

＜基本計画書(案)＞

周波数帯の横断的活用を実現する移動通信ネットワークの研究開発

1. 目的

移動通信ネットワークは、2030 年代に 5G から 6G へと段階的に移行していくことが見込まれており、これに伴い 5G と 6G が共存するネットワークの高性能化や、周波数のひっ迫状況の解消といった技術課題への対応が急務となっている。こうした 5G と 6G が共存する移行期においては、両世代のネットワークに適用可能な技術の確立が求められており、特に、2030 年代に予測される情報通信量の増加や、人・モノ双方からの多様な通信要求に対応するためには、柔軟かつ高性能な通信基盤の整備が不可欠である。また、6G への円滑なマイグレーションを実現するためには、既存の 5G インフラの活用に加え、現在 5G で利用されているミリ波帯の利活用に関する課題の克服や、ネットワーク全体のエネルギー効率を高める環境配慮型の設計も重要な検討事項となる。

移動通信ネットワークを利用したサービスの多様化や高度化が進む中で、Sub6 帯以下の低周波数帯におけるインフラの需要増加と同周波数帯のひっ迫は避けられない状況である。また現在、移動通信ネットワークにおけるミリ波帯の利活用の進展や、高マイクロ波帯（FR3）の活用については、課題が残っている状況にある。一方、2030 年代に 5G から 6G への円滑なマイグレーションを実現するためには、6G のエリア展開状況や 6G の端末普及状況に応じて、我が国特有の 5G と 6G で利用される周波数帯の組み合わせを考慮し、それら複数の周波数帯を横断的に活用できる移動通信ネットワークを確立する必要がある。本研究開発では、我が国における複数の周波数帯に対応しながら、高周波数帯の積極的な利用を促進することで、ネットワークの高性能化を実現しつつ、低周波数帯のひっ迫状況の解消を目指す。加えて、我が国の移動通信ネットワークは、基地局アンテナの設置場所が限られていることや、ユーザが高密度に集中する（端末収容数が多い）など、特有の環境に起因する課題が存在しており、これらを踏まえると本研究開発は国が主導して取り組む必要がある。

6G は 2030 年頃に商用導入が想定されており、本研究開発は、5G と 6G が共存する移動通信ネットワークを実現し、我が国における 6G の円滑な導入及び普及を支え、国民に高速なネットワークサービスを現実的なコストで提供するため、複数周波数帯を横断的に活用できる移動通信ネットワークを構築する技術を確立し、高周波数帯の積極的な利用と周波数の効率的利用を同時に実現することで、周波数のひっ迫状況を解消することを目指している。

また本研究開発では、ネットワークの高コスト効率化や低消費電力化も実現することで広く社会実装されることを目指しており、世界的に我が国が他国に対して技術的に先導している RAN (Radio Access Network) 仮想化 (vRAN) 技術を高度化することでそれらを実現する。さらに、研究開発成果の革新性や効果の優位性を明示することにより、6G の当該技術領域における我が国の海外でのプレゼンス向上や主導権の獲得を狙い、早期に国内産業の育成につなげるとともに、我が国の製品のグローバル展開の機会創出につなげることを目指す。

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、「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、記載されている。

- ・ デジタルインフラ整備計画 2030 (令和 7 年 6 月 11 日)

「第 2 章 今後のデジタルインフラの整備方針と具体的な推進方策」「1 AI 時代の新たなデジタルインフラ整備の推進」「1-3 次世代情報通信基盤 (Beyond 5G)、量子暗号通信」「①次世代情報通信基盤 (Beyond 5G)」において、取組方針として、

「AI 社会を支えるデジタルインフラである、APN 技術の中核とする低遅延・高信頼・低消費電力な次世代情報通信基盤 (Beyond 5G) の 2030 年頃の本格導入に向け、研究開発・社会実装を推進する。」旨、記載されている。

- ・ 経済財政運営と改革の基本方針 2025 (令和 7 年 6 月 13 日)

「第 2 章 賃上げを起点とした成長型経済の実現」「3. 「投資立国」及び「資産運用立国」による将来の賃金・所得の増加」「(4) 先端科学技術の推進」において、AI、量子、次世代情報通信基盤 (Beyond 5G) 等の研究開発を進める旨、記載されている。

3. 目標

本研究開発は、2030 年代の 5G から 6G への円滑な移行並びに 6G の円滑な導入及び普及を図ることで、高周波数帯の有効活用とそれらを含む全ての周波数の効率的利用を同時に実現することを目指す。具体的には、移動通信で利用される低周波数帯からミリ波やサブテラヘルツ波等の高周波数帯までの複数の周波数帯を横断的に活用できる移動通信ネットワークを確立し、既存の 5G の無線制御と比較して、移動している端末 (移動端末) の実効スループット (移動端末におけるスループットを時間平均したもの) を同じ場所において、2 倍に向上させるとともに、高周波数帯の利用率 (移動端末が高周波数帯を利用できる時間) を 2 倍に向上させることを開発目標とする。これらの目標値は、2030 年代に必要なとされる移動通信ネットワークのトラヒックを高周波数帯の活用により拡大される帯域幅を考慮に入れた全帯域幅で収容することを想定し、その上で、本研究開発において確立する技術により達成さ

れるべき移動環境の高周波数帯の利用率を算出している。また、複数周波数帯を活用する移動通信ネットワークにおいて、2030 年代に想定される端末密度及び端末の移動速度を想定して評価を行う。

4. 研究開発内容

(1) 概要

2030 年代の 6G の円滑な導入及び普及により、高周波数帯の積極的活用と、それらを含む全ての周波数帯の効率的利用を同時に実現し、携帯電話における周波数ひっ迫の解消を目指す。本研究開発における「周波数帯の横断的活用」とは、低周波数帯からミリ波帯、FR3、サブテラヘルツ帯までの複数の周波数帯を、固定的に活用するのではなく、動的かつ横断的、適用的に利用することを目指す。例えば、広域カバレッジの確保や高速移動中の端末に対しては Sub6 帯等の低周波数帯を優先的に利用し、都市部やトラヒックが集中する環境ではミリ波や FR3 を積極的に活用することを想定する。また、超高速通信が求められる限定的なエリアや拠点間通信においては、サブテラヘルツ帯を活用する。これらの周波数帯の選択・組合せの割当ては、AI を活用した無線リソース及び計算リソースの横断的に最適制御することにより実現し、高周波数帯の利用促進と低周波数帯の負荷分散を両立することで、周波数ひっ迫の緩和を図る。そのためには、低周波数帯から高周波数帯までの複数周波数帯において、AI を活用し、「端末の通信品質」「トラヒック分布」「周辺環境」「端末の通信要求・性能」等の複雑かつ複合的な情報を基に、短時間先の端末の通信品質を予測し、無線リソースや計算リソースを横断的かつ動的に最適制御することが不可欠である。必要となる AI 技術は、機械学習や深層学習など多岐にわたり、さらに従来の無線通信技術、ネットワーク制御技術と AI 技術を融合することで、高周波数帯を積極的に活用し、通信性能を飛躍的に向上させる「高度化された vRAN によるネットワーク制御技術」を確立する。加えて、複数周波数帯に対応し、高周波数帯を有効活用することで、ネットワーク容量を拡大し、低周波数帯のひっ迫を緩和する。さらに、基地局設置制約を克服し、効率的なリソース配分を実現することで、通信性能と周波数利用効率を向上させ、柔軟かつ稠密なネットワーク展開を可能とし、ネットワークの処理能力を向上させる「周波数有効利用に資するネットワーク構築技術」を確立する。

(2) 技術課題及び到達目標

技術課題

ア 高度化された vRAN によるネットワーク制御技術

2030 年代の 6G ネットワークでは、FR1 からサブテラヘルツ帯までの複数周波数帯を横断的に活用できる基地局の無線装置 (RU) をサービスエリアに展開し、それらを vRAN の分散装置 (DU) 及び集約装置 (CU) に接続することで、最適な無線リソースを割り当てるネットワーク制御による通信サービスの提供が求め

られる。従来の vRAN では、各周波数帯において独立した無線リソース制御が行われており、端末からのフィードバック情報に基づく制御では遅延が生じ、最適なリソース割当てが困難であるという課題がある。また、異なる世代のネットワーク間での周波数の時間的共有も考慮されていない。これに対し、本研究開発では、端末の通信品質やトラフィック分布に加え、周辺環境や端末の通信要求・性能等の情報を入力として AI により短時間先の状態を予測し、複数周波数帯及び複数セルに跨る無線リソースと計算リソースを動的に制御する。この点において、従来のフィードバック情報に基づく制御とは異なる技術的な革新性を有する。

本研究開発では、AI を活用して複数周波数帯の無線リソースを横断的に最適制御することで、高周波数帯の有効活用とそれらを含む全ての周波数の効率的利用を同時に実現する。また、従来の vRAN では実現されていなかった、無線リソースとそれに必要な CPU 等の計算リソースを同時に動的かつ最適に割り当て可能な高度化された vRAN を新たに構築し、トラフィック分布や周辺環境、端末の通信要求や性能などの情報を活用して AI で短時間先を予測することで、通信性能の飛躍的向上を図る。この際、AI 処理に伴う計算負荷及び消費電力を考慮し、無線リソースと計算リソース制御を一体的に最適化することで、通信性能の向上とネットワーク全体のエネルギー効率向上を両立する。さらに、無線リソースと計算リソースを動的に制御することで、高い柔軟性と拡張性を持つネットワーク性能を実現する。

具体的には、

- 1) 周辺環境情報などを活用し、複数周波数帯に対応した AI による無線リソース最適制御技術
- 2) 高度化された vRAN による無線リソース・計算リソースの動的制御技術の確立が必要となる。

イ 周波数有効利用に資するネットワーク構築技術

技術課題アを適用した高度な移動通信ネットワークを構築するには、vRAN における基地局機能の更なる高度化や、AI により高周波数帯を積極的に活用する制御、無線エントランスを活用した柔軟な基地局展開を支えるネットワーク構築技術の確立が必要となる。従来の RU や CU/DU では、

- 1) RU が複数周波数帯に対応すると装置サイズや消費電力が増大してしまう、
- 2) CU/DU が複数周波数帯に対応できる RU とのインターフェイスを具備しておらず、AI の学習に必要なデータを RU から収集する機能、複数周波数帯の無線リソースを効率的に処理できる十分な計算リソースとそれらの動的な制御機能が備わっていない、
- 3) サブテラヘルツ帯を活用した拠点間無線エントランスでは、100Gbps 級の高速通信が期待されているが、伝送距離やビーム制御のために装置が大型化する課題がある。また、6G 時代には、従来の周波数帯や FR3 だけでは対応できない超大容量通信が必要となり、広帯域のサブテラヘルツ帯無線アクセスの活

用が期待されているが、サブテラヘルツ帯基地局の RU 技術はまだ確立されていない、
という課題がある。

そのため、基地局 (RU) 側において、従来の Sub6 やミリ波に加え、FR3 や、サブテラヘルツ波までの高周波数帯を中心に対応可能とし、制御局 (CU/DU) の処理能力も向上させた上で、さらに、それぞれの基地局が制御局と一体となって、技術課題アのネットワーク制御に対応するために無線リソースと計算リソースの動的な制御 (各リソースの適切な割当て) が行えるように、RU と CU/DU のソフトやハード面の双方の性能向上を図る必要がある。

具体的には、

- 1) カバレッジ拡大と計算リソース制御対応を実現する複数周波数帯に対応した RU 技術
- 2) 複数周波数帯の無線リソースを処理・制御でき、計算リソースの性能向上と動的制御に対応した CU/DU 技術
- 3) 柔軟かつ稠密なネットワーク展開を可能にするサブテラヘルツ帯ネットワーク構築技術

の確立が必要となる。

ネットワークの各種ノードにおいて、無線リソースと計算リソースの動的な制御が行えるように適切な制御インターフェイスを具備するとともに、AI の学習に必要なデータも収集できる機能を有することで、技術課題アで確立するネットワーク制御技術に最適化された、周波数有効利用の観点から最も有用なネットワーク構築技術の確立が必要となる。

到達目標

ア 高度化された vRAN によるネットワーク制御技術

- 1) 周辺環境情報などを活用し、複数周波数帯に対応した AI による無線リソース最適制御技術

端末からのフィードバック情報だけでなく、周辺環境情報などから短時間先の端末の通信品質を高精度に AI により予測し、予測結果に基づいて適切な周波数帯などの無線リソースを割り当てる技術を確立する。また、端末の使用する周波数帯の追加や削除をより柔軟かつ高速に実現できるようにキャリアアグリゲーション技術を高度化するとともに、ネットワーク全体として最適となるように AI による複数周波数帯に対応した無線リソース最適制御技術を確立する。それにより、従来のキャリアアグリゲーション技術を用いたネットワークよりも高い実効スループットを達成する。さらに、6G を円滑に導入できるように、カバレッジが広く、主要な周波数帯域として 5G に使用されている FR1 等の周波数帯を 6G が動的に使用することも考慮したネットワークの実現を目指す。

2) 高度化された vRAN による無線リソース・計算リソースの動的制御技術

高度化された vRAN において、スループット、レイテンシ、消費電力、信頼性等のネットワークが達成したい複数の KPI の組合せであるマルチ KPI が要求を満たすように、周波数帯や帯域幅、基地局アンテナ、ビームなどの無線リソースの制御と、RU や CU/DU の計算リソースの制御を同時に動的かつ最適に実現する技術を確立する。無線通信に必要な計算リソースを仮想化やソフトウェア化することで、効率的にネットワーク制御を実現し、高い柔軟性と拡張性を持つネットワーク性能を実現することを目指す。

また、総合的なシステム設計及び評価として、技術課題ア及び技術課題イで確立した技術を実装した各種ネットワーク装置を組み合わせることで、複数周波数帯を横断的に活用できる実験系を構築し、それを統合実験において活用することで、移動端末の実効スループットを 2 倍に、高周波数帯の利用率を 2 倍に向上できることを明らかにする。さらに、統合実験のデジタルツインをサイバー空間で構築し、それを複数セルと複数端末などのシステムレベルに拡張することで、実験では検証できない規模や条件、例えば、端末が一般道での走行レベルの速度で移動した際のシステム評価ができる規模においてシステム評価を実施し、総合的なシステム設計及びその最適化に資するデジタルツインシミュレーション技術を確立する。それを実現するデジタルツインシミュレータは、研究開発されたネットワーク装置の一部を活用しつつ、それ以外についてはサイバー空間においてデジタルツインでモデリングし、加えて、屋外実験環境のデジタルツイン化による高精度な電波伝搬シミュレーションなどを組み合わせて評価を実施する。なお、ネットワークを社会実装する上で重要となるネットワークの性能向上に加えて、高コスト効率化や環境負荷低減に資する低消費電力化も考慮して研究開発を実施する。

イ 周波数有効利用に資するネットワーク構築技術

1) カバレッジ拡大と計算リソース制御対応を実現する複数周波数帯に対応した RU 技術

従来の Sub6 やミリ波に加え、FR3 に対応可能な RU 技術を開発する。RU が複数の周波数帯に対応することで、基地局の設置場所を確保することが難しくなっている課題を解決するとともに、低い周波数帯によるカバレッジ拡大と高い周波数帯の積極的な活用によるネットワークの通信性能の飛躍的向上の両立を目指す。また、複数周波数帯に対応することで RU の装置サイズや消費電力が増大してしまうことを避けるために、RU のベースバンド信号処理に用いる計算リソースを複数周波数帯の信号処理に共通的に利用可能にし、AI を活用した無線リソース制御によって複数周波数帯を切り替えて動作させることで、RU に実装する計算リソースを 1/2 程度に削減する技術を開発する。さらに、RU 内でコスト及び消費電力の多くの部分を占めるパワーアンプ(PA)については、既存の高周波帯 PA デバイス設計では、周波数ごとに専用設計が

必要となり、装置規模や消費電力の増大、設計・製造コストの上昇などの課題がある。本研究開発では、複数周波数帯に適用可能な PA 技術の開発を通じて、これらの課題を克服し、高コスト効率かつ低消費電力なデバイスの実現を目指す。

2) 複数周波数帯の無線リソースを処理・制御でき、計算リソースの性能向上と動的制御に対応した CU/DU 技術

複数周波数帯に対応した複数の RU から、あるいは、RU への信号を処理できる高性能な CU 及び DU を開発する。無線リソースと計算リソースの動的制御が行えるように、RU との適切な制御インターフェイスを具備するとともに、AI の学習に必要なデータを RU から収集できる機能を有する CU/DU 技術を確立する。無線リソースと計算リソースを同時に動的制御する vRAN 機能に特化したプロセッサ活用技術によって、同一消費電力における CU 及び DU の処理性能を向上させることを目指す。

3) 柔軟かつ稠密なネットワーク展開を可能にするサブテラヘルツ帯ネットワーク構築技術

柔軟かつ稠密なネットワーク展開を可能にするためには、光ファイバが無い環境にも基地局が容易に設置できる拠点間無線エントランス回線が求められている。そこで、無線エントランス向けの 100Gbps 級の伝送が可能であり、集積された IC が搭載された小型サブテラヘルツ帯無線フロントエンドと、100m 以上の伝送距離を可能とする等価等方輻射電力 (50dBm 以上) を実現し、ビームの電子制御が可能なメタサーフェスを開発する。さらに、当該無線フロントエンドとメタサーフェスを具備した無線エントランス装置を開発する。

加えて、6G における基地局と端末間の無線通信においてサブテラヘルツ帯を活用したネットワークを構築するため、サブテラヘルツ帯基地局装置を構成する CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) IC フロントエンドを用いて、高利得なビームフォーミングを実現するフェーズドアレイアンテナを構築し、送受信一体型の RU 技術を確立する。

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 8 年度>

令和 8 年度は、複数周波数帯の横断的活用に向けた基盤技術の設計・試作を行い、最終的な「移動端末の実効スループット 2 倍」「高周波数帯利用率 2 倍」などの到達目標達成に向けた技術的土台を構築する。

ア 高度化された vRAN によるネットワーク制御技術

- 1) 周辺環境情報などを活用し、複数周波数帯に対応した AI による無線リソースの最適制御技術
 - ・複数周波数帯の無線リソース最適制御の基本方式・システム設計
- 2) 高度化された vRAN による無線リソース・計算リソースの動的制御技術
 - ・無線リソース・計算リソースの動的制御の基本方式・システム設計
 - ・デジタルツインシミュレータの基本設計と統合実験に向けた基本実験系の構築

イ 周波数有効利用に資するネットワーク構築技術

- 1) カバレッジ拡大と計算リソース制御対応を実現する複数周波数帯に対応した RU 技術
 - ・複数周波数帯対応 RU の基本設計・部分試作
 - ・複数周波数帯対応端末のアナログ部の基本実験系の構築、評価
 - ・高コスト効率で低消費電力な PA デバイスの基本設計
- 2) 複数周波数帯の無線リソースを処理・制御でき、計算リソースの性能向上と動的制御に対応した CU/DU 技術
 - ・複数周波数帯対応、無線リソース・計算リソース動的制御を実現する vRAN の基本設計・部分実装
- 3) 柔軟かつ稠密なネットワーク展開を可能にするサブテラヘルツ帯ネットワーク構築技術
 - ・サブテラヘルツ帯拠点間通信における拠点間エントランス技術要素の開発
 - ・サブテラヘルツ帯基地局装置を構成する CMOS IC の基本設計・試作・評価

＜令和 9 年度＞

令和 9 年度は、令和 8 年度に設計した基盤技術の実装・評価を進め、複数周波数帯の横断的活用技術の実現性を検証する。

ア 高度化された vRAN によるネットワーク制御技術

- 1) 周辺環境情報などを活用し、複数周波数帯に対応した AI による無線リソースの最適制御技術
 - ・複数周波数帯の無線リソース最適制御の基本方式実装・シミュレーション評価
- 2) 高度化された vRAN による無線リソース・計算リソースの動的制御技術
 - ・無線リソース・計算リソースの動的制御の方式実装・シミュレーション評価
 - ・デジタルツインシミュレータの詳細設計と統合実験に向けた拡張実験系の構築

イ 周波数有効利用に資するネットワーク構築技術

- 1) カバレッジ拡大と計算リソース制御対応を実現する複数周波数帯に対応した RU 技術
 - ・ 複数周波数対応 RU 詳細設計・試作開発
 - ・ 複数周波数帯対応端末のデジタル部を含む拡張実験系の構築、評価
 - ・ 高コスト効率で低消費電力な PA デバイスの改良設計
- 2) 複数周波数帯の無線リソースを処理・制御でき、計算リソースの性能向上と動的制御に対応した CU/DU 技術
 - ・ 複数周波数対応、無線リソース・計算リソース動的制御を実現する vRAN のシステム設計・部分実装・評価
- 3) 柔軟かつ稠密なネットワーク展開を可能にするサブテラヘルツ帯ネットワーク構築技術
 - ・ サブテラヘルツ帯拠点間通信における拠点間エントランス構成要素の開発
 - ・ サブテラヘルツ帯基地局装置を構成する CMOS IC の改良設計・評価

<令和 10 年度>

令和 10 年度は、各技術の改良・統合検証を行い、最終年度の社会実装・実証実験に向けた準備を整える。

ア 高度化された vRAN によるネットワーク制御技術

- 1) 周辺環境情報などを活用し、複数周波数帯に対応した AI による無線リソースの最適制御技術
 - ・ 複数周波数帯の無線リソース最適制御の改良方式実装・シミュレーション統合検証
- 2) 高度化された vRAN による無線リソース・計算リソースの動的制御技術
 - ・ 無線リソースと計算リソースの動的制御の改良方式実装・シミュレーション評価
 - ・ 各技術課題で開発した装置を接続した実験系のシステム構築と基本実験
 - ・ 各技術課題で開発した装置を活用したデジタルツインシミュレータの構築

イ 周波数有効利用に資するネットワーク構築技術

- 1) カバレッジ拡大と計算リソース制御対応を実現する複数周波数帯に対応した RU 技術
 - ・ FR3 向け RU 開発・評価
 - ・ 複数周波数対応 RU 試作開発・結合評価
 - ・ 複数周波数帯対応端末のマルチバンド RF 基本実験系の構築、評価
- 2) 複数周波数帯の無線リソースを処理・制御でき、計算リソースの性能向上と動的制御に対応した CU/DU 技術
 - ・ 複数周波数対応、無線リソース・計算リソース動的制御を実現する vRAN のシステム開発・評価

- 3) 柔軟かつ稠密なネットワーク展開を可能にするサブテラヘルツ帯ネットワーク構築技術
- ・サブテラヘルツ帯拠点間通信における拠点間エントランス構成要素の改良開発
 - ・サブテラヘルツ帯基地局装置を構成するフロントエンドモジュールの試作・評価

＜令和 11 年度＞

令和 11 年度は、これまでに開発・改良した各技術の統合実験・総合評価を実施し、最終的な到達目標（移動端末の実効スループット 2 倍、高周波数帯利用率 2 倍、周波数逼迫緩和など）の達成を実証する。

ア 高度化された vRAN によるネットワーク制御技術

- 1) 周辺環境情報などを活用し、複数周波数帯に対応した AI による無線リソースの最適制御技術
 - ・統合実験のため統合シミュレーション評価
- 2) 高度化された vRAN による無線リソース・計算リソースの動的制御技術
 - ・統合実験のための統合シミュレーション評価
 - ・各技術課題で開発した装置と接続した実験系のシステム改良と統合実験。デジタルツインシミュレータを活用した統合シミュレーション

イ 周波数有効利用に資するネットワーク構築技術

- 1) カバレッジ拡大と計算リソース制御対応を実現する複数周波数帯に対応した RU 技術
 - ・FR3 向け RU の追加試作・伝送評価実験
 - ・複数周波数対応 RU 統合実験のための評価
 - ・複数周波数帯対応端末のマルチバンド RF 改良実験系の構築、総合評価
- 2) 複数周波数帯の無線リソースを処理・制御でき、計算リソースの性能向上と動的制御に対応した CU/DU 技術
 - ・複数周波数対応、無線リソース・計算リソース動的制御を実現する vRAN のシステム改良・統合実験に向けた機能評価
- 3) 柔軟かつ稠密なネットワーク展開を可能にするサブテラヘルツ帯ネットワーク構築技術
 - ・サブテラヘルツ帯拠点間通信における拠点間エントランス装置の試作・評価
 - ・サブテラヘルツ帯基地局装置を構成する RU の試作・実験評価

5. 実施期間

令和 8 年度から令和 11 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、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 16 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、各主体の役割及び責務を含め、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(案)＞

275GHz 帯中距離大容量無線通信技術の研究開発

1. 目的

Society5.0の実現に向け、高精細映像やセンシング情報等の伝送に必要な大容量無線通信技術の開発が求められている。また、AIの利活用の拡大やDX・リモートワークの進展等により、情報通信トラヒックが急速に拡大しており、周波数のひっ迫が懸念されている。これらに対応するため、ひっ迫度の高い周波数帯を使用する無線システムの、より高い周波数への移行を促進することが重要である。現在60GHz帯等のミリ波帯の一般利用が限定的ではあるが行われている。さらに、275GHz帯等のより高い周波数になる程、電波のビーム幅を狭くすることができるため、空間的な分離や空間多重の併用が期待でき、ミリ波帯とは異なる活用やユースケースが考えられる。そのため、本事業では、超広帯域・高周波の特徴を活用できる275GHz帯における多数同時接続かつ大容量の通信技術と、大容量スポットエリア通信技術の研究開発を行うことで、通信トラヒックの将来的な急増に対応する通信システムの実現に寄与するとともに、高い周波数への移行を可能とすることで、周波数資源の拡大に資することを目的とする。

2. 政策的位置付け

「AI社会を支える次世代情報通信基盤の実現に向けた戦略 - Beyond 5G 推進戦略2.0 -」(令和6年8月30日 総務省とりまとめ)において、「サブテラヘルツ帯について、諸外国の最新動向を踏まえた上で、将来のニーズに備えて着実に研究開発に取り組むとともに、実証実験を行う際に円滑な電波利用を可能とする方策を検討する。」とされている。

3. 目標

本研究開発は、275GHz帯において以下の2つのシステムを実現するための技術を開発することを目指す。①電子ビーム制御により多数同時接続かつ大容量の通信技術を確立し、見通し30～50mの通信距離で最大10端末の同時通信かつ1端末当たり最大10Gbpsの合計100Gbpsの通信速度を可能とする技術を実現する。②大容量スポットエリア通信技術を確立し、2.16GHz当たり数Gbpsの通信速度の実現と周波数チャネルの柔軟な設定及び数ミリ秒未満で安定して確立される瞬時無線リンクを可能とする。また、大容量スポットエリア通信技術においては見通し100m程度の通信距離を実現することを目指す。

4. 研究開発内容

(1) 概要

275GHz 帯を活用するユースケースとして、データセンターでのサーバ筐体間のデータ伝送の無線化、工場内の機器（自動工作機、検査機、搬送機等）の無線接続、運輸業での車両等との無線通信等が想定される。これら将来の情報通信業・製造業・運輸業等で 275GHz 帯を活用するために必要な技術として、①大規模フェーズドアレーアンテナ（下記（2）アー 1 参照）等を用いた多数同時接続（空間分割多重（空間分離）に加え、ユーザー間隔が近接しているケースでは周波数分割多重も想定）かつ大容量の通信技術と、②高出力増幅器や瞬時無線リンク技術等による大容量スポットエリア通信技術の研究開発を行い、具体的な利活用シーンを想定して検証を行う。

(2) 技術課題及び到達目標

技術課題

ア 多数同時・大容量通信技術の研究開発

概要で示したユースケースを想定して、見通し 30m～50m の通信距離、最大 10 端末の同時通信かつ 1 端末当たり最大 10Gbps・合計 100Gbps の通信速度を可能とする技術の実現を目指し、フェーズドアレーアンテナ及びトランシーバの技術開発を行う。

アー 1 フェーズドアレーアンテナの開発

- ・フェーズドアレーアンテナとは、多数のアンテナ素子を一定間隔で並べ、それぞれの送受信の位相を制御することで、電波の指向性や方向を電子的に制御できるアンテナであり、テラヘルツ帯において多数同時・大容量通信を実現するのに必要な技術である。
- ・このフェーズドアレーアンテナ技術の性能を必要なレベルまで向上する。そのためには、アンテナの配置、アンテナと集積回路の接続、各素子の信号の位相や強度の制御等において従来技術の延長では良好な性能が得られない事項が生じると予想されるため、それらを解決するための技術を確認する。具体的な手法として、1000 素子規模の開口径を有するフェーズドアレー、又はそれと同等の電子的ビーム走査機能を有するアンテナへ拡大することを想定しており、実現難易度や要素技術間の依存関係を踏まえ実現手法を決定する。
- ・また、275GHz 帯のような高い周波数では一般的に放射効率を高め一つのアンテナで広い帯域幅に対応可能とする必要がある。この問題を解決するため、広帯域アンテナの最適設計を行う。また、アンテナと集積回路の接続について課題アー 2 と連携して設計する。

アー 2 フェーズドアレー用トランシーバ技術の開発

- ・課題アー 1 の手法として挙げたアンテナに対応可能な、集積回路内の 2 次元

配置回路を用いて位相を個別に制御する技術を開発する。具体的には、サイドローブを抑制するため半波長程度のピッチで2次元配置されたアンテナモジュールに接続可能なRFフロントエンド集積回路において、半波長ピッチであるがゆえに起こる干渉を抑えつつ、低損失・高効率な信号伝送を実現し、広帯域で安定した位相精度を確保することが考えられる。

- ・あわせて、電子的な位相制御によるビームステアリングを行うためには、1000素子規模のフェーズドアレーを代表とする電子的ビーム走査アンテナ構成を制御する際の位相ズレを最小化できる高精度な同期技術も必要だが、275GHz帯のような高い周波数ではこの規模まで拡大可能な技術が開発された前例はない。そのため本研究開発では、1000素子規模への拡張を想定し、アンテナ間の全体にわたって位相差を制御することで広帯域かつ高利得なアンテナ特性を維持する技術を開発する。

イ 大容量スポットエリア無線通信技術の研究開発

概要で示したユースケースを想定して、2.16GHz 当たり数 Gbps の通信速度の実現と周波数チャネルの柔軟な設定及び数ミリ秒未満で安定して確立される瞬時無線リンクを可能とする。また、見通し 100m 程度の通信距離を実現する技術を開発する。

イー 1 瞬時無線リンクの技術等の開発

- ・IEEE802.15.3e 規格に準拠したコアベースモジュールとRFフロントエンドを組み合わせることで、IEEE802.15.3d 規格 (252GHz~450GHz) に適応させ、テラヘルツ帯域において、周波数チャネルの柔軟な設定及び数ミリ秒未満で安定して確立される瞬時無線リンクが可能な小型モジュールを実現する。IEEE802.15.3e に準拠したシステム・オン・チップの豊富なインターフェースを用いて、様々なアプリケーションのテラヘルツ帯の電波での検証を可能とする技術を確認する。また次世代の更なる高速化のためのベースバンド評価システムを構築し、基礎データを取得することにより、信号処理方式の検討を行う。

イー 2 高出力増幅器技術の開発

- ・200GHz を超える周波数帯において電波をワット級の高出力で放出する場合、半導体デバイスでは高い電流密度による破壊が生じるという課題があるため、高出力伝送への対応が困難であると考えられる。一方、電子の運動エネルギーを直接的に電磁波のエネルギーに変換できる真空管増幅器は、現状でも1Wに迫る飽和出力が報告されており、高出力化において有望と考えられている。
- ・275GHz 帯に対応した真空管増幅器技術を確認するため、真空管増幅器のコアとなる遅波回路での電子ビームと電磁波の相互作用を、3次元過渡解析などのシミュレーションで明らかにし、コンポーネントの設計技術を開発する。

これを基に、高出力増幅器を試作・評価し、実用化に向けた安定化検証等を行う。

到達目標

ア 多数同時・大容量通信技術の研究開発

見通し 30m～50m の通信距離、最大 10 端末の同時通信、1 端末当たり最大 10Gbps (計 100Gbps) の通信速度を実現する。

イ 大容量スポットエリア無線通信技術の研究開発

2. 16GHz 幅あたり数 Gbps の通信速度の実現と周波数チャネルの柔軟な設定及び数ミリ秒未満で安定して確立される瞬時無線リンクを可能とする。また、見通し 100m 程度の通信距離を実現する。

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、以下を想定している。

<令和8年度>

ア 多数同時・大容量通信技術の研究開発

アー１ フェーズドアレーアンテナの開発

- ・マルチチップ対応アレーアンテナにおけるサイドローブ抑制に向けたアンテナ構成の基礎検討を完了させる。
- ・アンテナの広帯域低実装損失設計の基礎検討を完了させる。低損失な基板材料を用いた広帯域アンテナの設計及び課題アー２と連携して、アンテナと集積回路の接続時の整合回路損失等を低減させるための設計を実施し、シミュレーションにより検証する。

アー２ フェーズドアレー用トランシーバ技術の開発

- ・２次元ビーム制御を実現するための位相制御の基礎検討を完了させる。位相シフタ回路を設計し、シミュレーションで性能を確認するとともに、回路配置の方針を決める。
- ・複数の集積回路チップにわたって位相を制御する場合の、チップ間の位相同期とビームステアリングの基礎検討を完了させる。

イ 大容量スポットエリア無線通信技術の研究開発

イー１ 瞬時無線リンクの技術等の開発

- ・瞬時無線リンク及び柔軟な周波数チャネル設定等について、コア集積回路を製造し、評価に必要な一定量の試料を確保する。
- ・検証プラットフォームの要件（端末数、基地局／端末の構成、観測項目、時刻同期等）を決定する。
- ・検証プラットフォームの要件と整合するように、小型モジュールの要求仕

様（外形、インタフェース、電力等）を決定する。

- ・小型モジュールに搭載するアンテナの選定又は開発の方針を定める。
- ・代表的ユースケース候補を抽出し、検証プラットフォームの受入れ基準・評価シナリオ・サイト条件を定め、全体検証の枠組みを決定する。

イー２ 高出力増幅器技術の開発

- ・真空管増幅器の各要素（遅波回路、遅波回路の周辺部分等）に関し、実際の構造設計に資するシミュレーション技術の開発を行い、併せて真空管増幅器の各要素についての設計・検討を行う。また、上記要素の実現に必要な製造プロセス技術の検討を行う。

<令和９年度>

ア 多数同時・大容量通信技術の研究開発

アー１ フェーズドアレーアンテナの開発

- ・マルチチップ対応アレーアンテナの要素技術の試作を実施し、サイドローブ抑制効果について測定し、評価・検証する。
- ・アンテナの広帯域低実装損失設計の要素技術の試作を完了させ、低損失基板材料を用いたアンテナ特性の広帯域低損失化について検証する。

アー２ フェーズドアレー用トランシーバ技術の開発

- ・２次元ビーム制御を実現するための位相制御の機能ブロックについて、集積回路による試作を完了させ、性能を測定評価する。
- ・複数集積回路チップにわたる位相制御について、２チップ間の位相同期とビームステアリングの機能ブロックの設計を完了させ、シミュレーションで性能を確認する。

イ 大容量スポットエリア無線通信技術の研究開発

イー１ 瞬時無線リンクの技術等の開発

- ・コア集積回路とアンテナとを組み合わせた小型モジュールの設計を完了し、試作を行う。
- ・当該小型モジュールの無線リンク確立時間や実効スループット等の基礎評価を行う。
- ・代表的なユースケースを選定し、その評価シナリオ等を検証プラットフォームの全体仕様に反映する。

イー２ 高出力増幅器技術の開発

- ・真空管増幅器の各要素（遅波回路、遅波回路の周辺部分等）の設計・シミュレーション技術の研究開発を進めると共に、真空管増幅器のシミュレーション技術の研究開発を行う。
- ・上記シミュレーション技術（増幅率、電子ビームと電磁波の相互作用の度合等）から得られる知見を活かしながら、真空管増幅器の設計・検討を行う。

- ・真空管増幅器要素の製造プロセスの技術開発を進め、その成果を真空管増幅器要素の設計・シミュレーションの研究開発に再統合する。

<令和 10 年度>

ア 多数同時・大容量通信技術の研究開発

アー 1 フェーズドアレーアンテナの開発

- ・マルチチップ対応アレーアンテナの要素技術とアンテナの広帯域低実装損失設計の要素技術を組み合わせたアンテナの試作を実施し、サイドローブを抑制した広帯域低損失アンテナの試作・検証を完了させる。

アー 2 フェーズドアレー用トランシーバ技術の開発

- ・2次元ビーム制御を実現するための集積回路と周辺部品を実装したトランシーバを試作し、全体的な動作検証を完了させる。

イ 大容量スポットエリア無線通信技術の研究開発

イー 1 瞬時無線リンクの技術等の開発

- ・代表的ユースケースの検証を行うための小型モジュールの増産を行う。
- ・小型モジュールを用いて、検証プラットフォームの性能評価（無線接続性、安定性、ログ取得と監視、設置誤差に対する許容度等）を実施する。
- ・将来的な高速化検証（並列動作等）に資するベースバンド評価システムを構築して一次評価を実施、課題抽出と改善方針の検討を行う。

イー 2 高出力増幅器技術の開発

- ・真空管増幅器の研究開発を進めると共に、得られた知見を真空管増幅器の設計・シミュレーション技術に反映し、特性改善（増幅率の向上、帯域幅の拡大等）へ向けた研究開発を進める。

<令和 11 年度>

ア 多数同時・大容量通信技術の研究開発

アー 1、

アー 2 共通

- ・2次元ビーム制御を実現するためのアンテナ部とトランシーバ部を結合し、統合検証を完了させる。

イ 大容量スポットエリア無線通信技術の研究開発

イー 1 瞬時無線リンクの技術等の開発

- ・代表的ユースケースを検証プラットフォーム上で評価するための事前検証を実施し、運用・保守の手順及び試験計画を具体化する。
- ・ベースバンド評価システムを用いて、並列チャネル動作等の現行の実効性能の向上を可能とする方式についての基礎データを得るとともに、100Gbps以上のスループットを実現するための、段階的なロードマップを提示する。

イー２ 高出力増幅器技術の開発

- ・真空管増幅器の設計・シミュレーション技術の研究開発を進め、得られた知見を製造プロセス技術などに反映し、安定動作へ向けた研究開発を進める。

ア、イ共通

- ・ア及びイで得られた知見・内容を統合して、選定された代表的なユースケースを想定した検証プラットフォーム上で評価を行い、想定したデータが得られることを確認する。

5. 実施期間

令和８年度から令和１１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・団体へ提案することが重要である。例えば、ITU-R（国際電気通信連合 無線通信部門）では 2031 年に開催予定の世界無線会議(WRC-31)において 275GHz から 450GHz までの周波数割り当てについて議論される予定となっており、それに向けて技術レポートの作成や国際的な調整が行われる。このような機会を捉え、研究開発の進捗に合わせて、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 16 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、各主体の役割及び責務を含め、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(案)＞

産業分野の通信環境を最適化する無線制御技術の研究開発

1. 目的

生産年齢人口の減少等を背景として、あらゆる産業分野で人手不足が深刻化しているため、労働資源の最適化の観点から、公衆回線網を介した自営回線網上に存在するロボットなどの遠隔制御等の早期導入による産業分野における省力化及び省人化などが求められている。また工場等における生産効率を維持するためには、遠隔制御等を導入した上で製造ラインを止めないことが最も重要となる。

他方、これらの実現には、当該制御を行う者が管理することが困難なインターネットを含む公衆回線網を介し、複数の異なる無線通信技術を適材適所に用いた自営回線網に存在するロボットを制御する場合、End-to-End（以下「E2E」という。）で大容量、超低遅延、高信頼性が確保できる専用無線通信技術が必要不可欠であるが、異なる管理方式かつ複数の通信方式が混在したネットワークを経由してデータ送信が行われるため、環境に応じて一つ又は複数のボトルネックが発生し、データ量が処理可能な上限を超えることによるデータ損失や周波数共有部分での帯域圧迫に伴う干渉や遅延が生じる等といった課題を抱えている。具体的には、現状では次の①及び②の技術的課題がボトルネックとなっており、当該ネットワークの実現に至っていない。

- ① 周波数リソースの最適化のために必要な情報が収集できるインターフェースの標準化がされていないため、汎用的な最適化手法の設計が困難である。
- ② 遅延保証のための過剰な帯域確保や到達保証のための過剰な冗長化などに起因し、データ量が処理可能な上限を超えることによるデータ損失や周波数共有部分での干渉や遅延等が発生する。

これらの課題を解決するため、本研究開発では、産業分野の通信環境を最適化する無線制御技術を確立するとともに、その技術を適用した移動通信システムや無線LANなどの無線通信方式について国際標準化を目指す。

2. 政策的位置付け

- ・ 成長戦略実行計画（令和3年）、第2章 2. 5Gの早期全国展開、ポスト5Gの推進、いわゆる6G（ビヨンド5G）の推進において、「安全・安心な5Gの情報通信インフラの早期かつ集中的な整備を推進する。今後の産業用途への拡大に必要な多数同時接続や超低遅延の機能が強化された5G（ポスト5G）、さらには6G（ビヨンド5G）の技術開発を推進する。」旨の記載あり。
- ・ 新しい資本主義のグランドデザイン及び実行計画 2024 年改訂版、V 2 （2）

ポスト5G、6Gの実現において、「ポスト5Gの情報通信システムの開発を進めるとともに、次世代の通信インフラである6G（ビヨンド5G）については、その要素技術として先行する光通信技術の2030年頃の導入を見据えて、異なる事業者同士を接続してサービスを提供するために必要な技術を今後5年以内に確立するとともに、国際標準化を加速する。（後略）」旨の記載あり。

- ・ 経済財政運営と改革の基本方針2024（骨太の方針2024）、第1章 2（社会課題解決をエンジンとした生産性向上と成長機会の拡大）において、「人口減少を機会と捉え、DX、新技術の徹底した社会実装、フロンティアの開拓等によりイノベーションを促進するとともに、成長分野への人材や資金の流入を加速させることにより、生産性を向上させて供給力を高めていく。（後略）」、また、第2章 3（4）科学技術の振興・イノベーションの促進において、「（前略）このため、新たな産業の芽となるフュージョンエネルギーや量子、経済社会を支える基盤的な技術・分野であるAI、バイオ、マテリアル、半導体、Beyond 5G（6G）、健康・医療等について、分野を跨いだ技術の融合による研究開発、産業化、人材育成を俯瞰的な視点で強力に推進するとともに、グローバルな視点での連携を強化し、市場創出等に向けた国際標準化などの国際的なルールメイキングの主導・参画や、G7を始めとした同志国やASEAN・インドを含むグローバル・サウスとの国際共同研究、人材交流等を推進する。（後略）」旨の記載あり。

3. 目標

本研究開発では、産業分野の通信環境を最適化する無線制御技術である「産業用無線通信技術」、「無線アクセス制御技術」、「環境適応型無線制御技術」の各要素技術確立し、制御対象であるロボットなどが存在する空間の無線帯域が混雑している状況でアプリケーション収容率（要求されたアプリケーションに対して収容できるアプリケーションの割合）を3倍程度向上させることで、突発的な帯域ひっ迫や通信状態の悪化が発生しても安定した制御を可能にする。例えば、無人搬送車（AGV：Automatic Guided Vehicle）や自走ロボット（AMR：Autonomous Mobile Robot）の遠隔制御をターゲットとし、工場や物流倉庫などでの実利用を想定した技術開発と実証実験を行う。また、これらの技術を適用した移動通信システムや無線LAN等の無線通信方式について国際標準化と速やかな社会実装に向けて、実工場での実証実験の実施を目指す。

4. 研究開発内容

（1）概要

2030年代の工場等における労働資源の最適化を図り、人手不足を解消するとともに、周波数の効率的な利用により周波数のひっ迫状態を解消するため、通信経路の信頼性担保に必要な各端末の無線通信に関する状況を周辺の端末やシステムに通知する「技術課題ア：産業用無線通信技術」、同期とグループ化された端末グル

ープ間での周波数リソースの制御によりシステム全体を最適化する「技術課題イ：無線アクセス制御技術」、ロボット等を制御したいタイミングで確実に制御するため処理する情報量と送信する情報量をネットワーク状態に連動して制御する「技術課題ウ：環境適応型無線制御技術」を確立する。また、通信容量の増加を目的とした技術課題アと、通信量の削減を目的とした技術課題イまたはウを組み合わせることで、それぞれの場合に令和 11 年度までにアプリケーション収容率を 3 倍程度向上させる。さらに、こうしたミッションクリティカルな遠隔制御等が可能なネットワークの早期実現に向けて、本技術を適用した無線通信方式の 3GPP や IEEE 等における国際標準化を目指す。

(2) 技術課題及び到達目標

本研究開発課題では、物理レイヤからアプリケーションレイヤまで、必要に応じて各レイヤ間で連携することで、異なる管理方式やシステムが混在するネットワークを介してロボット制御などのミッションクリティカルな制御を実現する。

技術課題

ア 産業用無線通信技術

本技術の研究開発では、以下の 2 つの要素技術を確立する。各要素技術について以下の課題がある。

アー 1 情報通知型産業用無線通信デバイスの研究開発

通常、公衆回線網を介し自営回線網に存在するロボット等の遠隔制御を実現する場合、E2E で大容量、超低遅延、高信頼性が確保できる専用無線通信回線が必要不可欠であるが、製造現場等の様々な無線通信を利用したシステムが共存する環境下では、専用回線の確保が困難な場合がある。また、産業用システムの一部として無線通信を組み込む場合、製造現場等で即座に状況を把握し、周波数利用の最適化をする必要があるが、最適化に必要な情報が収集できるインターフェースの標準化がされていないため、実現が困難であるという課題がある。

アー 2 自己診断・情報通知機能の研究開発

産業用システムは、産業用機器が単独で稼働しているのではなく、複数の機器が連動して一つの動作することが一般的であるが、各機器で利用されている無線通信の動作が独立しているため、うまく動作しないことがある。無線リソースを共有する機器やシステム同士で周波数利用の最適化を行うためには、それぞれの機器やシステムの無線通信の現状の把握が必要であるが、それぞれの無線通信の状態を自ら判断する仕組みや、同一空間に存在する他の機器やシステムの無線通信状態の情報を収集する仕組みがないため、周波数利用の最適化ができないという課題がある。

イ 無線アクセス制御技術

本技術の研究開発では、以下の2つの要素技術を確立する。各要素技術について以下の課題がある。

イー 1 同期・アクチュエーションのための無線制御技術の研究開発

特に、ミッションクリティカルな制御データは、低遅延が求められる高 QoS データであり、E2E の遅延要求条件を満たさないデータは、用いられずに廃棄される。

高 QoS データの送信では、通常、データ発生時にあらかじめ割り当てておいた無線リソース（以下「予約リソース」という。）を用いて送信される。他方、無線リソースは有限であることから、多数の高 QoS データが発生する場合、高 QoS データ同士の衝突が頻発し、これが再送の頻発を招き、更なる周波数ひっ迫を助長するという悪循環に陥り、電波の有効利用の観点で極めて深刻な問題となる。また、現実空間へ反映するアクチュエーションは、アプリケーション毎の要求条件を満たすため、例えば信頼性を担保するために冗長性を確保したり、多種多様な通信を同時に制御する必要があるが、それらを実現するための技術は確立されていない。

イー 2 伝送路情報取得技術の研究開発

現実空間の電波伝搬環境を仮想空間において正確に把握することができれば、アクチュエーションのための通信制御を適切に行なうことができる。そのため、センサーを用いて取得されたデータからモデルを生成し、これに対してシミュレーションを行うことによって、仮想空間内に実環境を再現する技術の検討が活発に行われている。

他方、これらの手法によって生成されたモデルでは、構造物が通信に与える影響が考慮されていない。そのため、生成されたモデルを仮想空間に入力してシミュレートしたとしても、現実の状況との間に乖離が発生し、仮想空間での通信エリアや通信品質の評価結果との間に許容できない誤差が発生してしまうという課題がある。

ウ 環境適応型無線制御技術

本技術の研究開発では、以下の3つの要素技術を確立する。各要素技術について以下の課題がある。

ウー 1 通信経路信頼度判定技術

公衆回線網を介し自営回線網に存在するロボット等の遠隔制御を実現する場合、E2E で高信頼な通信経路を確保する必要がある。他方、通信路上に無線区間があり、通信路を複数のシステムで共有する場合には、それぞれのシステム

の情報をやり取りする通信路をどのように設定するかが重要な課題になる。また、複数の産業機械が連動して動作する場合、全体システムの動作に対しての優先度が変化するが、通信路上に無線区間が存在する場合、その通信路の信頼度が時々刻々と変化するため、これらを考慮せず固定で割り当てた通信路の利用が適切ではない場合がある。

ウー２ アプリケーション制御技術

通常、公衆回線網を介し自営回線網に存在するロボット等の遠隔制御を実現する場合、E2E で大容量、超低遅延、高信頼性が確保できる専用無線通信回線が必要不可欠であるが、製造現場等様々な無線通信を利用したシステムが共存する状況では、専用回線の確保が困難な場合がある。無線リソースは有限であることから、多数の制御データが同時に発生する場合、輻輳が発生し、制御データが必要な時刻に届けられず、ロボット等のアプリケーションに適切なタイミングで必要な動作を行わせるための制御ができないという問題が発生する。

ウー３ 空間情報と通信環境の管理技術

公衆回線網を介し自営回線網に存在するロボット等の遠隔制御を実現する場合、E2E で高信頼な通信経路を確保する必要がある。複数の産業機械が連動して動作する場合、全体システムの動作に対しての優先度が変化するが、通信路上に無線区間が存在する場合、その通信路の信頼度が時々刻々と変化するため、これらを考慮せず固定で割り当てた通信路の利用が適切ではない場合がある一方で、複数の産業機器に対して実際の動作に追従して割り当てるのが困難な場合がある。

到達目標

本研究課題では、ア 産業用無線通信技術、イ 無線アクセス制御技術、ウ 環境適応型無線制御技術の各要素技術を確立することで、制御対象であるロボットなどが存在する空間の無線帯域が混雑している状況でアプリケーション収容率を総合的に最大３倍程度向上させる。

ア 産業用無線通信技術

制御対象であるロボットなどが存在する空間の無線帯域が混雑している状況で製造ラインの稼働を止めないという QoE を満たして制御できるアプリケーション収容数を 1.5 倍に向上させる。

アー１ 情報通知型産業用無線通信デバイスの研究開発

ミッションクリティカルな制御データをやり取りしなければならないシステムには、本来専用回線を割り当てなければならないところ、他のシステムが利用しているチャンネルを共用することで、アプリケーション収容率を向上させる。

また、既存の無線通信技術では周波数リソースの有効利用に必要な情報を取り出すインターフェースが定義されておらず、さらに、制御不能なパラメータも多く存在することから、産業用システムの一部として機能する無線モジュールとして必要な情報を取り出すためのインターフェースの定義及び設計を行うとともに、ソフトウェアにより無線パラメータを変更できる仕組みを確立する。

アー 2 自己診断・情報通知機能の研究開発

通信機器本体や周辺の無線区間の情報を収集し、自己診断や他の端末との情報通知に利用する自己モニタリングアルゴリズムを確立する。サブキャリア毎の情報を一定時間間隔で収集し、複数の通信性能に関する指標をもとに自らの状態を判断する。また、ネットワークを構成する通信システム群からリスク分析に必要な情報を必要な速度、粒度で収集及び交換し、実情報とシミュレーションを併用し、同一空間で利用されている無線通信を同時に再現することで、空間の電波デザインを最適化する技術を確立する。

イ 無線アクセス制御技術

制御するロボット等の存在する空間において、現実の状況と乖離のないサイトスペシフィックな電波伝搬モデルをもとに予測される無線環境の状態に応じて、無線帯域が混雑している場合に、再送と干渉を制御することで、製造ラインの稼働を止めないという QoE を満たして制御できるアプリケーション数を 2 倍に向上させる。

イー 1 同期・アクチュエーションのための無線制御技術の研究開発

異なる E2E の遅延の要求条件を持つ複数のアプリケーションを想定し、遅延時間の予測値を用いた再送制御と無線環境の統計的特徴に基づいた干渉制御を確立し、アプリケーション収容率の向上を実現する。

イー 2 伝送路情報取得技術の研究開発

現実空間が多様であることから制御対象のロボット等が存在する空間で取得した三次元構造モデルと電波測定情報から、サイトスペシフィックな電波伝搬環境モデルを構築するための技術を確立する。

ウ 環境適応型無線制御技術

無線帯域が混雑している場合に、無線環境の状況に基づくアプリケーションの判断に応じて、通信経路上の適切な場所で情報処理の仕方を変更することで、製造ラインの稼働を止めないという QoE を満たして制御できるアプリケーション数を 2 倍に向上させる。

ウー 1 通信経路信頼度判定技術

通信経路のリスク分析を実施し、ネットワーク上の各リンクのインパクトを評価する。この評価結果に基づき、各アプリケーションの利用可能な通信経路の信頼性を判定し、各アプリケーションに最適な通信経路を選択する技術を確立する。

ウー 2 アプリケーション制御技術

無線環境の状況と各通信経路に用いられている通信方式に応じて、各レイヤで処理する情報量と送付する情報量を調整し、アプリケーションをネットワークの状態に動的に連動・制御させることにより、有限なリソースを効率的に活用する無線制御技術を確立する。

ウー 3 空間情報と通信環境の管理技術

制御対象のロボットなどが存在する空間の様々な環境情報に加え、対象となるアプリケーションの通信の情報を収集し、それらの情報と通信経路信頼度に基づき必要なネットワーク機能の調整を行うための通信制御技術を確立する。また、自己診断情報と収集した周辺端末の情報をもとに、推定割当て可能帯域を算出し、各リンクの割当て可能推定量とアプリケーションの要件を基に、通信経路を自動で構築する技術を確立する。

なお、最終年度には、社会実装を想定した統合実証試験を実施する。

また、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 8 年度>

ア 産業用無線通信技術

- ・ 必要な情報の取得ができるインターフェースを備え、データ処理方法や再送有無などの値を変更が可能な産業用無線通信装置の基本設計
- ・ 通信経路や通信方式を最適化するための自己診断機能の一次試作

イ 無線アクセス制御技術

- ・ 混雑時に再送するアプリケーションを絞り込むための同期・アクチュエーションのための無線制御技術の基本設計
- ・ 電波環境モデルを設計するための基礎評価と、アプリケーションの要求に即したデータ転送ができているかどうかをモニタリングするための伝送路情報取得技術の基本設計

ウ 環境適応型無線制御技術

- ・ アプリケーションの要求と無線環境の状況に即した通信経路を選定するための通信経路信頼度判定技術の基本設計
- ・ アプリケーションと無線環境の状況に応じて情報処理方法を変更するアプリケーション制御技術の基本設計

- ・無線環境とアプリケーションの状態に適応した無線リソース割当てのための空間情報と通信環境の管理システム基本設計

<令和9年度>

ア 産業用無線通信技術

- ・必要な情報の取得ができるインターフェースを備え、データ処理方法や再送有無などの値を変更が可能な産業用型無線通信装置の一次試作
- ・通信経路や通信方式を最適化するための自己診断機能の二次試作

イ 無線アクセス制御技術

- ・混雑時に再送するアプリケーションを絞り込むための同期・アクチュエーションのための無線制御技術の開発
- ・電波環境モデルの一次試作とアプリケーションの要求に即したデータ転送ができているかどうかをモニタリングするための伝送路情報取得技術の開発

ウ 環境適応型無線制御技術

- ・アプリケーションの要求と無線環境の状態に即した通信経路を選定するための通信経路信頼度判定技術の開発
- ・アプリケーションと無線環境の状況に応じて情報処理方法を変更するアプリケーション制御技術の開発
- ・無線環境とアプリケーションの状態に適応した無線リソース割当てのための空間情報と通信環境の管理システムの開発

<令和10年度>

ア 産業用無線通信技術

- ・必要な情報の取得ができるインターフェースを備え、データ処理方法や再送有無などの値を変更が可能な産業用無線通信装置の二次試作
- ・通信経路や通信方式を最適化するための自己診断機能の統合実装

イ 無線アクセス制御技術

- ・混雑時に再送するアプリケーションを絞り込むための同期・アクチュエーションのための無線制御技術の評価・改良
- ・電波環境モデルの改善とアプリケーションの要求に即したデータ転送ができているかどうかを自動判断するためのAI高度化伝送路情報取得技術の開発

ウ 環境適応型無線制御技術

- ・アプリケーションの要求と無線環境の状態に即した通信経路を選定するための通信経路信頼度判定技術の評価・改良
- ・ミッションクリティカルな制御の安定的な実行に必要な通信経路最適化技術の統合実装

<令和11年度>

ア 産業用無線通信技術

- ・ 必要な情報の取得ができるインターフェースを備え、データ処理方法や再送有無などの値を変更が可能な産業用無線通信装置の統合実装

イ 無線アクセス制御技術

- ・ 電波環境モデルとアプリケーションの要求に即したデータ転送ができているかどうかを自動判断するための伝送路情報取得技術の統合実装

ウ 環境適応型無線制御技術

- ・ アプリケーションと無線環境の状況に応じて情報処理方法を変更するアプリケーション制御技術の統合実装及び統合試験
- ・ 社会実装を想定した統合実証

5. 実施期間

令和8年度から令和11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、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、複数の標準化団体にまたがった活動が必要な場合はその関連性も記すこと。

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16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し、ターゲットとするアプリケーションやシステムを明確化した上で達成度を評価することが可能な具体的な評価項目と評価条件を設定し、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課題間の連携や研究方法、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、各研究課題の課題解決に必要な標準化活動と標準化戦略を明確に示すこと。

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、有識者等を含んだ研究開発運営委員会等を開催したり、特に標準化活動推進にあたっては別途技術検討委員会を設置したり、標準化団体と密に連携する等、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に具体的に社会実装を見据えた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(案)＞

超高周波次世代通信システムに向けた高安定高周波クロック及び 高精度時刻同期モジュールの研究開発

1. 目的

ネットワークに接続される IoT デバイスの数は今後も加速度的に増加することが見込まれており、無線ネットワークにおいては、多数のモビリティ機器やセンサーの間で画像等の大量のデータをリアルタイムに送受信する用途が拡充され、通信量も更に爆発的に増大することが危惧されている。これらの電波利用のニーズの拡大や多様化を踏まえ、2030 年代には新たに約 102GHz 幅の周波数帯域の確保が必要（デジタル変革時代の電波政策懇談会報告書、令和 3 年 8 月 31 日）となっており、2040 年代には無線トラヒックについて、地域類型別等に携帯電話網・NTN・Wi-Fi で収容するとして、更に約 70GHz 幅（73.1GHz 幅）が必要との試算（周波数再編アクションプラン（令和 7 年度版）、令和 7 年 11 月 28 日）がなされている。

このような状況において、超高周波帯(10～100GHz)の利活用は極めて重要なテーマであり、多くの研究開発が既に進捗している。特に近年では、未使用の周波数帯の開拓という観点に留まらず、当該周波数帯での多値化や Massive MIMO を用いたビームフォーミングによる空間多重、分散 MIMO による電波の協調制御など、その研究分野の拡大が著しい。これらの議論の社会実装に向けては、技術横断的な設計・試作・評価環境が必要となり、関係機関も多岐に渡ることが想定されるため、国の主導の下での研究開発が望まれる。6G の立ち上がりを 2030 年度に控え、すでに ITU-R、3GPP では 6G システムの議論が令和 6 年度より開始されており、また、超高周波通信の通信機開発では我が国でも先進的な開発が進捗している。当該分野にて社会実装を早期に実現し、我が国のプレゼンスを十分に確保していくためにも、本年度からの優先的な研究開発の開始が求められる。

従来の通信端末にて超高周波帯(10～100GHz)をユーザーが負荷なく利活用できる環境を構築するには、通信端末における高精度な周波数制御と既存基地局の協調が重要となる。以下、これらに関して個別に詳述する。

(1) 端末側から見た課題

超高周波帯の通信端末の開発において、我が国は従来のシリコン CMOS 回路技術を用いたミリ波帯の送信機開発で世界をリードしている。一方で、当該通信アーキテクチャにおいて必要とされる局部発振器(Local Oscillator: LO)に関してはシリコン集積回路の進展だけで実現することは容易ではない。より具体的には、現在の水晶やセラミックベースの発信素子では LO の所望周波数帯への通倍処理において、低オフセット周波数の位相雑音の改善はシリコン集積回路の性能改善によって成し得るものの、高オフセット周波数領域のノイズフロアは通倍数に依存して決まり、使用周波数帯が上がるほど、性能劣化が顕著となる。特に、多値通信のシンボル数を決定する変調精度(Error Vector Magnitude: EVM)はこのノイズフロアに強い影響を受けるた

め、高多値通信をシームレスに超高周波帯に拡張しようとした場合、L0 としての安定性に加え、使用周波数帯近傍で直接発振する L0 構成を採用して通倍段を最小化し、高オフセット位相雑音のフロアを抑える設計が必要となる。したがって、従来の水晶発振器を前提とした L0 アーキテクチャでは、超高周波帯で要求される周波数安定度及び位相雑音特性の達成が難しく、高い安定度と GHz 帯での直接発振性を両立し得る新たな発振技術の導入が不可欠となる。

これにより、サブキャリア間干渉(Inter-Carrier Inter-ference: ICI)の抑制と EVM の改善を通じて、高い変調方式を安定して使え、受信側での補正(等化处理など)が正しく行えるようにするとともに、ガード設定の見直しやチャネル配置の高密度化による周波数資源の有効活用を後押しする。また、端末への実装を前提にすれば、小型化は不可欠である。

(2) 無線基地局側から見た課題

無線基地局に目を向けると、超高周波帯の利用は電波の直進性ゆえにシャドウイングやフェージングの影響が大きく、伝搬減衰への対策が不可欠となる。近年、この課題に対し、複数の基地局が協調して電波を送受信する協調型無線アクセス技術が注目されており、その中でも特に重要な応用例が分散 MIMO である。分散 MIMO では、複数基地局から端末に到来する波面(位相面)を高精度に整合させる必要があり、特に、10～100GHz 帯において十数度レベルの位相誤差を管理するには、ピコ秒オーダー時刻同期精度が不可欠となる。

更に、こうしたピコ秒級同期の必要性は分散 MIMO に特有のものではなく、協調型アクセス全般や、次世代無線の多様な応用に共通する基盤要件として重要性が増している。例えば、複数ノードで信号を協調形成する分散ビームフォーミング、基地局をレーダとして兼用する ISAC (Integrated Sensing and Communication)、UWB (Ultra-Wideband) や TDoA (Time Difference of Arrival) 方式を利用した高精度測位では、時間分解能が空間分解能を左右し、同期精度の向上が直接的に推定精度を引き上げる。また、低軌道衛星 (LEO) などを利用する非地上ネットワーク (NTN) においても、初期同期、ドップラ補償、ビーム指向制御などの場面で、基地局側の高精度クロックはシステム安定性の向上に寄与する。

このように、ピコ秒級同期は、分散 MIMO を中心に据えつつも、今後の複合型無線システム全体を支える基盤技術として位置付けられる。その一方で、この超高精度な同期状態を多数の基地局間でロバストかつハイレジリエントに維持するには、GNSS や網同期によるミリ秒～マイクロ秒オーダーのグローバル同期だけでは不十分である。端末が利用する基地局集合を状況に応じて限定・更新しながら、ローカルでの相対同期を適切に最適化する仕組みが求められる。

なお、伝搬減衰への対策としては、単一基地局に多数のアンテナ素子を搭載する Massive MIMO も成熟しており、基地局単体で高い指向性・スループットを達成できる。一方で Massive MIMO は、基地局間が広域にわたり協調動作する前提では設計されていないため、基地局間の位相整合や広域の協調ビーム形成は想定範囲外である。したがって、Massive MIMO は「単基地局の高度化」、分散 MIMO・分散ビームフォーミ

ング等は「複数基地局が連携する広域協調」という補完的な役割を担う。ここで議論する高精度同期は、この後者の広域協調型アクセスを支えるための基盤技術であり、Massive MIMO を否定するものではなく、将来の超高周波通信において両者を適材適所で組み合わせることが重要となる。

2. 政策的位置付け

- ・「科学技術・イノベーション基本計画」（令和3年3月26日閣議決定）

「国土全体に網の目のように張り巡らされた、省電力、高信頼、低遅延などの面でデータやAIの活用に適した次世代社会インフラを実現する」「更に、宇宙システム（測位・通信・観測等）、地理空間（G空間）情報、SINET、HPC（High-Performance Computing）を含む次世代コンピューティング技術のソフト・ハード面での開発・整備、量子技術、半導体、ポスト5GやBeyond 5Gの研究開発に取り組む」旨が記載されている。

- ・「統合イノベーション戦略 2025」（令和7年6月6日閣議決定）

「先端科学技術の戦略的な推進」、「知の基盤（研究力）と人材育成の強化」、「イノベーション・エコシステムの形成」の3つの基軸で取組を更に加速していき、Society 5.0の実現に向けてAI技術や量子技術の研究加速、5G・光ファイバ・非地上系ネットワーク（NTN）等のデジタルインフラ整備の加速、オール光ネットワーク技術の中核とする低遅延・高信頼・低消費電力な次世代情報通信基盤（Beyond5G）の令和12年頃の本格導入に向けた研究開発に取り組む旨が記載されている。

- ・「デジタル変革時代の電波政策懇談会 報告書」（令和3年8月、総務省）

デジタル変革時代における電波のインフラとしての重要性や、Society 5.0時代に向けた第5世代移動通信システム（5G）の商用サービスの早期普及、周波数有効利用技術の早期確立と国際標準化活動を進める必要がある旨記載されている。

- ・「周波数再編アクションプラン（令和7年度版）」（令和7年9月、総務省）

電波利用システムが国民の日常生活や我が国の社会経済活動における重要な基盤であり、移動通信トラフィック増加や新規の技術動向等に対応するため、新たな電波利用システムの周波数の確保、及び周波数の移行方策及び移行時期等について、周波数別に再編の方針、施策が記載されている。

3. 目標

通信端末のLOを高精度に維持するとともに、複数の基地局からの送受信タイミングの精度を究極的に高めるために、小型民生機器に搭載可能な小型原子時計と、それを活用して外部との有線及び無線を通じた時刻同期処理をロバストかつハイレジリ

メントに実現する技術開発を行う。対象周波数帯としては、近年、携帯電話サービスで活用され始めている 10～100 GHz の超高周波帯をカバーし、更に今後の活用が見込まれる数 100 GHz 帯を超える高速通信帯も意識する。以下にて超高周波帯を活用するための端末技術と無線基地局技術に分けて、開発目標を示す。

(1) 端末側における開発目標

機器の重要な構成要素である L0 に原子時計にて活用される周波数フィードバック制御による超高安定化技術を取り込み、変調精度改善と素子サイズの抑制を図る。更に、GHz 帯の原子共鳴周波数を原発振として外部出力することを目指して高安定高周波発振器の研究開発を実施する。具体的には、小型原子時計に集積回路等の技術と MEMS 技術とを駆使し、原子時計システムの小型化・低コスト化を実証するとともに、その標準化と規格化を推進する。

(2) 無線基地局側における開発目標

Beyond 5G 技術の一つである分散 MIMO 技術で提唱されている基地局間の同期と連携を活用し、信号強度の改善を図る。これにより、高周波化に伴う伝搬減衰の課題を克服し、総合的な周波数有効活用につなげる。また、高精度同期技術に関連し、移動時を含め、変化する通信環境下での更なる通信安定化、通信容量拡大、同期ネットワークの安定運用などを実現すべく、基地局側・端末側において近傍デバイスや GNSS、基地局などの複数の外部クロックとアンサンブル処理によるクロック安定化が可能な時刻同期モジュールの研究開発を実施する。ここで、アンサンブル処理に関しては、日本標準時の生成などで活用される加重平均アルゴリズムや修正型カルマンフィルタを活用したソフトウェア実装を想定し、最尤値での安定なクロック出力を目指す。

上記によって、端末の高周波動作可能な L0 の開発と、超高周波帯における減衰の克服が可能となれば、従来の携帯電話に利用される 800 MHz 帯から 3.5GHz 帯に対して、多値化のシンボル数や受信感度といった通信仕様を大幅に変更することなくシームレスに 100GHz まで周波数帯域を拡張することが可能となる。これにより、1～2 桁におよぶ利用周波数増大の利便性を利用者の実感として直接的に提供することが可能となる。なお、信号強度の改善が期待できる他の同等の技術についても可能性を模索していく。

4. 研究開発内容

(1) 概要

超高周波帯 (10～100GHz) を活用した高速大容量通信の利便性を利用者が効率的に享受するためには、超高周波帯での多重通信をポータブルに実現する回路素子技術が不可欠である。また、超高周波通信固有の弱点である電波減衰や直進性に起因するシャドウイングやフェージングの問題を克服する技術開発も重要である。そこで、以下の研究開発を行う。

(ア) 高安定高周波発振器の研究開発

(イ) システム間の高精度同期を実現する時刻同期モジュールの研究開発

(ア)では、超高周波通信の送受信チップにて、集積化の妨げとなっていた局部発振器を SIP(System in Package)レベルにて集積化することを目指し、当該送受信機のポータブル化に新たな道を拓く。また、(イ)では高安定発振器を活用し、外部クロックとの時刻同期を高精度に行い、同期状態を強固に保持する手法を開発する。ここで、(イ)にて使用する高安定発振器は既存の原子時計等も有効に活用する。これによって、(ア)の開発にベンチマークを与えるとともに、軽量・小型を必要としないユースシーンにも柔軟な対応を可能にする。

以上より、超高周波通信の弱点を補完し、多数の無線システム間で協調した通信を実現する。これらの技術開発は、超高周波帯(10~100GHz)を活用した高速大容量通信の実現に大きく貢献する。

(2) 技術課題及び到達目標

技術課題

ア 高安定高周波発振器の研究開発

高安定高周波発振器のコアとなるのは、原子時計に使用される原子の共鳴線へ高周波発振器の周波数をロックし、ドリフトのない安定した高周波発振器を実現することである。当該技術は標準時刻の生成・管理の用途から、宇宙・深海などの特殊環境での慣性センシングや、通信網の基地局や中継局での時間管理へと用途が拡張され、実装技術の進展とともに小型化が進捗してきた。しかしながら、今後の爆発的な発展が期待される無線接続を含む IoT デバイスへの応用に対して、現状の小型化トレンドでは要求仕様を捉えることができず、部品レベルからの量産・製造技術の整備が肝要となる。より具体的には、集積回路等の技術及び MEMS 技術を活用したウェハーレベルでの原子時計専用部品の作製と、それらの SIP(Sytem-in-Package)化が必要となる。また、現行技術をベースに SIP 化を進めても、今後の更なる小型化が進展した場合、キャッチアップに限界が生じることが危惧されるため、並行して、更なる高密度実装を意識した開発を適宜、進捗させなければならない。

上記に鑑み、以下の二つの研究開発を実施する。

ア-① 高安定高周波発振器の SIP 化に関する研究開発

高安定高周波発振器の小型化の鍵は、原子の共鳴線を取得するためにレーザ素子とガスセル、フォトディテクタとを一体化し、温度及び磁場を精緻に制御できるようにした物理パッケージの開発と、その高密度実装技術にある。本研究開発では、当該物理パッケージを集積回路等の技術と MEMS 技術とを駆使して超小型に実装する。

また、高安定高周波発振器の低消費電力化のキーとなるのが、原子時計の周波

数フィードバック制御及び内蔵発振器の集積回路等による回路の集積化である。本研究開発では、水晶発振器を活用した高周波発振器を基準周波数として活用する周波数制御回路を小型・低消費電力化する技術開発を進める。更に、MEMS 発振器のようなファンダメンタルの発振周波数自身が GHz となるような小型発振器を活用する先進的な原子時計用制御回路の提案・試作を実施する。

ア-② 高安定高周波発振器の新規小型技術の研究開発

ア-①では、小型化のキーは物理パッケージの高密度実装である旨を言及した。しかし、昨今の携帯電話の小型化と低背化、追加機能の拡充のトレンドを追従すべく、更なる低背化やシステムの簡略化を検討する。より具体的には物理パッケージの光学系の集積化や、新たな磁気制御手法の検討を進捗させる。

イ システム間の高精度同期を実現する時刻同期モジュールの研究開発

超高周波帯における伝搬特性を克服するため、協調型無線アクセス技術が注目されている。分散 MIMO はその代表的な応用例の一つであり、端末の見通しエリア内にある複数基地局を協調させて電波を送受信するアプローチである。超高周波通信固有の電波減衰やシャドウイング、フェージングといった課題に対して、分散 MIMO には以下の利点が指摘されており、超高周波通信での活用が期待される。

1. 多数(超多数)のアンテナの活用によるシャドウイングの低減。
2. 位相面をフィードバック制御で揃えた状態を保持しフェージングの影響を抑制。
3. 多数(超多数)のアンテナで協調して信号を強め合い、伝搬減衰を補完。

これらの協調型アクセス技術においては、各基地局からの波面（位相面）を十分に整合させることが重要であり、複数基地局から送信される搬送波の位相差を 15° 以下に抑えるには、10~100 GHz 帯でピコ秒オーダーの時刻同期が必要となる。一般に、この同期は基地局間の相互通信により伝搬遅延を補正することで達成される。

一方、車両内端末、ドローン、自動運転車両の無線制御など高速移動のユースケースでは、端末の見通し内で協調可能な基地局集合が連続的に変化し、その変化は移動速度に応じて顕著になる。このような環境では、固定的な基地局間相対同期のみに依存すると追従性が低下し、通信品質の劣化を招きやすい。これに対し、標準時刻を基準とした同期（共通の基準時刻にトレースされた同期）を用いれば、協調関係に新たな基地局が順次加わる場合でも、長大な平均化時間や過大な計算リソースを要せずに、よりロバストかつハイレジリエントに大規模な協調通信環境を維持できる。

無線を用いた時刻同期としては GNSS が広く活用されてきたが、今後は、光格子時計を一次標準とする光ファイバ網を介した高精度時刻配信に加え、LEO/MEO 衛星、UAV、HAPS 等、多様な時刻源の援用が見込まれる。複数の時刻源をアンサン

ブル処理してシステム内部で標準時刻を安定保持する技術は、外部クロックの安定度・信頼度の評価を可能にし、ジャミングやスプーフィングといった攻撃に対する耐性を高めつつ、協調型無線アクセス（その応用例としての分散 MIMO を含む）の運用性を向上させる基盤となる。

到達目標

ア 高安定高周波発振器の研究開発

ア-① 高安定高周波発振器の SIP 化に関する研究開発

下記性能を高安定高周波発振器の実機にて示す。

- ・ 周波数安定度 $<10^{-11}$
- ・ 発振周波数 >3 GHz
- ・ 発振器サイズ <10 cc
- ・ 消費電力 <45 mW

ア-② 高安定高周波発振器の新規小型技術の研究開発

評価システム上にて下記性能の目処を得る。

- ・ 周波数安定度 $<10^{-11}$
- ・ 発振周波数 >3 GHz
- ・ 発振器サイズ <1 cc
- ・ 消費電力 <10 mW

イ システム間の高精度同期を実現する時刻同期モジュールの研究開発

外部クロックとの同期性能

- ・ 搬送波位相差 $<15^\circ$ （ピコ秒オーダーの同期精度）
 - └ 搬送波周波数：10～100 GHz

実装を必要とする機能

- ・ 複数の外部クロックの評価機能
- ・ 複数の外部クロックのアンサンブル安定化機能

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、以下を想定している。

<令和8年度>

ア 高安定高周波発振器の設計検討

ア-①高安定高周波発振器の設計及び基礎試作

- ・ スペクトルの取得
- ・ 実機設計

ア-②新規実装技術の検討

- ・ 低背化技術の提案と検討項目の抽出
- ・ コイルの置き換え検討

イ 基礎機能の設計評価

- ・ 近接デバイスとの同期機能設計
- ・ 標準時刻 (GNSS, 通信網) との同期機能設計
- ・ 内部クロックによる外部クロックの安定度推定機能設計

<令和 9 年度>

ア 高安定高周波発振器の設計検討

ア-①制御モジュールの試作

- ・ 水晶発振器を活用した制御モジュールの試作
- ・ 集積型 MEMS 発振器を活用した制御モジュールの試作

ア-②新規実装技術の原理試作

イ 基礎機能の設計評価

- ・ 複数の同期機能を活用したアンサンブル機能設計
- ・ 内部クロックによる外部クロックの安定度推定機能設計実装実験

<令和 10 年度>

ア 高安定高周波発振器の試作検討

ア-①制御モジュールの改善試作

RF フロントエンドシステムへのシミュレーションによる組み込み検討

ア-②新規実装技術の原理検証とフィードバック設計

イ 基礎機能の集積評価と改善試作

通信システム (分散 MIMO 等) におけるフィールド試験の検討

<令和 11 年度>

ア 高安定高周波発振器の試作検討

ア-①制御モジュールのフィードバック改善試作

RF フロントエンドシステムへのシミュレーションによる組み込み検討

ア-②ア-①への組み込み検討

イ 基礎機能の集積評価と改善試作及びア-①の組み込み検討

通信システム (分散 MIMO 等) におけるフィールド試験の検討

5. 実施期間

令和 8 年度から令和 11 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、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 16 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、各主体の役割及び責務を含め、研究計画書の中にできるだけ具体的に記載すること。