

＜基本計画書＞

空間伝送型ワイヤレス電力伝送の干渉抑制・高度化技術に関する研究開発

1 目的

電波の送受信により電力を伝送する空間伝送型ワイヤレス電力伝送システム（WPT）は、配線が不要で多数の機器に給電が可能であるため、IoT センサ等の給電無線化ニーズ等の高まりを受け、920MHz 帯、2.4GHz 帯、5.7GHz 帯の各帯域を使用するシステムについて、屋内限定で使用可能とすることや出力制限等、一定の制約の下における技術的条件の答申（「空間伝送型ワイヤレス電力伝送システムの技術的条件」のうち「構内における空間伝送型ワイヤレス電力伝送システムの技術的条件」答申書（令和2年7月14日））を受け、制度化に向けて対応中である。

最近では、5G の高速・低遅延な無線通信技術を活用した多様なモバイル機器や、多数の IoT 向けセンサ等に給電可能な利用環境に制限のない WPT の実現に期待が高まっており、そのために用いるワイヤレス電力伝送技術についても現行システムより大容量化・多数化を図った給電方式に対応する必要がある。

WPT は通常の無線通信に比べて送信電力が大きく、従来技術のまま大容量化・多数化を実現しようとした場合、空間電力漏洩量が増大し他の無線局への干渉等が課題となる。他方で、他の無線システムの共存性を精緻に評価できないために、WPT の利用環境が過剰に制限されるといった課題もあり、これらの解決のためにはワイヤレス電力伝送技術の向上と共存性評価技術の精緻化が必要となる。

本研究開発では、モバイル機器や多数の IoT 接続デバイスへの屋内外における空間伝送型ワイヤレス給電に伴って生じうる他の無線システムに対する干渉問題を抑制し、干渉抑制・高度化技術を確立することで、周波数の有効利用に資することを目的とする。

2 政策的位置付け

- ・「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）」

「第3章 デジタル変革時代の電波有効利用方策」「1. デジタル変革時代に必要とされる無線システムの導入・普及」「(1) 5G・ローカル 5G などの普及・促進」

「④ワイヤレス電力伝送システムの普及・促進」において、「適切な電波利用環境を維持しつつ、屋内利用の状況や将来利用を見据え、屋内（人との共存範囲など）や屋外への利用拡大につながる、必要な技術開発や対応を推進する必要がある。」旨が記載されている。

- ・「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Ⅱ部 新型コロナウイルス感染症(COVID-19)による我が国の難局への対応」

の中の「3. デジタルトランスフォーメーション（DX）の推進と強靱で持続可能な社会・経済構造の構築 ～反転攻勢と社会変革～」において「③強靱で持続可能な社会・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。

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

「第 2 章 電波利用の将来像と実現方策」「3. 2030 年代の革新的な電波エコシステムの実現」において「2030 年頃までの【実現イメージ】」として、「ワイヤレス電力伝送（WPT）対応の自動車が普及し、家庭でも、家電等への WPT の利用が広がり、WPT が身近なものとなる。また、屋内外では、情報通信機器等に対し、短距離・小電力の空間伝送型 WPT による給電が可能となると思われる。」とされ、「空間伝送型の WPT については、距離が 10m 程度、電力が数 W 以上の電力伝送技術が開発されるものと考えられる。」旨が記載されている。

3 目標

給電能力を向上させた大容量・多数給電対応 WPT の使用時に、他の無線局に与える干渉レベルを抑制しつつ、WPT に係る周波数利用効率を 10 倍以上向上させ^{※1}、周波数の有効利用に資する。

研究開発の成果を国内制度化の検討に活かすとともに、国際標準化に向けた活動に早期に着手することで、我が国の国際競争力の強化を図る。

4 研究開発内容

(1) 概要

大容量・多数給電に対応した WPT の本格的利用に当たり、適切な電波環境を維持しつつ実現できるよう、以下の 3 技術課題に取り組む。

ア 新たな高周波数帯を活用した電力伝送効率化技術

(a) 高出力鋭角ビームの送信技術

(b) 5G 準ミリ波との共用化技術

イ 空間環境に応じた多数デバイス給電制御技術

(a) MAC 層的アクセス技術

(b) 漏洩電力量最小化技術

^{※1} 現行の WPT と比較したときに、他の無線システムとの共用条件を満たした上で、WPT の給電能力（時間当たり給電量）を 10 倍以上に向上する。技術課題ア、イ、ウにより、給電の大容量化・多数化、送電スケジューリング等の向上により達成するものとする。また、本研究開発で新たに検討する 24GHz 帯 WPT についての給電能力は、WPT（2.4GHz 帯、5.7GHz 帯）と比較するものとする。

ウ 共存性評価技術

- (a) 共存性評価に係る基盤データの整備
- (b) 干渉評価システム技術

(2) 技術課題及び到達目標

技術課題

ア 新たな高周波数帯を活用した電力伝送効率化技術

現行の WPT の使用が想定される周波数帯(920MHz 帯、2.4GHz 帯、5.7GHz 帯)では、既に無線 LAN をはじめとした多数の無線システムが普及しており、一般的な無線通信に比べて送信電力が大きい WPT においては、既存の他無線システムへの電波干渉問題の観点から利用の制約が大きい。5G の進展に伴い期待されるモバイル機器への給電ニーズに対応するためには、低消費電力のセンサへの給電を想定している現状システムと比べて大幅な給電能力の向上が必要である。

このような状況において、以下の観点による対応が有効と考える。

- ・他の無線システムによる利用が少ない新たな高周波数帯を活用することで、他の無線システムに対する電波干渉問題を抑制する。
- ・大幅な給電能力の向上と意図しない方向への漏洩電力を低減するため、ビームフォーミングの鋭角化を図る。その際に、電波特性としてビームフォーミングの鋭角化に有利な高周波数帯を活用する。

したがって、本課題では 24GHz を中心とした準ミリ波帯を対象として、ビームフォーミングの鋭角化が可能な、新たな高周波数帯(準ミリ波)の送電用デバイスを開発し、送信側と受信側 1 対 1 の電力伝送の効率を向上させる技術を開発する。24GHz 帯は、既制度化周波数帯より高周波数帯のためビームをより一層鋭角化することが可能であり、到達範囲を相対的に絞ることが可能であることから、屋内だけではなく屋外での利用も想定し、研究開発を行う。

5G の進展に伴いニーズが高まるモバイル機器への給電において、準ミリ波帯送電アンテナと 5G 基地局アンテナを共用化することで、電波発射を一体的に制御することで干渉低減が効率的に図られ、加えて、アンテナ設置が効率化され利便性が向上することから、5G 準ミリ波との共用化技術を開発する。

(a) 高出力鋭角ビームの送信技術

新たな周波数帯利用を視野に入れて、高出力鋭角ビームの送信機を開発し、数 W クラスの WPT の実現を図る。

(b) 5G 準ミリ波との共用化技術

24GHz を中心とした準ミリ波帯送電アンテナと 5G 基地局アンテナを共用

化し、高電力となる給電システムから 5G 通信への干渉低減を図る。

イ 空間環境に応じた多数デバイス給電制御技術

5G の進展に伴い、多様なモバイル機器や多数の IoT センサが普及しつつあり、特に IoT 向け産業用センサ市場は急速な拡大が見込まれている。その中で、モバイル機器や IoT センサへのワイヤレス給電が期待されており、WPT 送電装置に対して、多数のデバイスに給電するケースが想定される。

給電の大容量化・多数化に対して、一般的な無線通信に比べて送信電力が大きい WPT においては、他の無線システムに影響を与える漏洩電力を抑制することが実利用において重要となる。

したがって、本課題では 920MHz 帯、2.4GHz 帯、5.7GHz 帯およびアで開発する 24GHz を中心とした準ミリ波帯を対象として、多様なモバイル機器や多数の IoT センサ等の給電タイミングやビーム方向等を適切に制御することで、給電時間割合を向上させ、給電の大容量化・多数化に対して必要送信出力の増大を抑制させるとともに漏洩電力量の最小化を実現する。

(a) MAC 層的アクセス技術

多種多様なマルチデバイスを適切に送電スケジューリングするための標準的な WPT アクセス制御プロトコルを開発する。

(b) 漏洩電力量最小化技術

空間環境に応じてビーム方向や空間電力およびタイミング等を調整し、特定空間への漏洩電力の影響を最小化するために必要な技術を開発する。

また、課題ウとの連携により効率的な研究開発を目指す。

ウ 共存性評価技術

一般的な無線通信に比べて送信電力が大きい WPT においては、他の無線局システムとの共存、与干渉の適切な評価が課題としてあげられており、WPT の実用化において評価技術は必須となる。

したがって、本課題では他の無線システムへの与干渉を適切に評価する共存性評価技術を確立し、他者が管理する無線システムとの離隔距離を適切に設定することで、空間的稠密化を向上させる。

(a) 共存性評価に係る基盤データの整備

建築資材の電波の透過・反射特性等に関するデータや建物・構造物特性に関する基礎データについて、実測等を含め収集・整備・公開し、運用調整に活用する。

(b) 干渉評価システム技術

上記の基盤データを活用し、屋外等のエリア外の電波強度を予測し、他の無線システムと共用可能な要件（出力、離隔、時間等）を解析することが可能なシステムを開発する。

到達目標

ア 新たな高周波数帯を活用した電力伝送効率化技術

(a) 高出力鋭角ビームの送信技術

5G 基地局よりも多素子の高出力鋭角ビームフォーミング技術を確立する。WPT エリアを局所化し漏洩電力量を抑制する。高周波利用による送受電機小型化により、ロボット・EV 等の移動体への搭載を想定して、バッテリーを搭載した可搬型送信システムも実現する。

開発の方向性は、国内外の技術開発動向や製品化動向を踏まえ、新たな周波数帯利用として有効な準ミリ波高周波数帯の候補を選定し、その候補となる周波数帯についてのデバイス（ビームフォーミング IC）開発を実施する。ビームフォーミング IC 内の増幅器密集配置に伴って発生する排熱問題に対応した設計を実現し、実際の利用環境においての給電効率の低下を抑制させる。

(b) 5G 準ミリ波との共用化技術

新たな周波数帯利用を視野に入れた準ミリ波高周波数帯の送電局と 5G 基地局との共用アンテナを開発し、以下の研究開発により 5G 通信と WPT との干渉影響の抑制を実現する。

開発の方向性は、5G 通信アンテナと WPT 送信アンテナについて、素子の共通化も視野に入れ、アンテナ素子配列、偏波間結合などの最適化を行い、干渉抑制効果を高める。

現状の WPT が想定する受電装置の動作必要電力は 2.4GHz や 5.7GHz 帯において数 mW ~ 2W 程度のところ、これら二つの技術を確立することで、24GHz を中心とした準ミリ波帯において、USB Type-C によるスマートフォン充電と同程度の動作必要電力（7.5W 程度）を実現する給電能力を目指す。

イ 空間環境に応じた多数デバイス給電制御技術

(a) MAC 層的アクセス制御技術

多数端末を端末属性、充電量、位置、利用可能周波数帯等に応じて、多種多様なマルチデバイス給電を適切にスケジューリングするための WPT アクセス制御プロトコルを開発し、5G もしくは既存無線通信システムと連携さ

せ、給電効率の高い多数デバイス給電制御を実現する。また、有人環境に対応するため、WPT から発射される電波と人の存在状況等を空間的・時間的に精緻に評価し、電波防護指針によって定められている指針値以下となるよう給電制御を行い、給電時間割合を向上させる。

開発の方向性は、WPT として、多数デバイスに給電を行う場合に必須となる、無線通信システムの MAC 層での制御に相当する送電制御（アクセス制御）技術を世界に先駆けて実現する。第一段階としては、既存の遮断回避技術等を活用してビーム遮蔽物状況や他無線システムの配置状況（メインビームからの離隔角度）を元に、ビーム幅、サイドローブ特性、ヌル深度などアンテナ性能を考慮した上で、WPT 送電可否判断基準を明確化する。次段階としては、多数の受電端末の位置、端末属性（必要電力、優先度など）、電池残量、利用可能周波数帯等に応じて、電力伝送効率やユーザメリットを最大化する送電スケジューリングなどを行うためのプロトコルを確立する。最終的には、シミュレーションにより、開発したプロトコルの検証を行う。

また、社会実装するためには、高電力な WPT の人体への安全性をどのように保障にできるのかが重要であることから、WPT の電波の人体への放射が電波防護指針値以下となることの担保方法や検証方法についても研究を行う。

(b) 漏洩電力量最小化技術

建築資材の電波の透過・吸収・反射特性等のデータに加え、空間における電波強度を位置と時間の属性とともにモニタリングする仕組みを開発し、把握された空間環境に応じて、ビーム方向や送信電力等を調整し、特定空間への漏洩電力の影響の最小化を実現可能にする。建築資材の電波の透過・吸収・反射特性等による干渉対策技術についても研究開発を行う。

開発の方向性は、人物や機器などのパラメータも含めたモデリングを行うとともにデータ分析を行い、データ分析の成果は研究課題ウ(a)の干渉評価技術に活用する。

これら二つの技術を確立することで、920MHz 帯、2.4GHz 帯、5.7GHz 帯およびアで開発する 24GHz を中心とした準ミリ波帯において、送信装置 1 台当たりモバイル機器 10 台又は、IoT センサ等 50 個以上が存在する環境での給電時間割合について現状 20%程度から 80%程度に向上させる。

ウ 共存性評価技術

(a) 共存性評価に係る基盤データ整備

シミュレーション評価、共存制御技術での利用を想定し、建築資材の電波の透過・反射特性等に関するデータや建物・構造物特性に関する基礎データを実測し、収集したデータの公開・整備を行う。なお、典型的な利用環境を想定したデータ実測を行うものとする。

(b) 干渉評価システム技術

研究課題イ(b)の漏洩電力量最小化技術を用いたデータ分析結果及び研究課題ウ(a)の基盤データを活用し、屋外等のエリア外の電波強度を予測し、他の無線システムと共用可能な要件（出力、離隔、時間等）を解析することが可能なシステムを開発する。

開発の方向性は、共存すべき無線システムを想定した上で、与干渉・被干渉モデル等をシミュレーションに取り入れ、先に示した技術開発とも連携し、開発技術と本システム間での双方のフィードバックにより精度の向上を図る。

ウ (a) (b)二つの技術を確立し、シミュレーションにより共用可能要件（出力、離隔、時間等）の精緻化を実現するとともに、ア、イの技術を取り込み共用可能要件の緩和について実証を交えて検証を行う。

また、公共建築工事標準仕様書（建築工事編）に記載されている、天井及び壁の仕上げに用いられる代表的なボード類を中心に 15 種類以上の材料について、工法による違いも考慮してデータベースを作成するとともに、データを実測しデータベースとして公開・整備すべき材料の最適数についての検討も併せて行う。データベースの整備においては、実環境における建築構造を想定し、データベースに資するための電気定数に関して検討を行うとともに、WPT 送信アンテナの設置位置や WPT 送信アンテナ近傍の建築部材等の影響に配慮し解析を行う。また、屋外等への電波漏洩の解析については、建築外壁との距離をパラメータとしたシミュレーションや実測等を行うなど、共用可能な要件を分析するために必要なデータを取得する。

課題ア、イ、ウを連携して研究開発することで、全体目標である「WPT に係る周波数利用効率を 10 倍以上向上」を達成するものとする。どのように全体目標を達成するかについても提案書に記載すること。また、成果が明らかになるように、テストサイトの伝搬環境の考え方も提案書に記載すること。

また、課題ア、イ、ウのそれぞれの成果を活用し合うなど連携させて、効率的・効果的な研究開発を行うこと。

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4年度>

ア 新たな高周波数帯を活用した電力伝送効率化技術

(a) 高出力鋭角ビームの送信技術

高出力鋭角ビームの送信機を開発するための基本設計及び IC 一次試作

(b) 5G 準ミリ波との共用化技術

24GHz を中心とした準ミリ波帯送電アンテナと 5G 基地局アンテナ共用化のための機器試作シミュレーション

イ 空間環境に応じた多数デバイス給電制御技術

(a) MAC 層的アクセス技術の開発

多種多様なマルチデバイスを適切に送電スケジューリングするための標準的な WPT アクセスのための基本設計の開発

(b) 漏洩電力量最小化技術

空間環境に応じてビーム方向や送信電力等を調整し、特定空間への漏洩電力の影響量を最小化するために必要な技術の開発

ウ 共存性評価技術

漏洩電力量評価技術一次試作

建築建材電波特性評価環境構築

建物・構造物特性評価環境構築

<令和5年度>

ア 新たな高周波数帯を活用した電力伝送効率化技術

(a) 高出力鋭角ビームの送信技術

一次試作結果の評価と課題整理による二次試作

(b) 5G 準ミリ波との共用化技術

共用アンテナの試作を実施し、アンテナ単体での共用化技術の評価

イ 空間環境に応じた多数デバイス給電制御技術

(a) MAC 層的アクセス技術の開発

アクセスプロトコルの設計とシミュレーション評価

(b) 漏洩電力量最小化技術の開発

一次実装

ウ 共存性評価技術

漏洩電力量評価技術の評価と二次試作
建築建材電波特性基礎評価
建物・構造物特性基礎評価

<令和6年度>

ア 新たな高周波数帯を活用した電力伝送効率化技術

- (a) 高出力鋭角ビームの送信技術
- (b) 5G準ミリ波との共用化技術

両課題を通じて、共用アンテナ等の試作改良を実施する。

イ 空間環境に応じた多数デバイス給電制御技術

アクセスプロトコルの設計

ウ 共存性評価技術

漏洩電力量評価技術の二次試作の改良と最終設計
建築建材電波特性データ収集
建物・構造物特性データ収集

<令和7年度>

ア 新たな高周波数帯を活用した電力伝送効率化技術

システム統合・実証実験

イ 空間環境に応じた多数デバイス給電制御技術

プロトコル検証・システム統合・実証実験

ウ 共存性評価技術

漏洩電力量評価技術のシステム統合・実証実験
建物・構造物特性データベースの作成

5 実施期間

令和4年度から令和7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12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。

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ともに、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の説明等を行うこと。

④ 研究開発成果のオープンな利用促進

本研究開発成果が広く一般に利用されるために、可能な限り特定の機器及び技術への依存を排除し、基礎的な技術については容易に利用可能な技術を採用することを検討すること。

(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＞

周波数資源の有効活用に向けた高精度時刻同期基盤の研究開発

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、通信量もさらに爆発的に増大することが危惧される。このことから、各エッジ機器や端末間でメッシュネットワークを構成する分散管理が進むことが見込まれる。また、電波利用のニーズの拡大や多様化などを踏まえ、2025 年度末までに新たに約 16GHz 幅、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、このような状況では周波数資源の逼迫は避けられない課題となっている。しかし、単純な周波数帯域の拡充だけでは、帯域を個々のデバイスで管理するため、各デバイスに搭載されるアンテナやフィルタ等が増加し、小型端末のボード面積が増大していく課題がある。

そこで、周波数資源の活用を時間軸や空間軸の観点から見直すことで、断続的な通信途絶からの復帰等において逐一実行される同期処理等を抑制・削除することや、端末間の時刻同期精度を向上することで位置同定の精度を向上させ、高指向性の電波送信技術と組み合わせることで、空間的多重度を高め、一部の端末が占有する周波数帯域を最小限に抑制することにより、周波数資源を有効利用することが可能となる。

これらを実現するためには、無線ネットワークの時刻同期精度の大幅な改善が必要不可欠である。そのためには、多くの通信ノードや小型民生機器を含む IoT デバイスが原子時計を搭載できる環境を整えるとともに、原子時計の搭載が困難な端末へも、ネットワーク内の原子時計搭載端末と連携させ、原子時計と同程度の精度の時刻推定を可能にするアルゴリズムを開発する必要がある。

5G 又は Beyond 5G 実現後の社会においては、ドローン制御や自動運転をはじめ、長期的には無人工場や無人港湾の管理など、各センサーや端末間で位置データ・高解像度画像等のデータをリアルタイムに処理する必要のあるユースケースの実現が見込まれている。さらに、世界各国も近年、小型原子時計の通信用民生展開に関心を寄せてきており、国際競争力確保に資する基盤技術を確立するためにも、上記システムを実現する取組は急務である。

そこで、本研究開発では、小型民生機器に搭載可能な小型原子時計と、それを活用し近距離通信において各端末で時刻情報を高精度に同期・管理する時刻同期基盤（以下「高精度時刻同期基盤」という。）を確立するとともに、さらに、端末の位置情報を正確に把握するための時空間座標情報基盤を実現する多点測位システムを

確立する研究開発を行う。これにより、各端末の時刻同期精度・位置精度を向上させ、時間軸や空間軸での利用効率を向上させることで周波数資源の有効利用を促進することを旨とする。

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」「さらに、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 2021」（令和3年6月18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」「さらに、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」ことについて、「事業を着実に実施する」旨が記載されている。

- ・「電波政策 2020 懇談会報告書」（平成28年7月、総務省）

「次世代モバイルサービス実現」を見据えた環境整備として「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」旨が記載されている。

3. 目標

周波数資源の逼迫を解消するために端末の周波数を極めて高精度に維持するとともに、通信するタイミングの精度を究極的に高めることを目標として、小型民生機器に搭載可能な小型原子時計と、それを活用して高精度時刻同期基盤及び端末の位置情報を正確に把握する多点測位システムを確立する。なお、対象周波数帯としては携帯電話サービスで活用される800 MHz帯から5 GHz帯をカバーし、さらに今後の活用が見込まれる数10 GHz帯を超える高周波数帯にも対応する。

具体的には、将来的に小型民生機器が原子時計を搭載できる環境を目指し、小型原子時計を半導体プロセスでの生産で実現する技術を確立することで、原子時計の小型化・低コスト化の道筋をつけ、併せて標準化や規格化を図る。また、原子時計搭載／非搭載端末の混在環境において原子時計と同程度の時刻精度（周波数安定度 10×10^{-11} ）を実現するアルゴリズムや時刻周波数比較機能を有する有無線モジュールの開発・実装を実施し、実機検証を行う。

GNSSは数十ナノ秒オーダーの時刻精度であるが、ネットワーク内の原子時計搭載

端末を連携し管理するためには、数時間程度にわたって時刻比較が必要であり実用的ではない。また、現在一般的に基地局間の同期で使われる PTP (Precision Time Protocol) においても、時刻同期精度はマイクロ秒程度であり、現在の有無線ネットワークにおいて複数の原子時計を管理運用するには精度が不十分である。そこで、本研究開発により、GNSS に依らない環境下でも従来の基地局同期 (PTP) レベルと比べて 1/100 の数十ナノ秒オーダーの時刻精度を無線端末においても実現する。これにより、同期処理のための実際の通信に付帯するオーバーヘッドを削減するとともに、高度な通信スケジューリングを容易にする。また、原子時計の持つ 3.4 GHz 帯での低位相雑音かつ高安定な周波数基準信号を活用し、従来の水晶発振器を用いた場合と比較して符号誤り率 (BER) を 1/100 に改善し QAM 多値化を加速する。これら高度な通信スケジューリングや QAM 多値化などにより、周波数利用効率 (実効的なスループット) を 2 倍以上改善する。

さらに、GNSS による測位と比べて 1 秒積算の位置同定の精度を 100 倍に高めることによって、送信アンテナの協調制御やビームフォーミング技術と組み合わせ、空間多重通信を革新する。これによって、周波数利用効率 (実効的なスループット) を 3 倍以上改善する。

これらの改善によって、周波数資源の有効活用 (上記の周波数利用効率を掛け合わせると合計で 6 倍以上改善) に資することを目標とする。

4. 研究開発内容

(1) 概要

本研究開発では、小型民生機器に搭載可能な小型原子時計と、それを活用して高精度時刻同期基盤及び多点測位システムを確立するため、以下 2 件の研究開発を行う。

【小型で安価な高精度周波数基準実現のための研究開発】

極めて高精度に原子スペクトルを捉える原子時計について、高精度な周波数安定度を維持しつつ小型化・低消費電力化することを目指し、半導体微細加工技術を活用したバッチ生産可能な手法を用いて仕様を満たす構成部品の研究開発を行う。半導体チップとして生産可能な小型原子時計の実現を目指し、構成部品を擦り合わせ評価する装置の研究開発も、標準化を見据えて実施する。

【高精度な時刻同期プロトコル実現のための研究開発】

高精度時刻同期基盤の確立を目的として、端末から生成される時刻周波数情報を管理・運用するためのアルゴリズムの研究開発を行う。また、研究開発したアルゴリズムを実証するための有無線モジュールを研究開発する。具体的には、小型原子時計と高精度時刻・周波数比較装置を搭載した通信機器を研究開発する。その通信機器を用いて有無線混在のネットワーク環境を想定した環境を構築し検証実験を実施する。

また、シミュレーション・実環境での実証実験を通じて、上記の高精度時刻同期基盤を活用して複数ノードの時刻同期により位置情報を特定する多点測位システムの研究開発を実施する。

本研究開発では、小型原子時計を通信ネットワークの中での利用用途を明確にするものであり、従来標準時刻生成など限定的な用途で用いられていた小型原子時計の高精度な時刻を多くのユーザーが享受できるようになるものである。これにより、将来的な市場拡大を見込むことができ、先行的に研究開発を行うことにより、標準化推進・国際的競争力の強化へとつなげる。

なお、各課題間の整合性を図り、課題の着実な進捗管理を実施するため、互いの成果を随時反映し合う形で進めていくことを想定する。

(2) 技術課題および到達目標

技術課題

【小型で安価な高精度周波数基準実現のための研究開発】

ア 原子時計主要構成部品の小型化の研究開発

原子時計は国家による標準時刻の生成・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んだ。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はできず、部品レベル・材料レベルからの技術革新が必須となる。より具体的には、半導体微細加工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、専用の特殊材料の研究開発が求められる。

上記を踏まえ、下記の要素技術の研究開発を実施する。

ア—① ガスセル量産化に向けた研究開発

ルビジウム原子ガスを内包するガスセルをウェハーレベルでバッチ生産する技術の研究開発を行う。

ア—② 可変波長レーザー素子の研究開発

ルビジウム原子の共鳴線取得に特化した波長のレーザー素子の研究開発と、波長の製造バラツキを抑制する機構の研究開発を行う。

ア—③ GHz 帯超小型発振器の研究開発

ルビジウム原子より CPT (Coherent Population Trapping) 共鳴を取得するために発振周波数が最適化された超小型の高周波発振器の研究開発を行う。

イ 原子時計評価システムの研究開発

原子時計は量子的な共鳴現象と高周波回路とを同調させる制御システムであるため、システムを構成する部品には精緻な擦り合わせ評価が必須である。しかしながら、このような評価を行う既存装置はなく、技術者が個々に評価系を構築する必要があった。特に、アの研究開発のように、原子時計用の構成部品を生産することを踏まえると、統一された評価規格と評価装置が必要となる。また、原子時計の性能指数に用いられる周波数安定度の評価には十分に長い計測時間を要することから、研究開発される装置には並列評価の実装も必要となる。

【高精度な時刻同期プロトコル実現のための研究開発】

ウ 小型原子時計を搭載した有無線時刻・周波数同期技術の研究開発

ウ—① 原子時計による時刻管理のためのアルゴリズムの研究開発

原子時計は高精度な周波数標準ではあるが、起動直後に時刻への同期が必要である。この原子時計に正確な時刻を供給して同期するためには時刻比較の精度は原子時計の周波数精度より十分に高い必要があり、原子時計を有効に活用するには、同期処理に活用されるネットワーク内の時刻情報が適切に管理されていなければならない。この時刻管理において、安定性と信頼性を担保しつつ高安定な時刻を供給するために、以下の三つのアルゴリズムを研究開発し、連動させることが必要である。

・時刻生成アルゴリズム

絶対的な時刻基準が存在しないネットワークにて、ネットワークを構成する通信ノード間の時刻・周波数比較から最尤な時刻を推定し生成するアルゴリズムの研究開発を行う。

・時刻供給アルゴリズム

ネットワークから時刻精度を高精度に供給するため、時刻同期の頻度および時刻情報の頒布ルートを決々の通信ノードの周波数精度に応じて最適化するアルゴリズムの研究開発を行う。

・異常（アノマリー）検知アルゴリズム

ネットワーク内の時刻情報を安定に維持するため、時刻・周波数情報を統計的に処理し原子時計の時刻生成の異常（アノマリー）を検知するアルゴリズムの研究開発を行う。

上記のアルゴリズムは、実用の観点から高速に実行できることが望ましく、1秒以下の周期で実行できることが望ましい。また、これらアルゴリズムの動作を実環境に則してシミュレーションすることも重要である。当該シミュレーションによって、アルゴリズムの定量的な評価とともに最適なネットワーク構成の明確化が可能となる。

ウ—② 小型原子時計を搭載した有無線モジュールの研究開発

原子時計の高精度な周波数精度をネットワークの時刻生成に有効活用するには、有無線モジュールは、通信ノードに搭載される汎用の通信モジュールに高精度な時刻周波数比較機能を実装する必要がある。具体的には、 10^{-11} 前半の比較精度を短い処理時間で獲得するため、位相レベルの比較が可能な専用ハードウェアの研究開発が必須となる。また、時刻周波数比較機能の実装は、高い拡張性を実現するため、有線と無線でのクロック伝送方式の差に対応することも重要となる。

エ 多点測位システムの研究開発

アおよびウで研究開発された原子時計及び高精度時刻同期基盤により、通信ノードの時空間座標を高精度に特定する多点測位が可能となる。より具体的には、電波の伝搬時間や位相・周波数情報など、複数の基準点や通信ノードから得られる情報を統合して処理することで高精細な位置同定を実現する。これは、トンネルや室内、アーバン・キャニオン環境といった、衛星からのGNSS信号が到達できない環境下でも有効活用が期待される。さらに、得られた位置情報を世界測地系に結合することができれば、様々な分野への応用展開も見込まれる。

到達目標

【小型で安価な高精度周波数基準実現のための研究開発】

ア 原子時計主要構成部品の小型化の研究開発

- ・本研究期間中に研究開発する原子時計については、正確かつ安定した時刻精度を確保するために周波数安定度 10×10^{-11} としつつ、サイズ 10cc、消費電力 45mW の小型化・低消費電力化を進める。この目標を実現するためには、半導体プロセスでの小型原子時計の実現が必要であり、半導体プロセスでの実現に向けた各構成部品の目標を下記のように定める。なお、半導体プロセスの適用は、将来の更なる小型化を企図する上でも重要となる。

ア—① ガスセル量産化に向けた研究開発

ガスセルをウェハーレベルで製作する際に課題となるガス状ルビジウム原子の固体ソースの研究開発を実施する。さらに、固体ソースの反応生成物への吸着によるガス組成の長期変動を抑制する技術の研究開発を行い、原子時計の長期的な周波数安定度を改善する。

ア—② 可変波長レーザー素子の研究開発

ルビジウム原子の共鳴線取得に特化した波長のレーザー素子の研究開発を行う。より具体的には、出力 $100 \mu\text{W}$ 以上、中心波長 794.98 nm、線幅（半値全幅）100MHz 以下のレーザー発振を実現する。

さらに低価格化の手段として、製造バラツキを抑制するとともに、従来の電流や熱による波長制御機構以外に波長を制御する機構を実装する。

ア—③ GHz 帯超小型発振器の研究開発

ルビジウム原子の共鳴線取得に特化した超小型高周波発振器の研究開発を実施する。より具体的には、3.417GHz での発振が可能であり、常に共鳴線を捕捉するためにフィードバック用の電圧制御端子を備え、別表 1 の位相雑音を実現する。また、消費電力を 5.0mW 以下に抑制し、発振出力は -6 dBm 以上とする。

セラミックパッケージなどを用いて、1 チップ化を実現し、3 mm × 3 mm × 1 mm 以下を実現し、70°C ~ 120°C の高温帯での発振動作を確認する。

別表 1. オフセット周波数と目標位相雑音

オフセット周波数	10kHz	100kHz	1 MHz	10MHz
位相雑音	<-100dBc/Hz	<-120dBc/Hz	<-140dBc/Hz	<-140dBc/Hz

イ 原子時計評価システムの研究開発

- ・ ガラス管を用いた標準的なルビジウム原子のガスセルを用いて、ルビジウム原子の共鳴スペクトルを測定し、当該スペクトルを用いて外部の高周波発振装置の周波数を安定化（原子時計動作）するシステムを実現する。ここで安定化の基準として、積算時間 1 秒での短期周波数安定度を 3×10^{-11} 以下を実現する。
- ・ 評価の高速化を目的として、上記システムに並列同時評価を実装する。より具体的には、ガスセルを複数並列で評価可能な構成を実装する。
- ・ 原子時計の個々の構成部品（レーザ素子や高周波発振器等）の性能が原子時計としての安定性に及ぼす影響を定量的に評価するため、これら構成部品を効率的に付け替えられる装置構成を実装する。
- ・ 上記の研究開発の過程において、計測手順、評価手順を確立し規格化・標準化を実施する。

【高精度な時刻同期プロトコル実現のための研究開発】

ウ 小型原子時計を利用した有無線時刻・周波数同期技術の研究開発

ウ—① 原子時計による時刻管理のためのアルゴリズムの研究開発

- ・ ネットワーク内の複数の原子時計の時刻生成精度を同定しつつ時刻推定する時刻生成アルゴリズムの研究開発を行う。
- ・ 原子時計を搭載した通信ノードと非搭載の通信ノードが混在するネットワークにおいて、数十ナノ秒オーダーの時刻同期精度を実現する手段と時刻供給アルゴリズムの研究開発を行う。

- ・通信ネットワークで原子時計の時刻生成のアノマリーを検出し、時刻推定に与える誤差を低減する異常検知アルゴリズムの研究開発を行う。
- ・開発したアルゴリズムを通信ノードに実装したときの時刻同期精度を、シミュレーターを用いて評価し、理論的な整合性を検証する。

ウ—② 小型原子時計を搭載した有無線モジュールの研究開発

- ・有無線モジュールについて、有線接続におけるノード間の時刻の比較精度を1秒積算で 10^{-11} 前半以下、さらに比較確度で0.1ナノ秒以下に抑制する。同様に無線接続における当該比較精度を 10^{-11} 前半以下、さらに比較確度で数ナノ秒以下に抑制する。また、有線ノードと無線ノード間の時刻の比較精度を1秒積算で 10^{-11} 前半以下、比較確度で数ナノ秒以下に抑制する。
- ・小型原子時計が搭載／非搭載の有無線モジュールを複数台作製し、ウ—①のアルゴリズムを実装してネットワーク化したときの実証評価を行う。
- ・原子時計による時刻および周波数の高精度な制御技術の評価・活用し、有効な通信方式を検討（例えばミリ波帯で1024QAM相当など）、実効的なスループットの2倍以上の向上を示す。

エ 多点測位システムの研究開発

- ・小型原子時計を搭載した端末において、位置精度を10cm以下とする高精度な測位を1秒以内の高速で得られる測位システムを実現する。
- ・得られた位置情報は世界測地系との変換を可能にする。
- ・小型原子時計による時刻および周波数の高精度な時刻同期技術や多点測位システムの高精度な位置情報を、ビームフォーミング技術や分散MIMO等の空間多重技術に適用する。これにより電波伝搬環境を改善し、実効的なスループットの3倍以上の向上を示す。

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4年度>

【小型で安価な高精度周波数基準実現のための研究開発】

ア 原子時計主要構成部品の小型化の研究開発

- ・ウェハーレベルでのガスセル生産化の基礎検討
- ・波長可変レーザー素子の研究開発
- ・発振器の研究開発

イ 原子時計評価システムの研究開発

- ・原子時計評価装置の研究開発

【高精度な時刻同期プロトコル実現のための研究開発】

ウ 小型原子時計を搭載した有無線時刻・周波数同期技術の研究開発

- ・静的環境下でのアルゴリズム研究開発
- ・シミュレーション環境整備
- ・有無線モジュールの設計、試作

エ 多点測位システムの研究開発

- ・多点測位システムの開発環境構築

<令和5年度>

【小型で安価な高精度周波数基準実現のための研究開発】

ア 原子時計主要構成部品の小型化の研究開発

- ・ウェハーレベルでのガスセルの研究開発
- ・波長可変レーザー素子の研究開発
- ・発振器の研究開発

イ 原子時計評価システムの研究開発

- ・原子時計評価装置の研究開発と評価手順の確立

【高精度な時刻同期プロトコル実現のための研究開発】

ウ 小型原子時計を搭載した有無線時刻・周波数同期技術の研究開発

- ・静的環境下でのアルゴリズム研究開発
- ・シミュレーション環境構築、検証
- ・有無線モジュールの設計、試作

エ 多点測位システムの研究開発

- ・多点測位システムの研究開発

<令和6年度>

【小型で安価な高精度周波数基準実現のための研究開発】

ア 原子時計主要構成部品の小型化の研究開発

- ・ガスセル／波長可変レーザー等のパッケージの研究開発
- ・原子時計自律動作の検証(発振器の組込)

イ 原子時計評価システムの研究開発

- ・原子時計評価装置への並列計測の実装

【高精度な時刻同期プロトコル実現のための研究開発】

- ウ 小型原子時計を搭載した有無線時刻・周波数同期技術の研究開発
 - ・動的環境下でのアルゴリズム研究開発、実装
 - ・シミュレーションによる評価検証
 - ・有無線モジュールの作製
 - ・実証実験環境及び設備の整備

- エ 多点測位システムの研究開発
 - ・多点測位システムの検証
 - ・空間多重（ビームフォーミング技術等）の活用によるスループット改善のための実証実験環境及び設備の整備

<令和7年度>

【小型で安価な高精度周波数基準実現のための研究開発】

- ア 原子時計主要構成部品の小型化の研究開発
 - ・開発した小型部品を活用した原子時計のパッケージ化（試作品組立）

- イ 原子時計評価システムの研究開発
 - ・並列評価可能な原子時計評価装置のパッケージ化と評価手順の確立

【高精度な時刻同期プロトコル実現のための研究開発】

- ウ 小型原子時計を搭載した有無線時刻・周波数同期技術の研究開発
 - ・動的環境下でのアルゴリズム研究開発、実装
 - ・実証実験評価

- エ 多点測位システムの研究開発
 - ・空間多重（ビームフォーミング技術等）の活用によりスループット改善効果を実証

5. 実施期間

令和4年度から7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12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、令和12年度にはサイズ0.5cc以下、消費電力3mW以下とすることを目指しており、これを加味した目標や取組について記載すること。

(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＞

テラヘルツ波による超大容量無線 LAN 伝送技術の研究開発

1. 目的

Society5.0の実現に向け、教育・医療を始め、AR・VR等のコミュニケーションツールやモビリティの高度化に向けて、高精細映像やセンシング情報等の大容量かつ同時多接続伝送技術が求められている。現在実用化が進められている IEEE802.11ay（60GHz帯）では、8.64GHz（57～66GHz）の帯域幅を活用し最大176Gbpsで通信が可能となるものの、非圧縮8K映像は100Gbpsを超える通信速度が要求されることから、複数のユーザーによる同時通信を行うことができない。また、将来的な利用者の増加を踏まえると、当該帯域における周波数の逼迫も懸念される。このような状況を受けて、更なる超広帯域の活用が見込めるテラヘルツ通信に関する研究開発が活発化しており、世界無線通信会議 WRC-19により、44GHz幅（252～296GHz）のテラヘルツ帯において固定業務（FS）と陸上移動業務（LMS）で利用できる決定がなされ、IEEE802.15.3dにおいて最大通信速度100Gbpsかつ1対1通信の規格が策定されている。しかし、無線LANに代表されるような免許不要かつ多数のユーザーが同時接続可能な通信技術については規格化に至っていない。そこで、これまでに実現されていない挑戦的な領域である超高周波帯かつ超広帯域を利用した無線LAN技術を確立し、我が国の技術的優位性を高めるとともに、ローカルエリアネットワーク向け大容量伝送ニーズに応えつつ、我が国が主導する技術の国際展開と普及促進を図り、新たな周波数帯の利用を促進することにより電波資源の拡大に資することを目標とする。

2. 政策的位置付け

・成長戦略フォローアップ（令和3年6月18日 閣議決定）

「12. 重要分野における取組（2）医薬品産業の成長戦略 ii）データヘルス、健康・医療・介護のDX ②ICT、ロボット、AI等の医療・介護現場での技術活用の促進（オンライン医療の推進）」において、「遠隔にいる医師でないと実施が困難な手術等への対応を進めるため、高性能・高精度の機器開発と、そうした機器利用の前提となる大容量かつ超低遅延な通信環境整備を促進する。」旨が記載されている。

・デジタル社会の実現に向けた重点計画（令和3年6月18日 閣議決定）

「第3部 施策集[No.3-15] 8K等高精細映像技術の医療応用の推進」において、「8K技術を活用した内視鏡手術システムは、これまでの内視鏡手術よりも安全性及び効率性を高める可能性があり、速やかな普及が期待されていることから、8K内視鏡システムの更なる小型化等の改良や当該システムを応用した遠隔手術支援の実現に向けた研究開発を実施。」旨が記載されている。

- ・官民 ITS 構想・ロードマップ（令和3年6月15日 高度情報通信ネットワーク社会推進戦略本部・官民データ活用推進戦略会議決定）

「Ⅲ今後の ITS 構想の基本的考え方 6 重点施策① 技術開発」において、「モビリティがネットワークを介して情報を共有し合い、新しいサービスを創出するには、プラットフォームとの通信や大量のモビリティ関連データをリアルタイムで処理する等、プラットフォームが備えるべきセキュリティ、基盤技術が重要になる。そのためこれら技術と将来のモビリティ関連データ形式、データ量等を整理し、プラットフォームに必要な技術要件の検討を行う。」旨が記載されている。

3. 目標

教育分野や医療分野、自動走行などの需要でこれまでも高精細映像・センシング情報などの大容量通信を前提としたテラヘルツ帯の研究開発が進められてきた。また、世界無線通信会議 WRC-19 の結果として 44GHz 幅（252～296GHz）等、これまでにない連続する広帯域を含んだテラヘルツ帯において固定業務 (FS) と陸上移動業務 (LMS) で利用できる決定がなされた。一方で、Society5.0 の実現に向けて超高精細や超臨場感といった、より高品質なコミュニケーションや遠隔制御に必要な大容量映像及びセンシング情報等の伝送技術が求められているものの、無線 LAN に代表される技術のように、誰もが手軽に使い、かつ複数のユーザーへ同時に伝送・共有できる超大容量無線技術が確立されていない。また、実用化が進められているミリ波帯では空間多重や高多値変調を用いることで大容量化が図られてはいるが、将来的に 1Tbps 級の伝送容量を目指すには、周波数の逼迫を回避しつつ広い周波数帯を活用可能なテラヘルツ帯を用いる必要がある。

本研究開発は、超大容量無線通信が実現可能な広帯域のテラヘルツ帯において、将来的に 1Tbps を見据えたマルチストリーム無線 LAN 技術を確立することを念頭に、アクセスポイント及び端末間を 100Gbps 以上で伝送可能かつ実利用環境を考慮した無線通信技術を確立し、新たな周波数帯の利用を促進することにより電波資源の拡大に資することを目標とする。

4. 研究開発内容

(1) 概要

本研究開発では 151.5～164GHz、209～226GHz、252～296GHz 等の 100GHz 以上のテラヘルツ帯における、電波伝搬特性に基づく MIMO 対応多素子アンテナモジュール、アンテナと一体化した集積回路を実現するトランシーバ技術、空間リソース最適化に向けたマルチ周波数協調動作技術を研究開発し、伝送速度 100Gbps 以上を実現するとともに、将来的には 1Tbps を目指す無線伝送技術を確立する。また、既存無線 LAN と同等の同時多接続・信頼性を実現し、IEEE802 等のデファクト国際標準化への対応にも取り組む。

(2) 技術課題および到達目標

技術課題

ア MIMO 対応多素子アンテナモジュールに関する研究開発

一般に無線通信における伝送速度の向上を図る場合、周波数もしくは時間のチャンネル分割によって多重化し伝送速度を確保する伝送方法に加え、MIMO 等の複数アンテナ（複数チャンネル）による空間分割によって伝送レイヤーを多重化し大容量化を図る方法等があり、既存無線 LAN においては、上記技術を組み合わせ、伝送速度の向上が図られている。テラヘルツ帯における無線通信においては数 10GHz の広帯域（例：252～296GHz の 44GHz 幅）が割り当てられているものの、周波数利用効率及び周波数共用の観点から、現実的には割り当てられた周波数帯域を複数チャンネルに分割し、1チャンネル当たりの帯域（数 GHz 幅）を設定して使用することが望ましく、その際、周波数分割及び時間分割による多重化によって期待される伝送速度は 100Gbps 程度となる。従って、本研究開発で目指す伝送速度 1Tbps を見据えるには、周波数分割及び時間分割に加え、MIMO による空間分割多重化によって複数の伝送レイヤーを束ね、大容量通信を実現する必要がある。テラヘルツ帯における MIMO を実現する方法は様々想定されるが、無線 LAN の利用シーンである病院、学校、工場、オフィス、一般家庭等を想定すると、アクセスポイントにおいては美観や設置場所、端末においては可搬性の観点から装置の小型化が求められる。装置の小型化を図るためには、多素子アンテナを集積化して小型形状に実装する必要があるが、テラヘルツ帯の小型集積化多素子アンテナは実用化段階には至っていない。また、トランシーバと一体となる MIMO 対応多素子アンテナモジュールの実現には、テラヘルツ帯の波長が 3mm 以下となるためアンテナ素子間隔は半波長（3mm の場合は 1.5mm）程度となることから、これに対応した精度によるアンテナ加工技術、RF フロントエンドとの精密な接続技術が求められる。これら状況を踏まえ、以下の研究開発を実施する。

アー① MIMO アンテナを想定した電波伝搬測定技術の研究開発

通常、無線通信技術の研究開発では、実際の利用シーンを想定した電波伝搬特性を把握し、これと連携したアンテナ設計が行われている。60GHz 以下（IEEE802.11ay、5G 等）においては、電波伝搬特性に基づく MIMO アンテナが実現されている。一方で、100GHz 超のテラヘルツ帯での MIMO を前提とした電波伝搬特性は明らかにされておらず、MIMO 対応多素子アンテナの実現には至っていない。テラヘルツ帯において大気減衰や反射特性などを含めた電波伝搬が明らかでない状況下で、素子構成の最適化について十分に考慮する必要がある。

従って、本研究開発は、代表的な室内ユースケースでの利用を想定したテ

ラヘルツ帯電波伝搬測定技術を確立し、MIMO を前提とするテラヘルツ帯電波伝搬特性を把握する。

ア② 電波伝搬特性に基づく多素子アンテナモジュール技術の研究開発

現行の無線 LAN は病院や学校、工場、一般家庭といった様々な環境で利用されていることから、テラヘルツ無線 LAN においてもこれら多様な環境において利用可能かつ、汎用的な端末への搭載を見据える必要がある。

したがって、課題ア①で求めた想定される利用シーンに応じたテラヘルツ帯電波伝搬特性を活用し、MIMO を前提とする多素子アンテナの要件を見出すとともに、RF フロントエンドと高精度かつ低損失に接続可能なアンテナモジュール技術を確立する。

イ トランシーバ技術の研究開発

課題アの技術課題である高精度な加工技術で造られる MIMO 対応多素子アンテナを用いたテラヘルツ帯による超大容量無線通信の実現には、アンテナの形状や素子構成を考慮したトランシーバを構築し、多素子アンテナと高精度に接続する技術に加え、指向性を制御するためのビーム制御技術が求められる。そのため、以下に示す研究開発を実施し、1Tbps を見据えた超大容量無線通信の実現に必要なテラヘルツ帯における MIMO を想定したトランシーバ技術を確立する。

イー① テラヘルツ帯集積回路のアーキテクチャ及び実装技術の研究開発

MIMO を想定したトランシーバについては、利用シーン及び使用するテラヘルツ帯の波長による制約から、複数の送受信部を有する MIMO 構成による干渉条件等を考慮した設計及び実装を行う必要があるものの、現状では MIMO を前提としたテラヘルツ帯で動作する RF フロントエンド、変復調回路技術等のトランシーバ技術は未開拓な技術である。そこで、テラヘルツ帯における MIMO を前提とする RF フロントエンド技術、変復調回路、位相器、増幅回路等の最適な配置及び回路要件を確立するとともに、MIMO 対応多素子アンテナモジュールを高精度に接続可能な実装技術を確立する。

イー② MIMO 対応ビーム制御技術の研究開発

テラヘルツ帯電波の高い直進性において、現行の無線 LAN と同様のシーンで利用するためには、利用者の位置に応じて最適な通信環境が提供できるよう、電波の指向性を動的に制御する必要がある。無線 LAN の特性上、小型化が図れるフェーズドアレイ構成によるビーム制御技術の導入が想定されるが、現状では大容量通信が期待できる MIMO を前提とするテラヘルツ帯におけるビーム制御技術は確立されていない。これら状況を踏まえ、課題イー①と接続可能かつ MIMO に対応したビーム制御技術を確立する。

ウ マルチ周波数協調動作技術の研究開発

テラヘルツ帯特有の高い直進性及び伝搬損失の中で切れ目無く通信を行うためには、個々のアクセスポイント又は端末（以下 AP/端末）同士が協調又は連携して通信状態を維持するよう、システム全体を統合したネットワーク制御を設計・実装する必要がある。また、複数の AP/端末を協調・連携して制御するための通信には、速度よりも接続性が優先されることから、直進性の高いテラヘルツ帯では無く、見通し外伝搬が期待できるマイクロ波帯等を用いることが有効である。さらに、テラヘルツ帯の通信がブロッキングされた場合には、通信速度の低下が生じるもののマイクロ波帯にハンドオーバーして通信を維持することが必要となる。しかし、既存無線 LAN には、このようなヘテロジニアスな構成は実現されておらず、複数の周波数帯を用いて協調動作を行うマルチ周波数協調動作技術を実現する必要がある。

また、これまでのテラヘルツ帯の規格（IEEE802.15.3d）は、10GHz 超（～数十 GHz）のバンド幅をシングルキャリアで用いるものであり、複数端末の異なる要求条件に応じたフレキシブルなマルチアクセスは実現されておらず、FDMA 方式等を用いたチャネルボンディングを活用して、複数端末の要求条件に応じたマルチアクセスを実現する周波数リソース制御技術を確立する必要がある。さらに、テラヘルツ帯特有の高い伝搬損失と電波吸収を含むブロッキングの課題を解決するために、これまでのミリ波帯の規格（IEEE802.11ad/ IEEE802.11ay）で用いられてきたビームフォーミング技術に加えて、複数のアクセスポイントが連携して伝送を行う空間リソース制御技術を確立する必要がある。

そこで本研究開発では、一般的な環境で用いるテラヘルツ無線 LAN を想定し、複数の AP/端末を協調・連携して制御するマルチ周波数協調動作技術、複数端末の異なる要求条件に応じたマルチアクセスを実現する周波数リソース制御技術、及びテラヘルツ帯の高い伝搬損失とブロッキングの課題を解決する空間リソース制御技術を確立する。特に空間リソース制御技術に関しては、既存の DPS (Dynamic Point Selection)、CS/CB(Coordinated Scheduling/Coordinated Beamforming)、Joint Transmission 等を拡張し、テラヘルツ帯に適した複数アクセスポイント連携方式を確立する。

到達目標

ア MIMO 対応多素子アンテナモジュールに関する研究開発

テラヘルツ帯で MIMO を実現する多素子アンテナ技術の確立に向けて、MIMO を前提とした代表的な室内ユースケースにおける電波伝搬特性を実測により明らかにするとともに、MIMO に適するように伝搬チャネル環境を変化させる手法を検討し、代表的なユースケースでの評価結果と組み合わせて有益な指針を示す。

加えて、テラヘルツ帯の小型集積化多素子アンテナを実現するための高精度なアンテナ加工技術と RF フロントエンドとの精密な接続技術を開発するとともに、電波伝搬特性を参照しながら、伝送速度 1Tbps を見据えた 2 ストリーム以上の MIMO 対応が可能なアンテナモジュール技術を開発し、1 ストリーム当たり体積 1cm³ 以下で 8 素子以上のアンテナ及びトランシーバを搭載可能な小型多素子アンテナモジュール技術を実現する。

イ トランシーバ技術の研究開発

課題アの技術課題である高精度な加工技術で造られる MIMO 対応多素子アンテナに精密に接続可能で、MIMO 動作に必要な伝送信号を送受信可能な RF フロントエンド、変復調回路、ビーム制御機能を設計、試作、評価するとともに、MIMO に対応可能なテラヘルツ帯トランシーバ技術を開発する。具体的には、テラヘルツ帯の波長に対して半波長間隔程度のアンテナに対して、アンテナと一体化可能となる集積回路のアーキテクチャや実装技術を開発する。これら技術開発を経て、ビーム制御角度の目標を 60 度（±30 度）とする 1 チャネル 1 ストリーム当たり 40Gbps 以上のトランシーバ技術の実現し、複数チャネルや複数ストリームの利用によって 100Gbps 以上の超高速データ伝送を達成する。

ウ マルチ周波数協調動作技術の研究開発

周波数リソース制御技術、空間リソース制御技術を組み合わせ、システム全体でマルチ周波数協調動作を実現するネットワークアーキテクチャを検討しシステム設計を実施する。さらにシステム全体を検証するため、システムシミュレーションを実施するとともに、課題アで取得する電波伝搬特性も参照しながら、一般的な環境において通信の遮断率を限りなくゼロに近づける複数アクセスポイントの設置法及びマイクロ波帯へのシームレスなハンドオーバー技術を確立する。また、課題アで開発した多素子アンテナモジュール及び課題イで開発したトランシーバを用いた通信実証によるデモンストラーションを実施し、2 端末以上の同時接続が可能かつ最大スループット 100Gbps 以上の伝送速度を示すとともに、複数ストリームを用いた MIMO 伝送により 1Tbps の伝送速度が実現可能な技術的根拠を示す。通信距離は 3m 以上を目指す。

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 4 年度>

- ア MIMO 対応多素子アンテナモジュールに関する研究開発
 - ・ MIMO を前提とする電波伝搬測定の手法の策定

- ・ MIMO 構成のケーススタディと試作方針の策定
 - ・ 測定、評価装置の整備
- イ トランシーバ技術の研究開発
- ・ MIMO 構成を想定した送受信機構成の検討
 - ・ ビーム制御構成の検討
- ウ マルチ周波数協調動作技術の研究開発
- ・ テラヘルツ帯周波数リソース制御の検証方針の策定
 - ・ マルチ周波数マルチアクセスポイント協調動作の検証方針の策定

<令和5年度>

- ア MIMO 対応多素子アンテナモジュールに関する研究開発
- ・ MIMO の利用に資する電波伝搬特性の測定
 - ・ 電波伝搬特性に基づく MIMO アンテナ要素技術試作及び特性評価
- イ トランシーバ技術の研究開発
- ・ 増幅器、変調器等のトランシーバの機能ブロック毎の試作及び特性評価
 - ・ 移相器等のビーム制御機能ブロック毎の試作及び特性評価
- ウ マルチ周波数協調動作技術の研究開発
- ・ 統計的な伝搬特性を用いた基本特性シミュレーション
 - ・ テラヘルツ帯無線 LAN のシステムアーキテクチャの設計

<令和6年度>

- ア MIMO 対応多素子アンテナモジュールに関する研究開発
- ・ 電波伝搬特性の測定結果に基づく伝搬特性の解明及び伝搬チャネル環境制御手法の構築
 - ・ 電波伝搬特性に基づく MIMO 構成及び MIMO アンテナの結合モジュール試作及び特性評価
- イ トランシーバ技術の研究開発
- ・ 機能ブロックを結合したトランシーバ全体の試作及び特性評価
 - ・ 機能ブロックを結合したビーム制御全体の試作及び特性評価
- ウ マルチ周波数協調動作技術の研究開発
- ・ 実環境を想定したシステムレベルシミュレータの構築
 - ・ マルチ周波数マルチアクセスポイント協調のための周波数及び空間リソース制御信号の設計

<令和7年度>

ア MIMO 対応多素子アンテナモジュールに関する研究開発

- ・ 結合試験に向けた MIMO 構成の改良試作及び特性評価
- ・ MIMO 構成での電波伝搬特性を反映した伝搬チャネル環境制御の最適化

イ トランシーバ技術の研究開発

- ・ 結合試験に向けたトランシーバ技術の改良試作及び特性評価
- ・ ビーム制御技術の改良試作及び特性評価

ウ マルチ周波数協調動作技術の研究開発

- ・ 実環境を想定したシステムの統合シミュレーション
- ・ 統合デモンストレーション

5. 実施期間

令和4年度から令和7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12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。

(3) 特記事項

それぞれの課題は全体目標に密接に関わるため、課題間連携は密に行うこと。