

革新的情報通信技術研究開発委託研究

Beyond 5G 機能実現型プログラム

基幹課題 研究計画書

課題 004

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



1. 研究開発課題

『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』

2. 目的

2030 年代の導入が見込まれている次世代通信規格 Beyond 5G は、5G において進められてきたサイバー空間とフィジカル空間の一体化（CPS：Cyber Physical Systems）をより一層加速させ、Society 5.0 のバックボーンとして中核的な機能を担うことが期待されている。CPS では、フィジカル空間のセンサーからの膨大な情報がサイバー空間に集積される。サイバー空間では、このビッグデータを人工知能（AI）などが解析し、その解析結果がロボットなどを通して人間にフィードバックされ、これまでには出来なかった新たな価値が産業や社会にもたらされる。具体的には、オンライン診療、特に遠隔からの外科手術などの実現が考えられる。災害地や離島などの遠隔地を含む医療現場から配信される超高画質な映像を低遅延で共有し、遠隔地に勤務する複数の医師が共同で医療行為を実施することが可能となる。その他、遠隔からの建機操作も有望なユースケースである。施工現場から配信される超高画質な映像を、遠隔にいる複数の作業員間で、低遅延で共有することで、作業員の負担を軽減しつつ、共同での作業遂行が可能となる。

このような社会を実現するため、Beyond 5G 時代のネットワークでは、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ことが重要となる。5G までは、基地局の最適配置によってサービスエリアを提供するセルラーアーキテクチャが採用されている。この場合、基地局からの距離やユーザの場所によって、通信品質が大きく左右され、あらゆる場所で高い無線品質を提供出来ないという課題がある。例えば、セル境界では基地局間の干渉によって、ユーザの無線品質が低下することがこれまでも指摘されてきた（セル境界問題）。また、ユーザが利用する端末においても、そのサイズや電力などの制限があり、上り回線において十分な容量が得られないなどの課題もある。

本研究開発課題では、Beyond 5G 時代に求められる、ユーザが存在するありとあらゆる場所で上り回線も含めた高い通信品質を提供するために、ユーザが利用出来るアンテナと送受信機を、ユーザが利用する端末（以下ユーザ端末）に存在するものだけでなく、その周辺にある中継機能を有するデバイス（以下中継デバイス）までを含み、仮想的に複数のアンテナを持つ端末として拡張し、複数の中継デバイスを通じてユーザ端末と基地局間で連携して通信する、「端末拡張型無線通信システム」について研究開発を行う。この方式は、ユーザ周辺に大規模かつ稠密に分散して配置された基地局を連携させ、基地局間の干渉を軽減することによりセル境界問題が解決され、また、複数の中継デバイスを広帯域なテラヘルツ帯無線で接続して通信を行うことにより、ユーザ端末にかかるサイズや電力などの制限を払拭し、中継デバイスから基地局に向けて送信することにより、上り回線での容量を拡大することができる。これにより、ユーザ端末のサイズに制約されることなく利用可能なアンテナ数を増加させ、上り回線での Multiple Input Multiple Output（MIMO）の多重効果の拡大が期待出来る。

この端末拡張型無線通信システムの実現のためには様々な解決すべき課題がある。まず、ユーザ端末と周辺中継デバイスとの間を広帯域なテラヘルツ帯無線で接続するために必要な RF フロントエンド、アンテナ等のテラヘルツ帯 RF 構成技術の研究開発を実施する。次にユーザ端末と中継デ

バイスとの間をテラヘルツ帯で接続した場合に、テラヘルツ帯無線の課題である位相雑音や非線形歪みなどに起因して、ユーザ端末が基地局と直接接続する場合に比べて、無線信号品質の劣化が想定される。そこで、これらの無線信号品質の劣化要因を、ユーザ端末と基地局とが連携して補償する、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の研究開発を実施する。さらに、ユーザ端末の周辺に大規模かつ稠密に分散して展開された基地局を連携させることで、従来のセルラーアーキテクチャで課題となっていた、セル境界での基地局間干渉による無線信号品質の劣化を軽減する。端末周辺の多数の基地局からの無線信号品質、端末の移動状況、使用中のアプリなどのユーザの状況や、伝送路や計算機の利用状況などを考慮して、ユーザが必要とする通信品質を、いつでもどこでも提供する、端末拡張型無線通信システムの構築、制御技術の研究開発に取り組む。

これらの取り組みを通じて、テラヘルツ帯などの高い周波数の活用機会を拡大することで、周波数移行を促進し、電波の有効利用に資することが可能となる。また、テラヘルツ帯などの高い周波数の普及において必要となる各種国際標準化についても取り組む。

なお、本課題は、「Beyond 5G 研究開発促進事業 研究開発方針」（令和3年1月28日総務省国際戦略局）における「3. 研究開発項目」の「① Beyond 5G 機能実現型プログラム」（p.3）のうち、ア）開発目標（数値目標等）を具体的かつ明確に定めてハイレベルな研究開発成果の創出を目標とし、研究計画書を作成し、実施者を公募する課題（基幹課題）として実施する。

また、本課題においても重要な要素技術であるテラヘルツ帯などの超広帯域電子デバイスについては、国内において総務省のプロジェクト等により、化合物系半導体デバイスやシリコン集積回路によるRFフロントエンドなどの研究開発が世界に先駆けて進められてきた。今回の研究開発では、引き続きこれらの成果を活かして、Beyond 5G の無線通信システムの実現に向けた研究開発に取り組み、我が国の産業の競争力強化に繋げる。テラヘルツ帯などの超高周波数帯の研究開発は、デバイスに用いる素材検討などの基礎研究も必要とされる段階にあることから、2030年の実用化に向けて、早期に着手するものとする。

3. 内容

本委託研究では、以下の3つの研究開発項目に対し、研究開発を推進するものとする。

- **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

本項目では、ユーザ端末と、複数の中継デバイス間をテラヘルツ帯無線で接続するためのRF構成技術として、テラヘルツ帯におけるRFフロントエンド、アンテナ、電波伝搬モデルの研究開発を行う。

- **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

本項目では、超広帯域を実現する際の課題である、位相雑音や増幅器の非線形特性などを補償する、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について研究開発を行う。これにより、テラヘルツ帯無線で接続された複数の中継デバイスを用いて、ユーザ端末でMIMO信号処理を実現する。

・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

端末拡張型無線通信システムにおいては、セル境界での無線品質低下の無いネットワークを目指し、大規模かつ稠密に配置した基地局を活用することが想定される。設置される基地局は、アンテナ自体の性能だけでなく、設置形態（固定・移動）、計算機資源の併設、バックホール回線といった要素が多様化すると考えられる。このため、高い周波数帯の利用、及びユーザ端末の移動や通信トラフィックの状況を考慮したアンテナの配置、仮想化された無線アクセス網（RAN）基盤を前提としたリソース分配、セル境界での無線品質低下を解消するユーザ端末収容及び無線信号処理の実現の各手法が必要となる。本項目では、前述の手法を実現することで、端末拡張型無線通信システムの構築に必要な技術を確立する。

技術の評価に際しては、「仮想空間における電波模擬システム技術の高度化」で開発している電波模擬システムの活用を前提とする。

4. アウトプット目標・アウトカム目標

・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 RF フロントエンドやテラヘルツ帯アンテナを実現するとともに、その設計に必要な電波伝搬モデルを確立する。ユーザ端末と4台以上の複数の中継デバイスの接続を確立した上で、中継デバイス当たりの通信速度が18Gbps以上となることを実証する。

2024年度末におけるアウトプット目標（最終目標）

テラヘルツ帯 RF 構成技術を適用したユーザ端末とその周辺に4つ以上の中継デバイス間の接続を確立した上で1中継デバイス当たりの通信速度が18Gbps以上となることを実証する。

2022年度末におけるアウトプット目標

ユーザ端末と複数の中継デバイスからなる、テラヘルツ帯 RF 構成技術の検証用環境を構築し、ユーザ端末との中継デバイス間の電波伝搬モデルを確立する。その内、1つの中継デバイスとユーザ端末との間で、通信速度が片偏波で9Gbps以上となることを実証する。加えて、4台の中継デバイスを接続した際に、ユーザ端末と複数の中継デバイス間で、通信速度がトータルで18Gbps以上を確保できることを計算機シミュレーションなどにより確認する。

アウトカム目標

- 2025年 研究開発成果に基づく、実機による端末拡張型無線通信システムプロトタイプ提示
- 2027年 世界無線会議（WRC）での無線通信規則への反映完了
- 2028年 ユーザ端末とその周辺にある中継デバイスをウェアラブル可能なサイズに小型化
- 2030年 ユーザ端末とその周辺にある端末拡張に用いる中継デバイスの商用化を実現

(ただし、ステージゲート評価後も研究を継続した場合)

• **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

超広帯域を実現する際の課題である、位相雑音や増幅器の非線形特性などを補償する、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を確立する。また、確立した信号処理技術を用いて、ユーザ端末と4台以上の中継デバイス間の通信速度が、75Gbps以上となることを実証する。さらにユーザ端末から4台以上の中継デバイスを介した基地局への上り回線の通信速度が、非圧縮ウルトラハイビジョン映像を伝送可能な、75Gbps以上となることを実証する。

2024年度末におけるアウトプット目標（最終目標）

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を、ユーザ端末とその周辺にある中継デバイスに適用し、端末拡張型無線通信システムとしての統合実証実験を行う。ユーザ端末と中継デバイス間を多重化し、ユーザ端末と4台以上の中継デバイス間の通信速度が75Gbps以上となることを実証する。さらに、ユーザ端末から4台以上の中継デバイスを介した基地局への上り回線の通信速度が75Gbps以上となることを実証する。

2022年度末におけるアウトプット目標

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を用いて、ユーザ端末と中継デバイス間を多重化した際に生じるオーバーヘッドを軽減し、ユーザ端末と4台以上の中継デバイス間の通信速度が75Gbps以上となることを、計算機シミュレーションなどにより確認する。

アウトカム目標

2025年 研究開発成果に基づく、実機による端末拡張型無線通信システムプロトタイプ提示

2027年 国際標準(3GPP)への仕様反映完了

2028年 商用プロトタイプ装置を用いた実証実験の実施

2030年 商用導入の本格開始

(ただし、ステージゲート評価後も研究を継続した場合)

• **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

上り回線において、ハイビジョン映像を伝送可能な1.5Gbps以上のスループットを、95%以上の時間率で確保するためのシステム構築・制御技術を確立する。

2024年度末におけるアウトプット目標（最終目標）

計算機シミュレーションなどで実環境を想定した評価を行い、1.5Gbps以上のスループットを確保可能な時間率が、95%以上となることを確認する。また、端末拡張型無線通信シ

システムの検証システムを構築し、研究開発項目 1、研究開発項目 2 及び研究開発項目 3 での統合実証試験を行い、複数のユーザ端末が複数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。

2022 年度末におけるアウトプット目標

ユーザ端末や中継デバイスを収容する、端末拡張型無線通信システムのテストベッドを構築する。本テストベッドの計算機資源やアンテナを用いて、上り信号の復調が可能なことを確認する。また、上り回線において 1.5Gbps 以上のスループットを確保可能な時間率を、80% 以上確保できることを、計算機シミュレーションなどにより確認する。

アウトカム目標

- 2025 年 研究開発成果に基づき、実機による端末拡張型無線通信システムプロトタイプ提示
- 2027 年 国際標準（3GPP、O-RAN など）への仕様反映完了
- 2028 年 商用プロトタイプ装置を用いた実証実験の実施
- 2030 年 商用導入の本格開始
(ただし、ステージゲート評価後も研究を継続した場合)

5. 採択件数、研究開発期間及び研究開発予算等

採択件数 : 研究開発項目 1、研究開発項目 2、研究開発項目 3 ごとに 1 件。

研究開発期間：契約締結日から 2024 年度（2022 年度に実施するステージゲート評価を踏まえ、継続の必要性等が認められた場合には、2024 年度まで継続予定。ステージゲート評価や Beyond 5G 研究開発促進事業の後年度予算の状況等により、研究開発期間を変更する場合がある。認められなかった場合 2022 年度末で終了。）。

研究開発予算：各年度、研究開発項目 1、研究開発項目 2、及び研究開発項目 3 を合わせて総額 1,200 百万円（税込）を上限とする（提案の予算額の調整を行った上で採択する提案を決定する場合がある。ステージゲート評価や Beyond 5G 研究開発促進事業の後年度予算の状況等により、各年度の研究開発予算を変更する場合がある。）。

研究開発体制：単独の提案も可能であるが、産学官連携等による複数の実施主体からなる体制とすることを推奨する。その際、社会実装を考慮した体制とすること。

6. 提案に当たっての留意点

- 研究開発項目 1、研究開発項目 2 及び研究開発項目 3 のいずれか又は複数の研究開発項目に提案することができる。複数の研究開発項目に応募する場合、提案書は一つにまとめること。
- 提案書には、ステージゲート評価後 2024 年度まで実施することを仮定して、2024

年度までの計画を記載すること。

- 具体的目標に関しては、2022 年度後半のステージゲート評価を受ける際の間目標と、当該評価で継続が認められた場合の 2024 年度の最終目標について、定量的に提案書に記載すること。
- 本研究開発の遂行過程で得られるデータについては、広くオープンにするのが望ましいことから、公開できると想定するデータがある場合には、その公開や利活用促進に関する計画（例：公開するデータの種類、公開先、公開方法等）を提案書に記載すること。なお、本項目は採択評価時の評価項目とする。
- 本委託研究で研究開発する技術について、具体的に Beyond 5G の実現にあたりどのような分野のどのような知的財産の取得が期待できるのか、何件程度の特許出願を目指すのか、また、知的財産の取得とともに標準化活動の推進も重要であることから、どのような分野のどのような標準の策定が期待できるのか、どのような標準化活動を推進するのか、知財戦略と標準化戦略をどのように一体的に推進しようとしているかについて提案書に記載すること。なお、本項目は採択評価時の評価項目とする。
- 外国の民間企業、大学、アライアンス、コンソーシアム等との連携体制が構築できている又は計画している場合には、具体的な連携の方法について提案書に記載すること。なお、本項目は採択評価時の評価項目とする。
- 実施体制については、本研究開発の目的に則した実施体制を構築することとし、それぞれの役割を明記すること。
- 研究開発の実施に当たっては、関連する要素技術間の調整、成果の取りまとめ方等、研究開発全体の方針について幅広い観点から助言をいただくとともに、実際の研究開発の進め方について適宜指導をいただくため、学識経験者、有識者等を含んだ研究開発運営委員会等を開催する等、外部の学識経験者、有識者等を参画させること。
- 本研究開発成果の社会実装に向けて、到達目標の項目に記載したマイルストーンを意識しつつ、具体的な時期（目標）、体制、方策等を記載すること。その際、持続的に自走するための計画等についても記載すること。
- 研究開発成果の情報発信を積極的に行うこと。

7. 運営管理

- 複数の機関が共同で受託する場合には、代表提案者が受託者間の連携等の運営管理を行い、受託者間調整会議を定期的を開催すること。
- 国立研究開発法人情報通信研究機構（以下「機構」という。）と受託者の連携を図るため、代表提案者は、機構の指示に基づき定期的に連絡調整会議を開催すること。
- 社会情勢や研究環境の変化等、必要に応じて、機構が研究計画書を変更する場合があるので、留意すること。

8. 評価

- 機構は、研究開発終了時に終了評価を実施する。2022 年度後半において、評価委員会に

よる評価（ステージゲート評価）を実施し、継続の必要性等が認められた場合には、2024年度まで委託研究を継続し、2024年度末に委託研究を終了する。評価の結果、継続性の必要性が認められなかった場合は2022年度末に終了とする。

- 機構は、本委託研究終了後に成果展開等状況調査を行い、追跡評価を行う場合がある。
- 機構は、上記以外にも本委託研究の進捗状況等を踏まえて、臨時にヒアリングを実施することがある。

9. 成果の社会実装等に向けた取組み

- Beyond 5Gの実現を支える技術として、知的財産戦略及び標準化戦略、さらには製品化と海外市場への展開戦略を記載するとともに、知財獲得に向けて必要な取組みを視野に入れること。
- 実用化、事業化、社会実装に向けた出口戦略を明確とすること（委託研究後の事業化等の内容を明確にする）。
- 上記の出口戦略を実現するため、場合によっては本委託研究で得られた成果のオープン化（例えば、成果発表やそれに留まらずコミュニティ先導のための国際ワークショップや国内特別セッション主催、展示、標準化、オープンソース化等）も行う等、成果の社会実装等に向けて必要な取組みを行うこと。

参考

「仮想空間における電波模擬システム技術の高度化」については以下のWEBを参照すること。

<https://www.tele.soumu.go.jp/j/sys/fees/purpose/emulator/index.htm>

研究開発項目 1 関連

テラヘルツ帯の送信機（※1）、パワーアンプ（※2）等のコンポーネント、および高利得アンテナ（※3）に関わる個々の研究開発事例

（※1）藤島，“300GHz帯無線通信と超高周波CMOS集積回路の基礎”，MMWE TH6B-2.

（※2）H. Hamada, et al, "300-GHz-Band 120-Gb/s Wireless Front-End Based on InP-HEMT PAs and Mixers", IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2020.

IEEE JOURNAL OF SOLID-STATE

（※3）I. Abdo, et al., "A 300GHz-Band Phased-Array Transceiver Using Bi-Directional Outphasing and Hartley Architecture in 65nm CMOS," IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC), Feb. 2021.

研究開発項目 2 関連

ITU-R WP5Dで議論がスタートしている2030年以降に向けたIMT進化のための将来技術動向検討(※1)、ITU WRC-19でIMTバンドとして特定されたミリ波の周波数帯(※2)

(※1)<https://techblog.comsoc.org/2020/10/16/itu-r-future-technology-trends->

[for-the-evolution-of-int-towards-2030-and-beyond-including-6g/](#)

(※2) https://www.soumu.go.jp/main_content/000688751.pdf

研究開発項目 3 関連

2030 年代のネットワークの特性の一つとして“supporting various high availability options from physical layer to application layer”の記載がある ITU-T FG NET-2030 の technical paper (※1)、“the major expectations from 6G networks”の一つに“Non-limiting connectivity”の記載がある 5GPP COREnet の report (※2)、高速大容量、低遅延、高信頼性、端末モビリティ等の組合せによる、5G 時代に比べ、多様な通信品質が要求されることの記載がある ITU-T FG NET-2030 の technical report (※3、※4) 5G で求められサービスの品質基準として、5th percentile user spectrum efficiency (5%周波数利用効率) の規定がある ITU-R 報告 M.2410 (※5)

(※1) https://www.itu.int/en/ITU-T/focusgroups/net2030/Documents/Network_2030_Architecture-framework.pdf

(※2) Deliverable D2.1: Initial Vision and requirement report
<https://5g-ppp.eu/providing-a-roadmap-for-core-components-and-subsystem-technologies-for-beyond-5g-and-6g-networks/>

(※3) https://www.itu.int/dms_pub/itu-t/opb/fg/T-FG-NET2030-2020-SUB.G1-PDF-E.pdf

(※4) https://www.itu.int/en/ITU-T/focusgroups/net2030/Documents/Additional_use_cases_and_key_network_requirements.pdf

(※5) https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2410-2017-PDF-E.pdf