

令和 4 年度研究開発成果概要書

採 択 番 号 00401

研究開発課題名 Beyond 5G に向けたテラヘルツ帯を活用した端末拡張型無線通信システム実現のための研究開発

研究開発項目 1) 端末拡張のためのテラヘルツ帯 RF 構成技術

研究開発項目 2) テラヘルツ帯を適用した端末拡張のための信号処理技術

研究開発項目 3) 端末拡張型無線通信システム構築・制御技術

副 題 Beyond 5G に向けたテラヘルツ帯を活用するユーザセントリックアーキテクチャ実現に関する研究開発

(1) 研究開発の目的

本研究開発では、Beyond 5G 時代に向けて、ユーザを取り巻く通信環境や、それぞれのユーザの通信要求に適応して、ユーザが存在するあらゆる場所で高い通信性能を提供し続ける、ユーザ中心の「ユーザセントリックアーキテクチャ」の実現に向けた技術の確立を目指す。具体的には、複数の中継デバイスによりユーザ端末の機能を仮想的に拡張した仮想化端末を実現するテラヘルツ帯 RF 構成技術、ユーザ端末と中継デバイス間にテラヘルツ帯を適用した端末拡張のための信号処理技術、および柔軟かつスケラビリティを持った端末拡張型無線通信システム構築・制御技術を確立する。

(2) 研究開発期間

令和 3 年度から令和 6 年度 (4 年間)

(3) 受託者

株式会社 KDDI 総合研究所<代表研究者>
学校法人早稲田大学
学校法人千葉工業大学
国立大学法人名古屋工業大学
株式会社日立国際電気
パナソニックホールディングス株式会社

(4) 研究開発予算 (契約額)

令和 3 年度から令和 4 年度までの総額 2,396 百万円 (令和 4 年度 1,213 百万円)
※百万円未満切り上げ

(5) 研究開発項目と担当

研究開発項目 1 : 端末拡張のためのテラヘルツ帯 RF 構成技術

1-a. テラヘルツ帯近傍伝搬モデル化

1-a-①. 基本散乱・反射特性の計測とモデル化技術 (学校法人早稲田大学)

1-a-②. ユースケースにおける基本伝搬特性の計測とモデル化技術 (学校法人千葉工業大学)

1-a-③. 環境に応じた支配的な伝搬経路に基づく伝搬損失特性のモデル化技術 (株式会社 KDDI 総合研究所)

1-a-④. 多重波パラメータの推定に基づく時空間特性のモデル化技術 (学校法人千葉工業大学)

1-b. テラヘルツ帯アンテナ・ビーム制御技術

1-b-①. ビームフォーミングアンテナ技術 (国立大学法人名古屋工業大学)

1-b-②. ビーム連携制御技術 (株式会社 KDDI 総合研究所)

1-c. テラヘルツ帯フロントエンド・中継デバイス実現技術

1-c-①. テラヘルツフロントエンド実現技術 (株式会社日立国際電気)

1-c-②. 中継デバイス実現技術（株式会社 KDDI 総合研究所）

研究開発項目 2：テラヘルツ帯を適用した端末拡張のための信号処理技術

2-a. 超広帯域非線形歪み補償技術（株式会社 KDDI 総合研究所）

2-b. 超広帯域ベースバンド信号処理（パナソニックホールディングス株式会社）

研究開発項目 3：端末拡張型無線通信システム構築・制御技術（株式会社 KDDI 総合研究所）

(6) 特許出願、外部発表等

		累計（件）	当該年度（件）
特許出願	国内出願	32	19
	外国出願	6	6
外部発表等	研究論文	4	3
	その他研究発表	110	72
	標準化提案・採択	2	2
	プレスリリース・報道	77	73
	展示会	2	2
	受賞・表彰	2	2

(7) 具体的な実施内容と成果

研究開発項目 1：端末拡張のためのテラヘルツ帯 RF 構成技術

テラヘルツ帯を用いた仮想化端末の要素技術となる、電波伝搬モデル化技術、ビーム制御技術、中継デバイス制御技術に関する初期検討を実施し、以下の各項目の成果を得た。

1-a. テラヘルツ帯近傍伝搬モデル化

1-a-①. 基本散乱・反射特性の計測とモデル化技術

確率汎関数法による表面散乱・反射特性の解析を精密化し、幾何光学的な手法と併用し、研究開発項目 1-a-②、研究開発項目 1-a-③、研究開発項目 1-a-④にて利用可能な基礎データを提供した。帯域幅 2 GHz 以上の信号に対応し、100 マイクロ秒程度の高速変動の検出を可能とする散乱分布測定装置の原理確認を行った。100 GHz 帯での散乱分布測定の精度向上のための技術開発を進めるとともに、前倒して、300 GHz 帯における測定も実施した。表面散乱や雨滴散乱による干渉可能性についても、基礎検討を実施した。

1-a-②. ユースケースにおける基本伝搬特性の計測とモデル化技術

人体近傍での電波伝搬特性評価を可能にするため、試作した 300 GHz 帯ハンドヘルド型送信機の特実実験試験局免許を取得した。300 GHz 帯人体ファントム、電界分布を 0.5 mm 以下の精度で自動的に取得する電波伝搬自動計測システム、および電波の到来方向の計測が可能な半球スカナの試作を完了し、ハンドヘルド型送信機・受信機と組み合わせて、人体近傍にアンテナを配置した際の人体による回折・遮断・反射などの人体近傍の電波伝搬の基礎データを取得した。さらに、これらの計測系を使用し、屋外での建物・樹木・人の移動、における回折・遮断・反射計測などの屋外近距離電波伝搬の基礎データを取得した。

1-a-③. 環境に応じた支配的な伝搬経路に基づく伝搬損失特性のモデル化技術

頭部に中継デバイスを装着したケースを想定して 2021 年度に構築した 100 GHz 帯伝搬損失モデルについて、300 GHz 帯の実環境におけるケースへの適用を可能とする拡張を行った。中継デバイスを頭部以外に装着したケースにおいても支配的な伝搬経路を同定し、伝搬損失の推定に必要な環境パラメータを明らかにすることで、周辺環境と人体を模擬した 3D モデルと送受信アンテナの位置情報から伝搬損失を推定することが可能となった。

1-a-④. 多重波パラメータの推定に基づく時空間特性のモデル化技術

人体近傍のユーザ端末と中継デバイス間のテラヘルツ帯時空間伝搬路の計算機上での疑似発生を目指し、時空間特性の解明に取り組んだ。マクロ視点の検討により、時空間特性を構成する主なパスは、直接波の他、人体を経由する回折・反射波、周囲の障害物からの反射波であり、通信路としてこれらのパスが利用できることを示した。またマイクロ視点の検討から、人体や障害物を経由する反射波の分析を行い、波が反射面の表面粗さの影響を受けた場合は、その波は位相がランダムな数多くの素波の集まりとして表現され、その素波の遅延プロファイルは指数型で近似でき、偏波特性にも影響を与えることを明らかにした。

1-b. テラヘルツ帯アンテナ・ビーム制御技術

1-b-①. ビームフォーミングアンテナ技術

2022年度は、ユーザ端末と周辺デバイスの利得を合わせて39 dBiを実現しつつ両方に併用できるように、アンテナ1つ当たり19.5 dBiを60度の角度範囲で実現することを目標とした。それに対して、平凸レンズアンテナを用いることで、この目標を達成した。また、今後の高利得化を見据えて、球状レンズアンテナについても開発し、目標を達成した。さらに、今後の薄型化を目標として、ロットマンレンズ、フィッシュアイレンズ、バトラーマトリックスを用いたマルチビーム形成回路と、コムラインアンテナ、サーペントアレーを用いた平面アレーアンテナを設計し、電磁界シミュレーションと試作品の実験により、設計手法の妥当性の確認と、損失の発生度合いを調べた。

1-b-②. ビーム連携制御技術

ユーザ端末と中継デバイスの移動に対応したビーム追従を行うために、人体の動きを考慮した移動予測アルゴリズムを用いたビーム制御手法を考案した。歩行動作における方位の移動予測について、シミュレーションにより評価した結果、ビーム方向が理想的な状態に対する受信電力の劣化が3 dB以内となる確率を、遮蔽がない場合では従来手法の23.8%から94.5%へ改善、遮蔽を考慮した場合でも59.9%から67.2%へ改善できることを確認し、移動予測アルゴリズムの有効性を示した。

1-c. テラヘルツ帯フロントエンド・中継デバイス実現技術

1-c-①. テラヘルツフロントエンド実現技術

2021年度に方式設計を行った化合物半導体MMICを試作し評価を行い、2021年度に構造設計を行ったパッケージを1次試作し実装評価を実施した。なお、300 GHz帯検波回路についても試作し基礎評価も実施した。さらにミリ波(39 GHz)の回路についても評価を行うことで、テラヘルツ帯およびミリ波帯(39 GHz)を含む装置全体の回路構成について見直しを行い、2024年度以降の試作装置の実現に見通しを得た。

1-c-②. 中継デバイス実現技術

中継デバイスでの復調処理が不要な送受切換制御の実現に向けて、2021年度に開発したタイミング検出回路シミュレータの機能を拡張し、フェージングによる受信電力変動がある実用的な環境下での考案方式の性能評価を行った。受信電力を用いるタイミング検出方法では、下り信号によるタイミング検出誤差より上り信号を用いる場合の方が小さくなることを明らかにし、上り信号を併用するタイミング検出方法の有効性を示した。

研究開発項目2：テラヘルツ帯を適用した端末拡張のための信号処理技術

ユーザ端末と中継デバイス間にテラヘルツ帯を適用した端末拡張のための信号処理技術として、超広帯域非線形歪み補償技術と超広帯域ベースバンド信号処理に関する初期検討を実施し、以下の各項目の成果を得た。

2-a. 超広帯域非線形歪み補償技術

テラヘルツ帯の電力増幅器に対して、歪み補償を適用することにより、EVM (Error Vector Magnitude)を17.5%以下と出来ることを確認した。またハードウェア実装に向けて、ニューラ

ルネットワークの乗算をビットシフト演算(4 bits)と符号演算(1 bit)に置き換える手法を提案し、2.14 GHz を中心周波数とした 15 MHz 帯域幅の 16-QAM 信号を用いた実験において、提案手法の EVM が 1.90 %と、多項式を用いた手法の 2.53 %を上回ることを確認した。また、ユーザ端末と基地局との間を5台以上の中継デバイスが介した場合の上りリンク伝送速度が、96 Gbps 以上となることをシミュレーションにより確認した。

2-b. 超広帯域ベースバンド信号処理

2021 年度に検討した無線パラメータを用いて、詳細の伝送方式及び具現化の検討を行った。伝送方式に関しては、中継端末を用いた仮想化端末 MIMO において位相雑音の影響を軽減する受信方式を検討し、シミュレーションにより想定する位相雑音環境での特性を明らかにした。具現化に向けサブバンド構成を検討・評価し、サブバンド化による分割損は十分小さいことを示した。

研究開発項目3：端末拡張型無線通信システム構築・制御技術

ユーザセントリック RAN の実現に向けて、Cell-Free massive MIMO 技術を前提とした RAN アーキテクチャ、必要最低限の基地局(AP)を利用する AP クラスタ構築手法、無線信号処理が分散した環境下での処理の連携を図る CPU 間連携手法を確立した。これらを用いた、計算機シミュレーションで帯域 4.8 GHz 換算でスループットが 1.5 Gbps 以上の時間率が中間目標の 84 %を上回る 90 %を達成した。また、屋外の電波発射環境で、8 AP 及び 4 端末を用いてユーザセントリック RAN での無線品質の均一化を実証し、移動体通信システムとしての実現性を示した。これらについて、国際会議 2 件の発表を行い、無線分野のトップレベル会議である VTC-Fall で Best Paper Award を受賞したほか、9 件の国内発表、1 件の報道発表を行った。さらに、O-RAN での国際標準化活動を推進し、規格必須特許候補となる 6 件の特許出願するとともに、ユースケースと要件についての寄書 2 件を Next Generation Research Group (nGRG)に入力し、ユーザセントリック RAN がユースケースの Research Item として採択された。

(8) 今後の研究開発計画

研究開発項目1：端末拡張のためのテラヘルツ帯 RF 構成技術

テラヘルツ帯を用いた仮想化端末の要素技術となる、電波伝搬モデル化技術、ビーム制御技術、中継デバイス制御技術に関し、改良検討を実施する。具体的には、以下の各項目の内容を実施する。

1-a. テラヘルツ帯近傍伝搬モデル化

1-a-①. 基本散乱・反射特性の計測とモデル化技術

伝搬予測に必要となる、大気や身近なものによるテラヘルツ波の散乱・反射特性を把握することを目的とし、確率汎関数法による表面散乱・反射特性の数値モデルの精密化を実施する。具体的には偏波依存性や材料、表面形状による違いの詳細検討を実施する。また、散乱測定に関して、100 GHz 程度の周波数において帯域幅 4 GHz 以上、10 マイクロ秒程度での高速変動に対応する信号評価技術を開発する。また、微弱散乱測定を実現する手段として 300 GHz 進行波管増幅器の開発を継続し、要素部品の試作を検討する。

1-a-②. ユースケースにおける基本伝搬特性の計測とモデル化技術

人体ファントム、ハンドヘルド無線送信機・受信機をユースケースに基づき配置し、電波伝搬の統計データを自動計測システムにより取得する。また、計測受信機を可動システムに搭載した可動電界分布取得システムを構築する。

人体ファントムモデルに、呼吸や鼓動を模した機構を追加する。その人体ファントムでの反射特性や回折特性を評価することにより、人体の呼吸や鼓動が人体近傍での電波伝搬の統計データに与える影響を明確化する。

1-a-③. 環境に応じた支配的な伝搬経路に基づく伝搬損失特性のモデル化技術

2022 年度までに明らかにした、支配的な伝搬経路に基づき伝搬損失を推定するための環境パラメータについて、画像認識や機械学習などにより抽出する手法を確立する。また、中継デバイスをヘッドホンや腕時計として人体に装着するなどのユースケースにおいて、仮想化端末が通信可

能な領域で RMSE 7dB と精度よく推定できることを示す。

1-a-④. 多重波パラメータの推定に基づく時空間特性のモデル化技術

通信環境に応じた時空間伝搬路の計算機上での疑似発生法の確立を実施し、その後、伝搬路の簡易実装を行う。伝搬路におけるパス発生法は、決定論的と確率論的な方法を組み合わせたものを想定しており、継続的に時空間特性の解明を行いながら、伝搬路のモデル化と発生法の検討を実施する。

1-b. テラヘルツ帯アンテナ・ビーム制御技術

1-b-①. ビームフォーミングアンテナ技術

ユーザ端末用に、これまで開発した平凸レンズアンテナと球状レンズアンテナの2つの候補について、60度の角度範囲で利得 27 dBi を実現するための高利得化開発を進め、より優れた特性のアンテナを選定する。また、中継デバイス用に、目標利得 12 dBi を実現しつつ、アンテナの小型化のために、平凸レンズアンテナの焦点距離を短縮した低姿勢化と、薄型プリント基板を用いた平面アンテナの開発を進める。また、これらについて、偏波多重のための直交両偏波や 2 次元ビーム走査についても、実現可能性を検証する。

1-b-②. ビーム連携制御技術

2022 年度までに考案したビーム連携制御アルゴリズムを基に、複数の中継デバイスとの連携に対応した改良方式を考案する。また、ユーザ端末と中継デバイス間での連携情報および制御フロー等を策定し、ハードウェアへの実装方式を検討する。

1-c. テラヘルツ帯フロントエンド・中継デバイス実現技術

1-c-①. テラヘルツフロントエンド実現技術

化合物半導体 MMIC の試作評価及び設計修正を継続し、MMIC 単体の性能達成と MMIC 実装パッケージモジュールの結合評価を行う。結合評価のインタフェースシステムを含めてテラヘルツ帯フロントエンドとしての試作を行い、試作装置への実装について実現の見通しを得る。

1-c-②. 中継デバイス実現技術

中継デバイスにおける復調処理が不要な送受切換制御の実現に向けて、2023 年度は、考案したタイミング検出方式のハードウェア回路への実装方法を検討し、切換制御回路の一次試作を行う。研究開発項目 1-c-①等で開発する RF 部と接続し、測定器の信号を用いて切換制御回路の動作検証と課題抽出を行い、最終年度の機能拡張につなげる。

研究開発項目 2：テラヘルツ帯を適用した端末拡張のための信号処理技術

ユーザ端末と中継デバイス間にテラヘルツ帯を適用した端末拡張のための信号処理技術として、超広帯域非線形歪み補償技術と超広帯域ベースバンド信号処理に関する改良検討を実施する。具体的には、以下の各項目の内容を実施する。

2-a. 超広帯域非線形歪み補償技術

電力増幅器から非線形歪み補償回路へのフィードバック信号の帯域幅を削減した場合の影響や計算量の削減などのハードウェア実装に関する課題を検討する。帯域幅を削減した場合においても平均 EVM を 17.5 %以下とし、QPSK での伝送が可能なことをシミュレーションで確認する。また考案した方式を用いた非線形歪み補償回路の具現化に向け、設計および一次試作を完了し、無線信号にて歪みが補償され、EVM が改善することを確認する。

2-b. 超広帯域ベースバンド信号処理

超広帯域伝送方式の具現化に向け詳細な検討及び設計を行い、4.8 GHz 帯域幅による伝送を実現する原理試作を行う。原理的に 100 Gbps 級の伝送を実現できる構成として、4.8 GHz 信号の 10 多重(5 キャリア×2 偏波)が可能なスケラブルな構成とする。

研究開発項目3：端末拡張型無線通信システム構築・制御技術

2022年度までに得られたユーザセントリックRANのアーキテクチャと制御手法を、10km四方を想定した広域環境へ適用するための高度化を行う。高度化した手法について、計算機シミュレーション及び検証基盤による実機での評価を行い、最終目標達成に向けて改良を進める。また、最終年度に向けて、研究開発項目1及び2で検討した、中継デバイスを介した端末のRANへの収容に関する実現手法を検討する。加えて、O-RANでの規格必須となる候補の特許を出願するとともに、ユーザセントリックRANのユースケースに関するO-RANでのWhite Paperへの入れ込み、今後、標準仕様化するためのアーキテクチャ提案の取り組みを行う。