

＜基本計画書（案）＞

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となる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、誰もが手軽に使える、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。

アー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、課題アー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なく、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 1cm^3 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付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。