリンクは伝送不可又は低速伝送しか出来ない場合がある。一方で、高精細な映像伝送を利用した遠隔地の重機のリモート操作を実現するために高速な上りリンクが必要な利用シーンも今後出現されることが想定される。そこで、ユーザ端末及び基地局の伝搬路の間に中継通信端末を設置し、上りリンクの速度向上を図る。先述の利用シーンにおいては、重機の移動に伴い、中継通信端末が移動できる必要があるため、中継通信端末はドローン等に搭載されることを想定する。この中継通信システムを活用することで、見通し内空間多重伝送により伝送容量を5Gの4倍に向上させ、5Gの中継方式に対して中継による遅延時間を60%に短縮しつつ、ユーザ単体の伝送速度を5Gの4倍に向上させることを目標とする。

4. 研究開発内容

(1) 概要

これまでも、電波の反射方向を可変に出来る IRS に関する研究が報告されている。本研究開発では、新たに IRS の性能向上を図りつつ、IRS を移動通信システムに適用さ

せるための研究開発を行う。ミリ波帯基地局と不感地帯にあるユーザ端末の伝搬路を構築するための IRS は、効率的に電波を反射させるために、低損失で波長の 100 倍程度のサイズが必要となる。高速に電波の反射方向を変更するためには、IRS 面内の素子が高速に変化する応答速度を有している必要がある。こうした性質を有する IRS の部分モデルを試作・評価の後、性能の向上を図り、大型の IRS を試作し、反射方向を制御するための高速な応答が可能な IRS の構成技術を実現する。また、複数のユーザ端末と基地局が通信するため、複数のユーザ端末との伝搬路を構築可能な反射パターン(電波の反射強度の方位依存性)をユーザ端末の移動に応じて変更するために、IRS 面内の各反射素子の制御量を高精度に導出する必要がある。移動通信システムでは隣接した周波数帯で複数のオペレータが利用することから、他のオペレータのシステムに障害とならない反射制御が必要である。こうした制御を実施するアルゴリズムを構築し、IRS の制御器に実装することで、IRS の反射特性制御技術を実現する。さらに、IRS で適切な方位に電波を反射させるためには、IRS、基地局及びユーザ端末の位置関係(各器材の相対方位)の特定し、電波の入射角に伴う反射パターンを決定する必要がある。この際、ユーザ端末は移動しうるため、相対方位の関係を都度更新する必要がある。これを実現するために、IRS が、ユーザ端末及び基地局と連携し、IRS の反射パターンを決定する IRS 協調技術を実現する。これらを実現することで、従来では高周波数帯にてユーザ端末と基地局間の伝送路中に電波の遮蔽物が存在し、通信が確立しなかった場合においても高速に伝送路を構築し、不感地帯の対策エリアを拡大すると共に、高い通信サービスの継続性を実現する。

ドローン等に中継通信端末を搭載した場合、見通しが取れた伝搬路を形成することが可能であり、通信距離の延伸化が図れるものの、MIMO アンテナを活用したマルチパスを利用する空間多重伝送を適用することは出来ない。そこで、本事業では中継通信端末が具備する機能として、見通しがとれた伝搬路において、中継通信端末の移動等によって発生する伝搬路の変動にロバストな空間多重伝送に関する研究開発を実施する。現在までに、机上での見通し内空間多重伝送の実現性は示されており、本研究開発では新たに移動通信システムへの適用可能な実機を実現する。中継通信端末にて、空間多重を実現する信号変換機能を具備し、基地局に複数の移動しうる中継通信端末からの信号を受信できるように、適切なビームの選択と信号分離性能を有するマルチビーム制御の機能を具備する。また、1 台の中継通信端末が複数のユーザ端末を中継する場合、中継通信端末にて干渉が発生し、通信性能全体に対する劣化要因となり得る。そこで、中継通信端末が複数のユーザ端末からの信号の干渉を抑圧しながら空間多重する高効率中継技術を実現する。また、中継通信端末において空間多重処理を実施して中継を行う場合、中継通信端末内で受信した信号を再度送信のための信号処理を行わなければならない、それによる遅延が通信性能全体に対する劣化要因となり得る。5G 以降の移動通信システムにおいては、低遅延の特長を活用したサービスに対応するユースケースも想定されておることから、中継通信端末に中継処理に要する処理時間を低減する低遅延中継技術を実現する。

(2) 技術課題及び到達目標

技術課題

ア 高周波数帯 IRS の制御技術

① 反射特性を可変にする IRS の構成技術

移動通信システムの不感地帯を削減するために、任意の反射パターンを形成し、ユーザ端末の移動に追従するように高速に反射パターンを変更する必要がある。さらに、IRS を用いて効率的に電波を反射するためには、低損失かつ大型な IRS が必要となる。このため、大規模なサイズで、任意の反射位相を形成し、反射位相を高速に変更できる構造を有する IRS デバイスの実現が課題となる。

② IRS への反射特性制御技術

広範囲の不感地帯を対策する IRS システムの実現のためには、IRS 面内の各反射素子を制御する信号を生成する必要がある。また、IRS を用いて複数のユーザ端末との接続のために、複数の方向に反射可能な反射パターンを形成する必要がある。広い角度範囲の複数端末に反射可能な反射パターンを生成するために、IRS 面内の各反射素子の制御量を高精度に導出する技術の実現が課題となる。さらに、移動通信システムでは、隣接した周波数帯で複数のオペレータが利用することから、反射したい電波以外を利用しているオペレータに対して障害とならない反射パターンの生成が課題となる。

③ 基地局・ユーザ端末との IRS 協調技術

適切な方位に電波を反射させるためには、電波の入射角に対して適切な反射パターンを決定する必要がある。さらに、IRS はユーザ端末の位置の変動に追従して、電波の反射方向を変更する必要がある。このため、基地局・ユーザ端末と IRS が連携して、ユーザ端末の位置の変動に追従することが課題となる。

イ 高周波数帯中継通信端末の協調制御技術

① 移動する中継通信端末に対応した見通し内空間多重技術

中継通信端末が具備する機能として、見通し内空間多重伝送のための信号処理、少ない処理頻度で空間多重を維持できる信号処理及び中継通信端末のアンテナ構成を実現することが課題となる。また基地局は、空間多重を実現する際に、高 S/N で中継通信端末の信号を取得するために、ビーム選択と信号分離を行うマルチビーム方式の実現が課題となる。

② 移動する中継通信端末による複数ユーザ端末の高効率中継技術

中継通信端末が複数のユーザ端末を收容出来るように、移動する中継通信端末が各ユーザ端末-中継通信端末間の各々異なる伝搬路の状況を考慮し、複数のユーザ端末からの信号による干渉の影響をその伝搬路の情報を基に抑圧しつつ空間多重する高効率な中継方式の実現が課題となる。

③ 空間多重を可能とする低遅延中継技術

中継通信端末を介した際にも低遅延サービスに対応する必要があるため、中継通信端末にて中継処理に要する処理時間を低減し、ユーザ端末からの信号を高速に多重化する中継方式の実現が課題となる。

到達目標

ア 高周波数帯 IRS の制御技術

- ・ IRS の反射特性可変デバイス
- ・ IRS の反射特性制御技術
- ・ 基地局・ユーザ端末との IRS 協調技術

大きさが 100 波長程度、反射効率(入射電力の総和に対する反射電力の総和の比率)の低下量が設計角度範囲内のすべての入射反射方向について 6dB 以下で、 $\pm 50^\circ$ 以上の範囲に 1.5 秒以内に反射方向を変更可能な IRS を実現する。また、IRS が対策するエリア内において、移動するユーザ端末に反射パターンを追従させることで、通信中の受信電力が最低受信感度以下となる連続時間を 1.5 秒以内かつ時間率 1%以下を実現する。

イ 高周波数帯中継通信端末の協調制御技術

- ・ 移動する中継通信端末に対応した見通し内空間多重技術
- ・ 移動する中継通信端末による複数ユーザ端末の高効率中継技術
- ・ 空間多重を可能とする低遅延中継技術

上記の技術を確立することで、伝送容量を 5G の 4 倍、5G の中継方式に対して中継による遅延時間を 60%に短縮しつつユーザ単体の伝送速度を 5G の 4 倍に向上させることを目標とする。

<令和3年度>

ア 高周波数帯 IRS の制御技術

① 反射特性を可変にする IRS の構成技術

- ・ 反射パターンを可変に出来る IRS の構造に関する設計
- ・ 小規模な IRS を作成し、IRS 構成素子の損失と応答速度を評価することで、低損失で高速応答可能な大規模 IRS の実現性を評価

② IRS への反射特性制御技術

- ・ IRS の反射特性を制御する制御信号を生成するアルゴリズムの開発及びアルゴリズムの動作性能の評価
- ・ IRS の反射パターン計測システムの設計及び部分試作

③ 基地局・ユーザ端末との IRS 協調技術

- ・ IRS から見たユーザ端末の方位推定方式の設計
- ・ 基地局・ユーザ端末との IRS 協調システムの全体設計、連携する情報の

種類と頻度の具体化及び部分試作

- ・ 反射パターン導出アルゴリズムの開発とシミュレーション評価
- ・ シミュレーションにより、基地局・移動局との IRS 協調システムにおけるユーザ端末の方位推定方式および反射パターン導出アルゴリズムの実現性評価

イ 高周波数帯中継端末の協調制御技術

① 移動する中継通信端末に対応した見通し内空間多重技術

- ・ 移動を考慮した見通し内空間多重伝送方式の設計、シミュレーション及び評価用装置の試作
- ・ 基地局におけるビーム選択と信号分離を行うマルチビーム信号処理方式の設計、シミュレーション及び評価用装置の試作

② 移動する中継通信端末による複数ユーザ端末の高効率中継技術

- ・ 移動する中継通信端末が複数のユーザ端末からの通信を中継する際に、受信する信号間の干渉を抑圧しながら空間多重する、高効率中継方式の設計及びシミュレーション
- ・ 中継通信端末及び基地局の機能を有する評価用装置の試作

③ 空間多重を可能とする低遅延中継技術

- ・ 空間多重伝送を可能とする中継通信端末における低遅延中継方式の遅延時間短縮手法の具体化及び全体設計及びシミュレーションによる実現性評価

<令和4年度>

ア 高周波数帯 IRS の制御技術

① 反射特性を可変にする IRS の構成技術

- ・ IRS の反射パターンを変更する際の応答速度の高速化の実現
- ・ 大規模 IRS の試作及び反射特性及び IRS の応答速度等を評価

② IRS への反射特性制御技術

- ・ 反射素子の反射特性を高精度に制御するためのアルゴリズムの改良及びシミュレーション評価による実現性評価、並びに制御器の開発
- ・ 反射パターン計測手法を実装した計測システムの開発
- ・ 小規模 IRS と制御器を用いた、IRS の反射特性制御技術の実現性実証

③ 基地局・ユーザ端末との IRS 協調技術

- ・ 基地局・移動局との IRS 協調システムに複数のユーザ端末に対応させる追加機能の実装

イ 高周波数帯中継端末の協調制御技術

① 移動する中継通信端末に対応した見通し内空間多重技術

- ・ 移動を考慮した見通し内空間多重方式を効率化する方式の設計、シミュレ

- ・ シミュレーションによる実現性評価及び評価用装置の高性能化
- ・ 基地局において高度化したビーム選択と信号分離を行うマルチビーム信号処理方式の高度化方式の設計、シミュレーションによる実現性評価及び評価用装置への追加機能の実装
- ② 移動する中継通信端末による複数ユーザ端末の高効率中継技術
 - ・ 移動する中継通信端末が複数のユーザ端末からの通信を中継する際に、受信する信号間の干渉を抑圧しながら空間多重する、高効率中継方法の高性能化の設計及びシミュレーションによる実現性評価
 - ・ 中継通信端末及び基地局の機能を有する評価用装置の高性能化
- ③ 空間多重を可能とする低遅延中継技術
 - ・ 移動する中継通信端末に対応した見通し内空間多重技術と中継通信端末における低遅延中継方式を組み合わせた統合評価シミュレーション

<令和5年度>

ア 高周波数帯 IRS の制御技術

- ① 反射特性を可変にする IRS の構成技術
 - ・ 大規模 IRS と反射特性制御アルゴリズムを接続して、反射特性を評価
- ② IRS への反射特性制御技術
 - ・ 反射特性制御アルゴリズムに特定の周波数帯の反射を回避する干渉回避機能を追加し、アルゴリズムの動作性能を評価
- ③ 基地局・ユーザ端末との IRS 協調技術
 - ・ 基地局・移動局との IRS 協調システムに端末の移動追従機能を実装

イ 高周波数帯中継端末の協調制御技術

- ① 移動する中継通信端末に対応した見通し内空間多重技術
 - ・ 移動を考慮した見通し内空間多重方式及び基地局においてビーム選択と信号分離を行うマルチビーム信号処理の機能を含む中継通信端末及び基地局の試作及び性能評価
- ② 移動する中継通信端末による複数ユーザ端末の高効率中継技術
 - ・ 移動する中継通信端末が複数のユーザ端末からの通信を中継する際に、受信する信号間の干渉を抑圧しながら空間多重する高効率中継機能を含む中継通信端末及び基地局の試作及び性能評価
- ③ 空間多重を可能とする低遅延中継技術
 - ・ 移動する中継通信端末に対応した見通し内空間多重技術及び中継通信端末における低遅延中継方式を具備する評価装置の試作

<令和6年度>

ア 高周波数帯 IRS の制御技術

- ・ 反射特性制御アルゴリズムを実装した大規模 IRS と基地局・移動局との

IRS 協調システムを組み合わせた IRS システムの機能・性能を評価する屋外での総合実証試験を実施

- ・ 大きさが 100 波長程度、反射効率(入射電力の総和に対する反射電力の総和の比率)の低下量が設計角度範囲内のすべての入射反射方向について 6dB 以下で、 $\pm 50^\circ$ 以上の範囲に 1.5 秒以内に反射方向を変更可能な IRS を実現する。また、IRS が対策するエリア内において、移動するユーザ端末に反射パターンを追従させることで、通信中の受信電力が最低受信感度以下となる連続時間を 1.5 秒以内かつ時間率 1%以下を実現する。

イ 高周波数帯中継端末の協調制御技術

- ・ 統合評価用の中継通信端末及び基地局で見通し内空間多重と複数端末の高効率中継方式を組み合わせて用いた際の伝送容量を評価する統合実証試験を実施
- ・ 伝送容量を 5G の 4 倍とすることを実現する。
- ・ 移動する中継通信端末に対応した見通し内空間多重技術及び中継通信端末における低遅延中継方式を具備する評価装置を用いて、伝送速度と遅延時間を評価する実証試験を屋外で実施
- ・ 5G の中継方式に対して、遅延時間を 60%に短縮しつつ、ユーザ単体の伝送速度を 4 倍とすることを実現する。

5. 実施期間

令和3年度から6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11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