

令和 6 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ー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 6 年度までの総額 4,075 百万円 (令和 6 年度 840 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	86	22
	外国出願	55	9
外部発表等	研究論文	13	8
	その他研究発表	267	76
	標準化提案・採択	14	6
	プレスリリース・報道	98	0
	展示会	11	1
	受賞・表彰	10	5

（7）具体的な実施内容と最終成果

研究開発項目 1：

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

波長以下（100 ミクロン程度）の凹凸を含む表面構造による散乱の数値モデルを開発し、入射面外を含む 3 次元的な散乱測定・解析技術確立し、実際の衣服や建材などからの散乱のモデルを構築した。また、80mm/h までの降雨散乱を実測し、干渉モデルを構築した。これに基づき多数（例えば 10 台以上）の送受信器が同時に存在する場合、豪雨時のエリア内の伝送容量限界を見積もった。

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の評価を可能にする各種自動計測システムの構築に成功した。同システムを用いて、人体による遮断損失の測定を行い、腕の隙間や衣服、毛髪の影響を補正項として追加した高精度なモデル式を構築した。また、300GHz 帯における樹木の遮断損失の季節依存性および遮断損失の確率密度関数のモデル化に成功した。

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

テラヘルツ帯における人体近傍領域の伝搬損失モデルを構築し、モデル化において考慮すべき環境パラメータを生成する手法を確立した。さらに装着する中継デバイスの位置、動作、人物、環境の観点で網羅的に測定実験を行い、考慮すべき環境パラメータの補正を行った伝搬損失モデルが実測値を精度よく推定できることを確認した。

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

テラヘルツ帯伝搬路の時空間特性は常在波、非常在波を放射・到来角に広がりを持つマルチクラスタモデルとして表現することが有効であることを確認した。その上で、人体近傍シナリオでの時空間特性の疑似発生法を確立し、人体静止時だけでなく人体移動を考慮した通信速度の評価の実現に貢献した。

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

ユーザ端末用アンテナとして 5 ビーム同時形成可能な球状レンズアンテナを開発し、目標である 60 度の角度範囲で利得 27dBi 以上を、5 バンド全体にわたって、直交両偏波で実現できることを実験により示した。また、中継デバイス用アンテナとして平面アンテナを開発し、目標である 60 度の角度範囲で利得 12dBi 以上を、2 つの異なる設計周波数で設計した 2 アンテナ構成で、5 バンド全体にわたって直交両偏波を実現できることを実験により示した。

1-b-②. ビーム連携制御技術

人体動作によるユーザ端末と中継デバイスの相互位置の複雑な変動において、項目 1-b-①で開発した約 3 度という超狭ビームのテラヘルツ帯マルチビームアンテナに適用可能なビーム追従手法を確立した。同手法をシミュレーションで評価を行い、ビーム追従成功率 90%以上を達成できること、及びハードウェアの実証により、歩行動作でビーム追従成功率 93.5%を達成できることを確認した。

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

テラヘルツ波モジュールの評価環境の構築を行いつつ、化合物半導体を母材とした MMIC 開発した。フロントエンド送信部として 300GHz 帯を RF 周波数とし占有帯域幅 4.8GHz、IF 周波数 39GHz でスイッチ回路込みの出力電力-9dBm を、受信部として 300GHz 帯を RF 周波数とし IF 出力周波数 39GHz、最小受信電力-53dBm 以上、IF 出力電力-34dBm をそれぞれ実現した。また、局部発信部として、発振周波数 10~12.6GHz における位相雑音-70dBc/1MHz@offset10MHz を実現し逡倍器を介して RF 部に局部発振信号の供給を実現した。

1-c-②. 中継デバイス実現技術

RF コンポーネントやアンテナ等の諸元から回線設計を実施した。回線設計に基づき、仮想化端末から基地局までできるだけ長い通信距離を得るため、中継デバイスの送信出力が最大値を超過しない範囲で最大となるよう中継回路内部のアッテネータの値を決定する手法を考案した。また、下り受信信号と上り受信信号の電力変動に基づく、誤差を 0.1 μ s 以内の TDD フレームタイミング検出手法を考案した。

研究開発項目 2：

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

4.8GHz 帯域幅の超広帯域信号に対してニューラルネットワークを用いた非線形歪み補償方式を提案し、同歪み補償により、EVM 27.3%から 17.3%に改善できること、及び同等の性能を達成できる手法 (DNN) より演算量を 50.4%に削減できることを確認した。また、非線形歪み補償器を FPGA で実装し、信号品質を EVM 29.0%から 27.8%に改善でき、中継デバイス 5 台を用いることで目標とした 96Gbps が実現可能であることをハードウェア統合実証で実証した。

2-b. 超広帯域ベースバンド信号処理

仮想化端末システムで想定されるテラヘルツ波位相雑音及びミリ波伝搬路特性を考慮した無線波形設計を行った。さらに仮想化端末における MIMO を実現すべく、複数の中継デバイスの位相雑音の影響を軽減可能な MIMO 伝送方式を開発した。4.8GHz 帯域幅の超広帯域伝送を実現するベースバンド信号処理原理試作装置を開発し、QPSK 変調、2 偏波、2 チャネルを用いた物理伝送速度 38.4Gbps 伝送を EVM 9.4%(目標値 EVM 17.5%)で達成した。

研究開発項目3：

ユーザセントリックな Cell-Free massive MIMO (CF-mMIMO) を実現する RAN アーキテクチャの構築を目指し、1) Access Point (AP) cluster および AP sub-cluster を考慮してユーザ毎に RAN を効率的に最適化する RAN スライス管理手法の考案、ならびに、2) 大規模環境における各 RAN スライスの最適制御を行う分散連係型 RAN 制御スキームと制御インターフェイスの確立という目標に対し、以下の成果を得た。

- 目標 1) に関して検討を行い、ユーザセントリック RAN アーキテクチャとして、階層型かつ分散したユーザ単位の無線信号処理機能 (CPU) 配置アーキテクチャを策定した。これにより、CF-mMIMO の大規模環境への適用に必要な、通信品質の確保と無線信号伝送量の低減を実現可能とした。
- 目標 2) に関して、ユーザセントリック RAN アーキテクチャを元にした、CF-mMIMO によるユーザ毎の無線品質の確保に向け、AP クラスタ化技術、CPU 間連携技術、CPU 配置技術の制御を統合した制御スキームを確立した。本スキームは、組み合わせ最適化といった得意とする部分を AI で処理し、CPU 間連携や配置についてはルールベースの軽量かつ学習の手間を省ける手法で処理するという特徴を有している。また、実用化に向けて、制御に必要なインターフェイスを策定した。CPU 間連携技術については、著名な国際学術会議である VTC2022-Fall で上位 3 編に与えられる Best Paper Award を受賞し、学術的な評価を得られた。
- 実用化に必要な技術の先んじた確立にも取り組み、AP と端末の増加に対応し、実時間での制御を継続するため、O-RAN で規格化された RIC (RAN Intelligent Controller) を用いて、最適な分散配置技術を確立した。また、CF-mMIMO による無線品質確保のため、AP 間での位相レベルの同期を実現し、基準クロックの位相変動を抑えつつ、無線信号処理で位相差を補正する手法を確立した。
- ユーザセントリック RAN アーキテクチャ及び統合制御スキームの評価を計算機シミュレーションと実機による評価で行った。都心部の環境を想定し、多数の基地局と端末を配置した計算機シミュレーションで、4.8GHz 帯域幅でスループット 1.5Gbps 以上の時間率を 97% 確保可能なことを確認した。実機による評価では、アーキテクチャ及び制御スキームを実装した、10 基地局/20 アンテナ、4.8GHz/100MHz 帯域幅、市販スマートフォン 8 台による実証基盤を構築した。本基盤での見通し内外を含めた評価により、セルラー比で平均 4.4 倍のスループットを確保でき、セル端 (5% タイル値) に着目すると 32 倍のスループットを確認した。また、制御にかかる時間は平均で 140ms であり、これは 5G での移動制御 (100ms) と同等であることから、モバイル通信システムとしての実用が可能なことを確認した。
- ユーザセントリック RAN 実証基盤を用いて、一般課題 014 「Beyond 5G 通信インフラを高効率に構成するメトロアクセス光技術」と連携した実証を行い、IFoF (IF over Fiber) をユーザセントリック RAN での広域でのアンテナ配置に適用できることを確認した。この取り組みについて、第 35 回電波功績賞 (ARIB 会長賞) の表彰を受けた。
- ユーザセントリック RAN の実用化に向け、O-RAN における国際標準化にも取り組み、2025 年からの具体的なインターフェイスの規格化に向けて、nGRG (next Generation Research Group) への提案を行い、ユースケース及びアーキテクチャの Research Report (RR) への反映を完了した。また、規格必須特許の候補となる、制御インターフェイスに関する内容を 79 件 (内、海外 33 件) 出願し、今後の規格化時に入力を進める予定である。

(8) 研究開発成果の展開・普及等に向けた計画・展望

計画

研究開発項目 1、2 で実現される仮想化端末については、2030 年代後半に想定される超大容量通信に対応するため、テラヘルツ帯活用に合わせて実用化を目指す。その前の中間段階では、本研究開発で得られた要素技術の応用、テラヘルツ帯の電波伝搬モデルの標準化や中継デバイス制御の標準化などを進める。

一方、研究開発項目 3 で実現されるユーザセントリック RAN に関しては、AI やデジタルツインに必須となる安定した品質の無線通信の実現に向けて、O-RAN および 3GPP での規格化を推

進するとともに、ユースケースを想定した実証や実用装置の開発を進め、2030 年以降の実用化を目指す。

展望

将来的には、Beyond5G/6G 技術の普及により、100Gbps 級の超広帯域通信が実現することが期待されている。本研究開発で実現した技術により、リモートワークやオンライン教育の効率が向上し、高度な AI を活用した新たなアプリケーションの開発が進む見込みである。さらに、国際標準化への貢献を通じて技術力をアピールし、本研究開発に関連して出願した特許内容の規格化を進めることで、通信分野での国際競争力が強化されると見込まれる。これらの取り組みを通じて、Beyond5G/6G における通信インフラの構築や新たな産業創出が期待される。