

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合して、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3年度 1,183 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       | 13    | 13      |
|       | 外国出願       | 0     | 0       |
| 外部発表等 | 研究論文       | 1     | 1       |
|       | その他研究発表    | 37    | 37      |
|       | 標準化提案・採択   | 0     | 0       |
|       | プレスリリース・報道 | 4     | 4       |
|       | 展示会        | 0     | 0       |
|       | 受賞・表彰      | 0     | 0       |

## (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

建材や衣服などを想定した表面からのテラヘルツ波散乱のモデル化に関して、確率汎関数法において、衣服や建材などを想定した表面パラメータを設定し、数値解析を実施し、新規開発した散乱分布測定装置を用いた試験的な取得データと比較し、その有効性を確認した。テラヘルツ帯における大気散乱の影響に関して、解析手法の基盤を整備するとともに、試験用信号源として進行波管増幅器の基本設計・要素技術開発を平行して行う。

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、300 GHz 帯ハンドヘルド型送信機・受信機の設計を完了し、送信機・受信機の試作を実施した。人体ファントム材料の複素誘電率を THz-TDS と VNA により評価し、300GHz 帯での人体ファントム材料および試作方法を決定した。

人体近傍での電界分布や屋外での伝搬特性データの自動取得が可能な電波伝搬自動計測装置およびプログラムを構築し、人体や屋外の樹木などにおける回折・遮断・反射計測などの電波伝搬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

300GHz 帯における人体近傍のユースケースを想定した伝搬モデル構築に向けて、100GHz 帯を用いた基礎実験を実施した結果、頭部を楕円体で近似した際の曲率半径や人体表面の凹凸など人体の回折・散乱に寄与する環境パラメータの知見を得て、伝搬損失をモデル化した。

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

中継デバイスが人体近傍の場合と人体近傍でない場合の通信シナリオについて、電波伝搬シミュレーションを用いて時空間特性の基礎検討を行った。具体的には、レイトレーシングシミュレーションによる検討により、人体の反射・遮蔽作用を考慮したモデル化の必要性を明らかにした。また、FDTD シミュレーションによる検討により、テラヘルツ帯よりも低周波数帯のモデルに対し、放射波・到来波の散乱作用による表現を変更する必要性について明らかにした。

## 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

8個のホーンアンテナを一次放射器として給電した、直径10mmの平凸レンズを用いたマルチビームアンテナにより、60度の角度範囲の利得が、電磁界シミュレーションで23dBi以上となることがわかり、効率を考慮して実験でも21dBi以上の利得が見込まれることがわかった。本平凸レンズアンテナの測定を令和3年度中に完了し、導波管スイッチとルーネベルグレンズアンテナおよび、平面型のマルチビームアンテナについて、試作に向けた最終設計を完了した。

### 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ビーム方向制御に必要な方位推定技術について、重みづけ平均角度を用いたアルゴリズムを考案し、静止状態でのシミュレーション評価を実施した結果、従来手法に対して方位推定時間を30%短縮し、方位推定誤差を1/2以下に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

半導体の設計評価に必要なオンウェハ測定設備の整備を行い、モデリング用の試作半導体ウェハに於ける小信号Sパラメータ測定時の統計誤差・反復誤差を定量的に評価し知見を得た。また並行して4.8GHzのチャンネル幅を有する5帯域分に対応するRF送受信回路アーキテクチャを検討し、送受信回路を実現するための半導体回路設計を実施し見通しを得た。なお、受信系のキーとなる高効率の検波回路の方式を検討し、送受信回路全体の一次試作内容に見通しを得た。

### 1-c-②. 中継デバイス実現技術

仮想化端末を用いる3通りのユースケースについて回線設計を行い、仮想化端末と基地局間の通信距離に関する知見を得た。また、中継デバイスにおいて復調処理が不要な送受切換制御を実現するため、フレームタイミング検出回路の特性評価を実施した結果、回路パラメータと入力信号の下限値や検出誤差との関係の知見を得た。

## 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

超広帯域ベースバンド信号処理、及び超広帯域非線形歪み補償基本方式の初期検討を実施し、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

非線形歪みのモデル化方式および補償方式を検討し、SE blockを畳み込みニューラルネットワークに用いた手法が低計算量で高精度を出すことができる既存の畳み込みニューラルネットワークを用いたモデル化方式よりも3.7GHz帯の電力増幅器で100MHz帯域幅の信号を用いた場合にNMSE（正規化平均二乗誤差）で約2dB性能を改善できることを確認した。また、令和4年度に向けてニューラルネットワークを用いた非線形歪み補償を低計算量で実現するためのニューラルネットワークの二値化について、基礎検討を実施し、既存のモデル化方式に対して、二値化を適用した場合は、劣化が大きくなるため、ネットワークを複雑化させる必要があるという知見を得た。

### 2-b. 超広帯域ベースバンド信号処理

3GPPにおけるリリース15及びリリース17向けに行われた無線波形議論の調査を実施し、位相雑音及び遅延波の課題を特定した。また、テラヘルツ帯を評価可能なリンクレベルシミュレーション系を構築し、OFDM及びシングルキャリア（DFT-S-OFDM）の無線波形候補に対して、位相雑音、遅延波及びサブキャリア間隔の影響をEVM及びBLERの観点でシミュレーション評価を行い、300GHz帯において、 $-92\text{dBc}/\text{Hz}@1\text{MHz offset}$ 以下の位相雑音特性であれば、120~480kHzのサブキャリア間隔により位相雑音耐性とミリ波伝搬路の遅延波耐性を両立できるとの知見を得た。

### 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、RAN 仮想化技術を活用し、無線信号処理をユーザ単位に行うアーキテクチャを策定した。実機での実証基盤を開発し、AP Clustering 導入による電力量削減に通じる計算量削減を示し、報道発表を行った。また、無線信号処理機能の分散配置方法やその連携による制御の初期方式の有効性を示した。これらについて、著名なネットワーク管理の国際会議である NOMS での採録や、7 件の国内発表を行った。さらに、関連する制御インターフェイスについて、O-RAN での規格必須特許の確保を目指し、候補となる特許 8 件の出願を行った。

## (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

表面散乱・反射特性の解析と屋外利用に対応するために、散乱モデル構築と高速変動の検出を可能とする散乱分布測定装置の開発を行う。50mm/h までの雨による散乱まで含めたモデルを構築し、複数の送受信器が同時に存在する場合のテラヘルツ帯大容量伝送システム設計手法を確立する。また、微弱散乱測定を実現する手段として進行波管増幅器の要素技術開発を行う。

##### 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、令和 3 年度に試作した 300 GHz 帯ハンドヘルド送信機・受信機の特性評価の実施、および、これらの無線機を使用した基本的な電波伝搬実験を実施する。また、電界分布計測半球スキャナを構築し、半球での到来方向推定が可能であることを実証する。令和 3 年度に選定した材料を使用した人体ファントムモデルを試作し、上述した 300 GHz 帯ハンドヘルド送信機と電波伝搬自動計測システムを使用して、人体近傍の電波伝搬の基礎データを取得する。

##### 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

300GHz 帯における人体近傍の伝搬モデル構築に向けて、令和 3 年度に構築した 100GHz 帯の伝搬損失モデルを 300GHz 程度まで拡張する。素材や表面の凹凸等の精緻な情報から伝搬損失のモデル化に有効な環境パラメータを明らかにし、さまざまな通信シナリオにおける適用可能性を検証する。

##### 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

引き続き、電磁界シミュレーション（レイトレーシング、FDTD）を用いて、時空間伝搬路（到来波遅延、水平面と垂直面の放射・到来角）の特性化を図る。また、これらの結果を 1-a-①、1-a-②の実測値と照合し、その妥当性を確認する。さらに伝搬路の疑似発生法を考案し、1-a-③での伝搬損失特性との統合化を図る。

#### 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

8 個のホーンアンテナを一次放射器として給電した、直径 10mm の平凸レンズを用いたマルチビームアンテナの測定結果を受けて改良設計し、試作して特性を実験により評価する。導波管スイッチとルーネベルグレンズアンテナおよび、平面型のマルチビームアンテナについて試作して特性を評価し、その測定結果を受けて再設計し試作品を実験により評価する。

##### 1-b-②. ビーム連携制御技術

ユーザ端末と中継デバイス的高速なビーム連携制御の実現に向けて、令和 3 年度に考案した方位推定アルゴリズムに移動予測する改良を行い、1-b-①のアンテナパターンを用いて、移動状態においても静止状態と同等の精度で方位予測できることを確認する。また、ユーザ端末と中継デバ

イス間の連携制御に必要となる、ユーザ端末と中継デバイスの通信頻度等の要件を策定する。

#### 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. テラヘルツ帯フロントエンド実現技術

令和3年度に方式設計を行った300GHz帯化合物半導体MMICを試作し性能および実装について評価を行う。それに伴い、テラヘルツ帯の回路設計と並行しミリ波帯(39GHz帯)のミリ波RF回路の設計及び試作も行う。なおプロジェクト2年目の中間評価として、測定器で生成したシングルキャリアの信号をトランシーバ送信部に入力した状態で送信RF部及び受信RF部の評価をおこなうとともに、シングルキャリア変調信号やマルチキャリア信号での劣化を定量的に評価するための指標を得る。また関連課題にフィードバックを行うと共に3年目以降のRF部の設計指針を構築する。

##### 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、令和3年度に評価したタイミング検出回路の機能拡張と送受切換回路の追加設計を行い、シャドウイング等受信電力変動がある実用的な環境下での性能を評価する。また、低消費電力デバイスへ取付ける等のユースケースに適した利得制御特性を明らかにし、仮想化端末無線システムの特性評価を行う。

#### 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

超広帯域ベースバンド信号処理、及び超広帯域非線形歪み補償方式の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

引き続き、複雑な歪みの補償方法の検討を実施し、テラヘルツ帯の電力増幅器に適用、有効性を確認する。また中継デバイスにおける非線形歪みの補償方法についても検討を行い、複雑な歪みの補償方法とあわせて、ユーザ端末と中継デバイス間を多重化した場合においても平均EVMを17.5%以下とし、QPSKでの伝送が可能であることを確認する。

##### 2-b. 超広帯域ベースバンド信号処理

無線波形候補に対する並列演算やスケーリングを考慮した回路実装手段の検討を行い、具体的な処理ブロック設計と論理シミュレーションによる検証を実施する。

#### 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

令和3年度に得られた、ユーザセントリックRANの制御手法の改良を行い、中間目標を達成する。目標の達成において評価に規模が必要な数値目標は計算機シミュレーションで行い、移動体通信システムとしての実現性を実機で確認する。加えて、検討で得られた内容について、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を標準仕様化するためのユースケース提案の取り組みを行う。