

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應して、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 5 年度までの総額 3,235 百万円 (令和 5 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	63	31
	外国出願	25	19
外部発表等	研究論文	5	2
	その他研究発表	189	77
	標準化提案・採択	8	6
	プレスリリース・報道	98	21
	展示会	10	8
	受賞・表彰	4	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・反射特性の数値モデルの精密化を実施した。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 300GHz 帯において実施した。100GHz 程度の周波数において帯域幅 4GHz 以上の信号に対応し、10 マイクロ秒程度で変動する現象を捉えることができる散乱測定システムを構築した。また、微弱散乱測定を実現する手段として 300GHz 進行波管増幅器の開発を継続し、要素部品の試作を実施した。

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

半球電界強度スキャナを可動システムに搭載した可動電界分布取得システムの構築に成功した。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し、人体の呼吸や鼓動が人体近傍での反射・回折特性に与える影響を評価し、変動が 1 dB 以下であることを明らかにした。

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

これまでに構築の人体近傍領域における 300GHz 帯伝搬損失モデルについて、代表的な利用ケースである歩行姿勢を想定した測定により実人体への適用性を評価した。この結果から衣服の散乱パスによる影響を考慮したモデル拡張を行い、会議室内において RMSE4.89dB の精度での推定を可能とした。また複数方向から撮影した写真から 3D モデルを生成するフォトグラメトリ技術により、反射散乱パスの電力推定に必要な表面粗さパラメータを 0.01mm オーダーの精度で抽出できることを明らかにした。

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

300 GHz 帯のユーザ端末とウェアラブル端末等の中継デバイス間の時空間特性について、直接波・人体散乱波を常在波、他の散乱波を非常在波と見なし、決定論・確率的にマルチパス波を

生成する Map-based hybrid channel model により、時空間伝搬路を疑似的に生成する方法を提案し、実装した。また屋内環境において、確率論的にパスを生成する伝搬パラメータを新規に測定により求めた。

#### 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

ユーザ端末用に球状レンズマルチビームアンテナを、中継デバイス用に基板内導波管ロットマンレンズマルチビーム平面アンテナを、製造可能な条件で設計した結果、両者とも、60度の角度範囲において、所望の利得を確保できるように設計できるめどが立った。

##### 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、デバイスの加速度・角速度を計測する慣性計測装置(IMU)と粒子フィルタを用いたビーム制御アルゴリズムを考案した。ユーザ端末を右手に保持し、中継デバイスを頭部に装着した場合の歩行動作について、自由空間伝搬損失およびIMUデータの伝送遅延が発生しない理想条件下においてシミュレーション評価した結果、ビーム方向を理想的に制御できた場合に対する受信電力の劣化が3dB以内となる確率(ビーム追従成功率)が、従来手法の67.2%から目標値である90%以上に改善できることを確認し、考案手法の有効性を確認した。

#### 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

300GHz帯、専有帯域幅4.8GHz以上のRFブロックをCH数2以上に対応した、化合物半導体MMIC実装モジュールの試作を行い、最終年度に向けた特性の改善点など知見を得た。また、IF帯である39GHz帯ミリ波回路の試作を行い、300GHz帯⇔39GHz帯ミリ波回路間接続における性能評価を行い、周波数変換ユニット(中継デバイス)として周波数特性等の知見を得た。それにより、最終年度に向けた中継デバイス制御改良モジュールの開発要件について作成を完了した。

##### 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、受信電力の変化によるTDDフレームタイミング検出機能のハードウェア試作を行い、測定器で発生したフェージングがかかった5G NR信号からフレームタイミングの検出が可能であることを確認した。また、研究開発項目1-b-①開発のテラヘルツアンテナ、1-c-①開発のRF部、2-b開発のベースバンド部と相互に接続するためのインタフェース仕様を策定した。

#### 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、実装を考慮し、乗算をビットシフト演算と符号演算に置き換え、計算量を削減した場合においても、EVM(Error Vector Magnitude)を17.5%以下とできることを測定器と実際のRF部を用いて、確認した。またハードウェア実装によるリアルタイムでの補償処理のための非線形歪み補償器の設計を完了した。

##### 2-b. 超広帯域ベースバンド信号処理

4.8GHz帯域幅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、1 キャリアを用いて 9.6Gbps 伝送を実現。また、目標値である EVM 17.5%以下を実現可能であることを確認。

### 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 の広域展開に向けた、制御手法の高度化を行った。Cell-Free massive MIMO で必要最低限の AP を利用する AP クラスタ構築手法について、多数の AP と端末が存在する環境に対応させ、都市部の移動端末で必要となる 100 ミリ秒以内での制御が可能であることを計算機シミュレーションで確認すると共に、無線品質が劣化する状況の課題抽出に基づき、端末の移動に伴う無線状況の複雑な変化に対応させ、無線品質を満足する時間率が 2022 年度の手法の 60%から 80%に向上することを確認した。また、異なる無線信号処理部 (CPU)間での干渉を低減する CPU 間連携手法を実証基盤に実装し、複数の CPU 及び端末が屋外を歩行程度の速さで移動する環境で、手法を用いない場合と比べてスループットが 15%向上することを確認すると共に、通信エリア内で高い通信品質が維持可能なことを確認した。さらに、ユーザセントリック RAN 高度実証基盤の実装仕様の策定を完了すると共に、研究開発項目 1 から 3 の統合実証に向けて、仮想化端末の RAN での収容方法の検討を完了した。これらの成果、及び AP 間の位相同期や RIC の分散配置手法の検討により、RAN としての基本設計を完了した。加えて、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 13 件を出願するとともに、Next Generation Research Group での検討内容が纏められた Research Report へのユーザセントリック RAN のユースケースの反映を完了した。

## (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

波長以下を含む表面構造による散乱の数理モデルを開発し、入射面外を含む 3 次元的な散乱測定・解析技術を確立し、実際の衣服や建材などからの散乱のモデルを構築する。屋外での利用も想定し、50mm/h までの雨による散乱まで含めたモデルを構築し、これに基づいた 10 台以上の送受信器が同時に存在する場合のシステム設計手法を確立する。微弱な散乱波を実測するために、300GHz 帯進行波管の原理確認をし、帯域幅 2GHz の高速変動する現象をとらえる測定技術を確立する。

##### 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

2023 年度までに構築したハンドヘルド無線送信機・受信機、および、電波伝搬自動計測システムを用いた人体近傍や屋外近距離でのユースケースに即した電波伝搬特性の統計データを取得し、そのモデル化を実施する。

##### 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

2023 年度に一例で明らかにした衣服の影響を考慮するために必要となるパラメータの生成方法を検討し、伝搬損失モデルの拡張を行う。またユースケース評価のために応答性を向上させる拡張などを行い、服装、姿勢など多様なシナリオにおいて有効性検証を行う。

##### 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

実装した時空間伝搬路を疑似的に生成するシミュレータにおいて、通信シナリオを屋外にも適用できるように拡張する。その拡張を実現するための新たな伝搬パラメータを取得する。さらに人体の姿勢変化や移動に対応した時間変動を伴う時空間伝搬路が生成可能となるように、シミュレータの機能を拡張する。

## 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

ユーザ端末用に球状レンズマルチビームアンテナを用いて 60 度の角度範囲で 27dBi を、中継デバイス用には基板内導波管ロットマンレンズマルチビーム平面アンテナを用いて 60 度の角度範囲で 12dBi を実現できるようにアンテナを設計し、実験により特性評価して、所望の特性が得られることを実証する。

### 1-b-②. ビーム連携制御技術

2023 年度に考案した手法を基に、ユーザ端末および中継デバイス間の IMU データの伝送遅延を考慮した改良方式を考案する。また、IMU と無線モジュールを用いた評価用ハードウェアを構築し、改良方式の有効性を実証する。

## 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

300GHz 帯、専有帯域幅 4.8GHz 以上の RF ブロックを CH 数 2 以上に対応した、ユーザ端末のフロントエンド部の試作、および送受信の回路系統を切り替え制御可能とする中継デバイスのフロントエンド部を試作し、実証実験を実施する。

### 1-c-②. 中継デバイス実現技術

受信電力の変化による TDD フレームタイミング検出機能のハードウェア一次試作により把握した実装課題の改良方法を検討し、中継デバイス制御モジュールの拡張を行う。また RF 中継回路での受信信号から検出したフレームタイミングを使用して中継回路を切替える機能を実現し、中継デバイスの TDD 動作を実現する。

## 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

ハードウェア実装した非線形歪み補償器を用いて、リアルタイムでテラヘルツ帯の電力増幅器で発生する歪みを補償し、5 台以上の中継デバイスを介した場合において、QPSK での伝送を実現し、それによって、基地局への上り回線速度 96 Gbps 以上となることを実証する。

### 2-b. 超広帯域ベースバンド信号処理

超広帯域ベースバンド信号処理原理試作を行い 5 キャリア、5 台の中継デバイスを経由してユーザ端末から基地局への上りリンクの物理伝送速度として、96Gbps を達成可能であることを実証する。

## 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

仮想化端末とその信号処理技術を含めた総合実証、及びユーザセントリック RAN が実環境で動作することの実証を行い、最終目標を達成する。目標達成の確認において、数値目標の達成は計算機シミュレーションを用い、移動体通信システムとしての実用性は実機で確認する。加えて、O-RAN の規格必須特許候補の出願を行うとともに、ユーザセントリック RAN を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。