

## 1. 研究課題・受託者・研究開発期間・研究開発予算

- ◆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
- ◆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
- ◆受託者：(株)KDDI総合研究所、(学)早稲田大学、(学)千葉工業大学、(大)名古屋工業大学、(株)日立国際電気、パナソニックホールディングス(株)
- ◆研究開発期間 令和3年度～令和6年度(4年間)
- ◆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)

## 2. 研究開発の目標

2024年度末までに、5台以上の中継デバイス経由で96 Gbpsの上りリンク物理伝送速度をハードウェアで示す。上りリンクのスループットが、1.5 Gbps以上確保可能な時間率を97%以上とできることを計算機シミュレーションにより確認する。4台以上のユーザ端末が2つの品質要求を伴った通信を行っている状況において、実時間で動作することを確認する。

## 3. 研究開発の成果 ※ 研究開発項目ごとの成果は、次ページ以降で記載

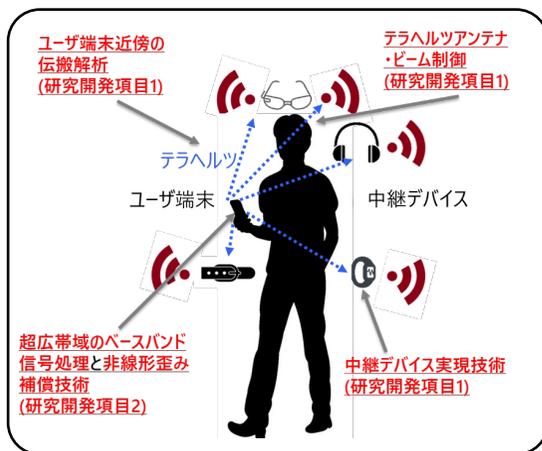
### 仮想化端末(研究開発項目1及び2)

#### 【目的】

周辺デバイスがアンテナとなり、能力が拡大された端末の実現

#### 【主な成果】

- 仮想化端末のテラヘルツ帯アンテナ・RF部およびミリ波帯ベースバンド部を含めたハードウェア実証実験系を構築してE2Eでの伝送に成功
- 仮想化端末のテラヘルツ帯アンテナ・RF部を組み合わせた測定系により、偏波間干渉および隣接中継デバイス干渉がある環境において96Gbps相当を実証
- 300GHz帯人体近傍環境における実測に基づいた伝搬チャネルモデルを構築
- ニューラルネットワーク非線形歪み補償の実装を考慮した演算量削減手法を確立。ベースバンド部の原理試作装置を開発し、EVM17.5%以下を達成できることを確認



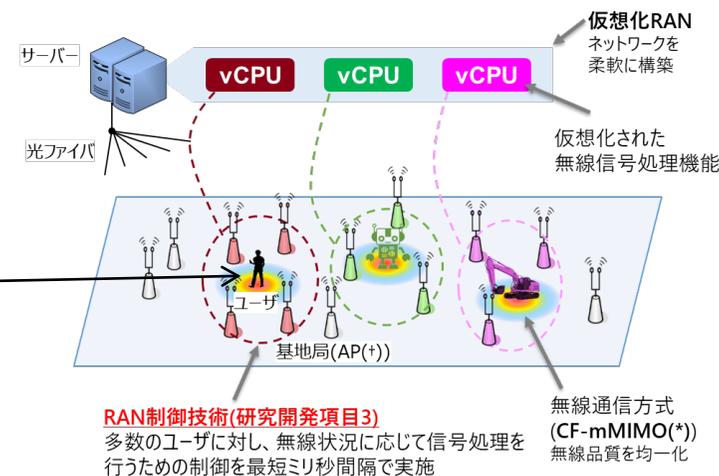
### ユーザセントリックRAN(研究開発項目3)

#### 【目的】

ユーザ単位でCell-Free massive MIMOの無線信号処理を行うRANの実現

#### 【主な成果】

- 広域かつ大規模な環境への適用に向けて、制御手法の高度化を確立すると共に、基地局へのクロック分配及び同期補正技術や制御コントローラ(RIC)の分散配置の検討に着手
- フィールド実証により、通信品質の安定化を確認
- O-RAN nGRG RS01でユーザセントリックRANのResearch Reportが承認され、規格化に向けた項目作りを順調に推進



(+)Access point

(\*)Cell-Free massive MIMO

### 3. 研究開発の成果(詳細)

#### テラヘルツ帯近傍伝搬モデル化(1-a)

**ユースケースを想定**

屋内環境および人体近傍

屋外近距離環境(5m以内)

**計測技術の開発と実測**

ユースケースに即した、300GHz帯の実測を行う測定系の構築を実施

300GHz帯の散乱測定装置を構築(1-a-①)

人体近傍の電波伝搬統計データの自動計測系を開発(1-a-②)

電波の到来方向を自動計測する自走式半球スキャナを開発(1-a-②)

**基本伝搬特性のモデル化**

300GHz表面散乱・反射特性モデルを精密化(1-a-①)

300GHz人体遮断特性を解析(1-a-②)

人体遮断時の遅延プロファイル

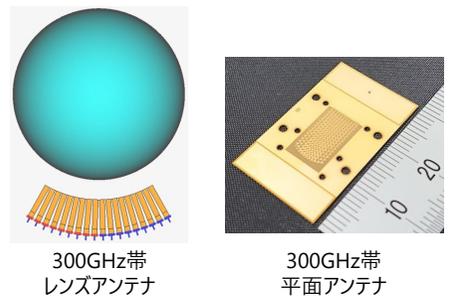
**伝搬損失・時空間特性のモデル化**

仮想化端末の性能評価に必要なとなる人体近傍の伝搬損失モデルおよび環境パラメータの生成手法を確立(1-a-③)

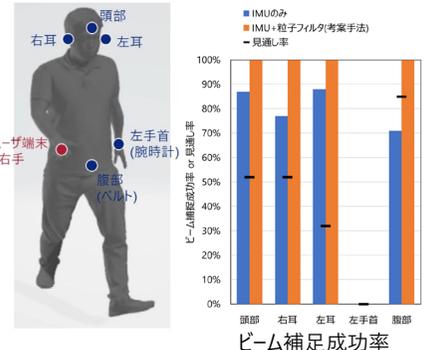
仮想化端末の性能評価に必要なとなる300GHz時空間伝搬路の生成手法を確立(1-a-④)

#### テラヘルツ帯アンテナ・ビーム制御技術(1-b)

仮想化端末の所望利得を満たすユーザー端末用レンズアンテナ(27dBi)と周辺デバイス用平面アンテナ(12dBi)の設計と試作を完了(1-b-①)



歩行シナリオにおいて、IMUセンサ(慣性計測センサ)を用いた中継デバイスの位置推定手法を考案し、90%以上の追従成功率を達成(1-b-②)



#### 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)

MMICの試作

モジュールの評価

MMICの評価(現状のMMIC)

パッケージへの実装確認

TX RFモジュール (40.6 mm)

FX RFモジュール (31.7 mm, 16 mm)

300GHz帯専有帯域幅4.8GHz以上のRFブロックのMMIC実装モジュールの一次試作を完了(1-c-①)

中継デバイス制御モジュール

フレームタイミングを基準とした検出タイミング

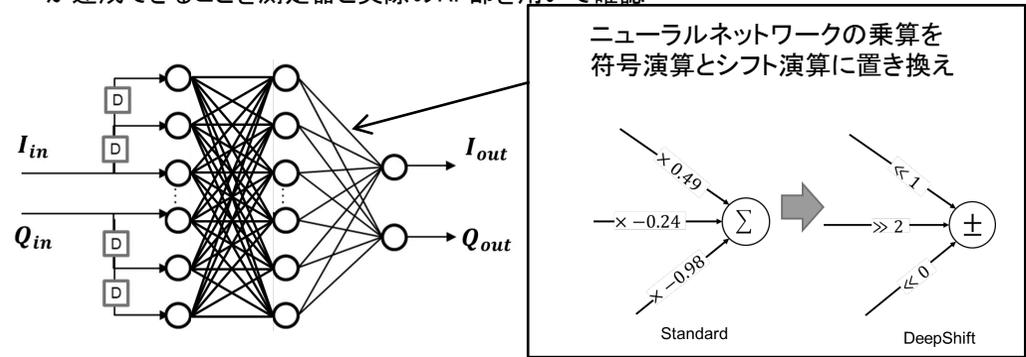
フレームタイミングを基準とした検出タイミング

中継デバイスのTDD同期に必要なとなる中継デバイス制御モジュールを開発し、フレームタイミングの検出に成功(1-c-②)

### 3. 研究開発の成果(詳細、続き)

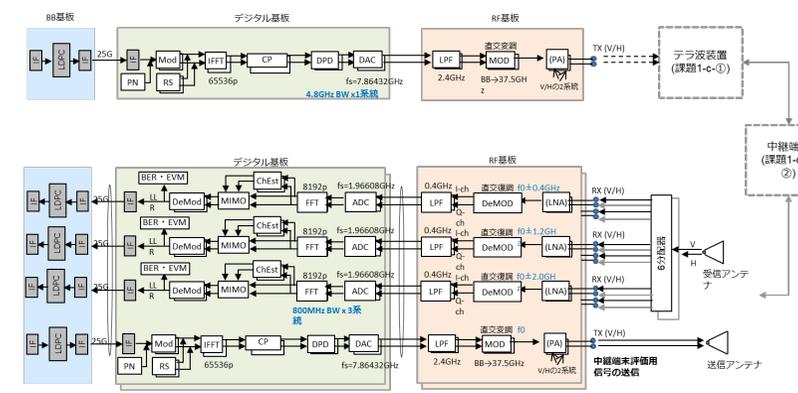
#### 超広帯域非線形歪み補償技術(2-a)

最終年度のリアルタイムでの非線形歪み補償に向けて、**ニューラルネットワーク非線形歪み補償の実装を考慮した演算量削減手法を確立し**、EVMを17.5%以下が達成できることを測定器と実際のRF部を用いて確認



#### 超広帯域ベースバンド信号処理(2-b)

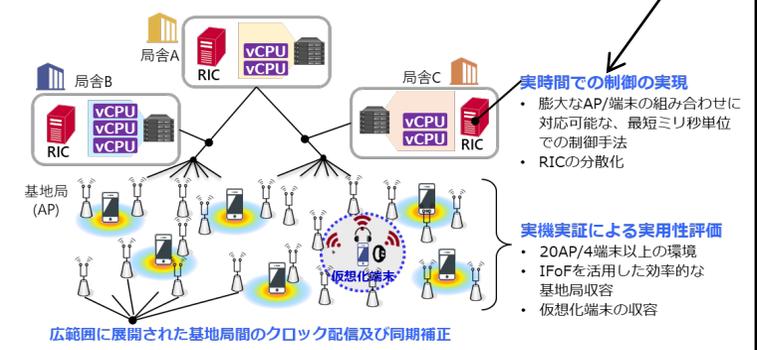
4.8GHz帯域幅の超広帯域伝送実現のベースバンド信号処理原理試作装置を開発し、EVM17.5%以下を達成



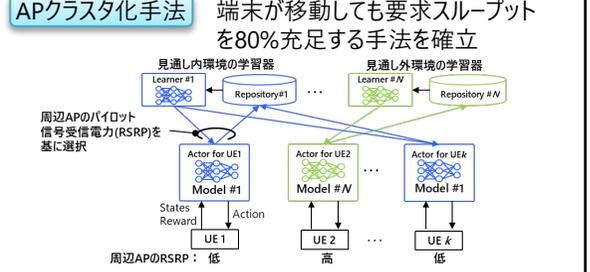
#### 端末拡張型無線通信システム構築・制御技術(3)

広域(例:10km四方)かつ大規模(例:基地局=1万、端末=数万)な環境へのユーザセントリックRAN適用を検討開始し、次及び右に記載の成果が得られ、最終目標達成に向けて着実に進捗した。

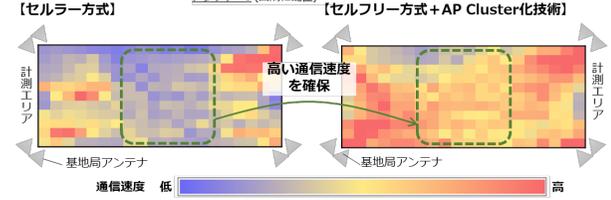
- ・ 制御を司るRICの分散配置に関する初期評価を完了
- ・ クロック配信及び同期補正手法の確立に向けたAP間での位相ずれの発生状況を把握
- ・ 最終的な実機実証に向けた基盤の実装仕様の策定を完了
- ・ 仮想化端末の収容方法の検討を完了



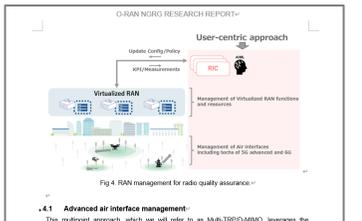
#### 実時間制御に向けた高度化手法の確立



フィールド実証による通信品質の安定化を確認し、実用性を示した



ユーザセントリックRANのユースケースとGap分析に関するO-RAN nGRR RS01でのResearch Reportが承認され、規格化に向けた項目作りを順調に推進



#### 4. 特許出願、論文発表等、及びトピックス

国内出願	外国出願	研究論文	その他研究発表	標準化提案・採択	プレスリリース 報道	展示会	受賞・表彰
63 (31)	25 (19)	5 (2)	189 (77)	8 (6)	98 (21)	10 (8)	4 (2)

※成果数は累計件数、( )内は当該年度の件数です。

- (1) 国内出願、外国出願ともに、令和5年度末までで最終の数値目標を達成した。
- (2) 6G向けの検討が行われるO-RAN nGRGで、**ユーザセントリックRANのResearch Reportが承認された。**
- (3) ワイヤレス・テクノロジー・パーク(WTP)に出展し、**プレスリリースを合計2件行うことで、16件の報道が行われた。**また、2023年4月及び6月に開催されたNICT「Beyond5G/6G 日独ワークショップ」への出展、電子情報通信学会総合大会の企業ブースで成果アピールを行った。
- (4) 2023年7月、12月、及び2024年3月に研究開発運営委員会を開催し、研究開発の進め方について委員から活発な議論が行われた。

#### 5. 今後の研究開発計画

##### 1-a: テラヘルツ帯近傍伝搬モデル化

- 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、3次元的な散乱測定・解析技術を確認。実際の衣服や建材の散乱モデルを構築する。また雨による散乱も含めたモデルを作成し、10代以上の送受信機が同時に存在する場合のシステム設計手法を確認する。さらに300GHz帯進行波管の原理確認をし、帯域幅2GHzの高速変動現象の測定技術を確認する。
- 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。
- 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。
- 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

- 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。
- 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

- 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。
- 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。

##### 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での伝送を実現する。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。

##### 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。