

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 005

Beyond 5G 超大容量無線ネットワークのための
電波・光融合無線通信システムの研究開発



1. 研究開発課題

『Beyond 5G 大容量無線ネットワークのための電波・光融合無線通信システムの研究開発』

2. 目的

サイバー空間（仮想空間）とフィジカル空間（現実空間）を高度に融合させたシステムにより、経済発展と社会的課題の解決を両立する、人間中心の社会、Society5.0 を実現するためには、IoT、ロボット、センサネットワーク、パーソナルモビリティ、遠隔医療、超高精細映像・AR/VR等の社会実装によるデジタル・トランスフォーメーション（DX）が求められている。DXにより、新しい社会・経済革命（産業構造変革、新産業創出、社会システム再構成、知的生産活動の高度化、生活様式の多様化等）が期待されている。それゆえ、将来の通信システム・通信インフラには、数多くのスマート端末・センサ、ロボット・ドローンからのビッグデータや、4K/8Kクラスのスーパーハイビジョン放送、AR/VRメディアを自在に伝送できることが求められ、高速大容量伝送特性・低消費電力に加えて、低遅延性、多数接続性等のネットワークの拡張性への要求が一層高まると考えられる。

世界各国で導入が進められている第5世代移動体通信システム（5G）においては、eMBB（高速性）・URLLC（低遅延性）・mMTC（多接続性）という Society 5.0 実現のために重要な性能軸が規定されている。5Gの普及・浸透とともに、4GをコアとするLTE/NRネットワークから5Gコアネットワーク、モバイル・エッジコンピューティング、ネットワークスライシング等への移行が進むと考えられる。5Gは4Gに比べて優れた通信環境・サービスをもたらすが、DXによる多くの果実を得るためには、さらなる通信システムの高度化・高性能化が求められる。それゆえ、現在5G、5G-NRにおける利用周波数は28GHz、52GHz（80GHz）までが想定されているが、来るべきBeyond 5G（B5G）においては、超高速性を担保するために、これらより高い、搬送波周波数100GHz以上のテラヘルツ帯の導入が必須となる。無線搬送波のさらなる高周波化により、数10～100Gbps級の超高速大容量伝送が可能となると同時に、無線通信セルサイズが5Gよりもさらに小さくなり、中継局数がユーザ数と同程度（あるいはユーザ数以上）になるといわれ、周波数の再利用により周波数利用効率が飛躍的に向上し、電波資源の有効利用が可能となる。一方、この電波資源の有効利用を達成するためには、空間的に分散した大量の中継局を地理的・経済的効果を鑑みながら光ファイバ、空間光及びテラヘルツ波による無線通信を組み合わせることで、制御局との間の通信を確立しなければならない。そのため、電波・光融合無線通信システム技術を開発し、数10～100Gbps級の大容量データを機動的に伝送・配信するフロントホールを実現する必要がある。また、ユーザ利用のIoTデバイス等を含めると10平方メートル当たり1000個のデバイス数が想定されている。このような膨大な数のIoTデバイス等で、1デバイス当たり100Mbps以上の大容量データ伝送を仮定すると、10平方メートル当たり100Gbps級の中継局構築が必要となることから、大量の中継局と制御局間をシームレスに接続する100Gbps/channel級の伝送システム技術が必要となる。

本研究開発では、光ファイバや空間光等、伝送路上の光信号とテラヘルツ帯無線信号を超高速に超低遅延で相互変換することにより、B5Gで課題になる大量の中継局と制御局間をシームレスに接続するための技術を開発する。具体的には、

- ・総帯域幅 50GHz 相当の無線信号伝送のための光⇄テラヘルツ波広帯域相互変換技術及びトラン

シーバ技術

- 屋内外で使用可能かつ 100Gbps/channel (ch) 級の搬送波帯信号を伝送可能な高速光無線接続技術及びトランシーバ技術
- 無線波形信号配信のための光信号処理技術

を開発することを目的とする。

本研究により、B5G モバイルネットワークにおいて、搬送波周波数のさらなる高周波への移行を促進すると共に、壁などの遮蔽物が多く存在する環境においては、光ファイバまたは空間光を用いた広帯域な無線波形伝送技術により、フロントホールにおける多数の中継局等への接続時に発生する大量の電波の空間放射を抑制し、周波数資源の利用効率を向上することで、電波の有効利用に資する。

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。

3. 内容

本研究では、B5G モバイルネットワークの構成に必要な、光とテラヘルツ帯の伝送メディア変換ハードウェア（トランシーバ等）の技術開発として以下の研究開発項目を実施する。本研究で想定されるユースケースは、室内・工場等のスマートロボットや、データセンタ内等の機器・装置間通信、ビル間・ビル内通信、河川等で有線系ネットワーク敷設が困難な領域の通信エリア形成、ドローン型監視カメラ等のポイント・ポイント間大容量接続、さらに監視用・搬送用ドローンや車椅子等のパーソナルモビリティの自動運転の運行支援・管理システムが考えられる。最終年度では、これらユースケースを想定し、その社会実装仕様を検討した上で、それに沿ったフィールド実証実験を行う。

• 研究開発項目1 光⇄テラヘルツ帯の相互信号変換技術及びトランシーバ技術

移動体等に対してスケラブルに拡張可能で通信速度 50Gbps/ch 以上の送受信を実現するため、光とテラヘルツ帯の総帯域幅 50GHz 以上の広帯域相互信号変換技術及び、移動体と光ファイバ通信網をシームレスに繋ぐ大容量データ伝送技術の研究開発を行う。キャリア周波数 100GHz 以上のテラヘルツ波による高速大容量通信を可能とする光ファイバ無線用トランシーバの開発を行う。具体的には、キーとなる超高速電子デバイス、光デバイス集積実装技術の開発を行い、さらにそれらを用いたモジュール、トランシーバの開発を行う。また、開発したトランシーバを用い、50Gbps/ch 以上の高速無線通信が可能であることの実証とともに、上記ユースケースの実利用シーンを想定し、それに沿った実フィールド実験を実施する。

• 研究開発項目2 高速光無線接続技術及び光無線トランシーバ技術

多数の中継局等を含むアクセス/ショートリーチ通信ネットワークの柔軟性向上のための、空間ダイバシティ等を考慮した高い見通し外耐性を有する、高口バスト・大容量な 100Gbps/ch 以上の低コスト光無線伝送技術の研究開発を行う。固定通信距離 500m以上の光無線通信で、かつデー

タ速度 100Gbps/ch 以上の高速通信が可能となる小型、低コストな光無線用トランシーバの開発を行う。また、将来の電波・光融合通信ネットワーク構築に資する技術開発として固定通信に加え、移動時も光無線リンクが安定的に形成可能となるような光無線用トランシーバ技術の開発を行う。さらに、伝送距離 1 km以上の拡大に向け、光無線伝送の中継技術の開発を実施する。開発した光無線トランシーバにより 100Gbps/ch 以上の高速無線通信が可能であることを実証するとともに、上記ユースケースの実利用シーンを想定し、それに沿ったフィールド実験を実施する。

・研究開発項目3 無線信号配信のための光信号処理技術

光ファイバ網に接続された中継局へのテラヘルツ波等の無線信号配信のための光信号処理技術の研究開発を行う。テラヘルツ波のための光ファイバ無線伝送において、光ファイバによる帯域幅 50GHz 級の高速・広帯域光信号を 100 マイクロ秒以下の低遅延で数 10km 圏内のエッジ・中継局間に配信するための波形信号処理技術の開発を行う。またダウンストリームに対する光配信技術に加え、アップストリームに対する低遅延光信号処理技術開発も行い、低遅延に向けた 100GHz 以上のキャリア周波数に対応する超高速光変調デバイス技術開発も行う。

4. アウトプット目標・アウトカム目標

以下の到達目標と研究開発後のマイルストーンを考慮した研究提案を行うこと。

・研究開発項目1 光⇄テラヘルツ帯の相互信号変換技術及びトランシーバ技術

2024 年度末におけるアウトプット目標（最終目標）

- a. 光ファイバ無線における総帯域幅 50GHz 以上の光信号を、キャリア周波数 100GHz 以上のテラヘルツ帯へ相互変換する高周波電子デバイスの設計技術を確立する。
- b. 同電子デバイスを用いたテラヘルツ帯高周波デバイス実装技術の確立及びモジュールサイズ（10mm×40mm×10mm）以下の小型モジュールを開発する。
- c. キャリア周波数 100GHz 以上で動作可能な光ファイバ無線のために、光信号をテラヘルツ帯へ高効率で変換を行う光デバイス技術を確立する。光電気変換効率は 0.6A/W 以上とする。
- d. 同光デバイス技術を用いた光⇄テラヘルツ波変換デバイスの光・高周波集積実装技術の確立及び小型モジュールを開発する。（光ファイバとの光結合効率>50%）
- e. テラヘルツ帯電子デバイス（上記 a,b）と光⇄テラヘルツ波変換デバイス（上記 c, d）技術を融合し、キャリア周波数 100GHz 以上で動作可能な光ファイバ無線用・小型トランシーバ（15cm x 15cm x 7cm 以下）の開発及び同トランシーバを用いた伝送速度 50Gbps/ch 以上の通信実証実験を達成する。
- f. 研究課題項目2と連携し、多数接続性を考慮した親リンク（光無線）とエンドユーザに向けた末端リンク（光⇄テラヘルツ波無線）間もしくはその逆のリンクプロセス間のシームレス接続を想定した伝送システムにおける光⇄テラヘルツ波用光ファイバ無線トランシーバの動作検証を行う。
- g. キャリア信号周波数 100GHz 以上の光⇄テラヘルツ波用光ファイバ無線トランシーバを用い、歩行及び軽車両等のパーソナルモビリティによる市中内移動シーンを想定し、移動

体・中継局間の距離 10m 以上とした 50Gbps 以上の接続を達成する。

2022 年度末におけるアウトプット目標

- a. 100GHz 以上の信号を送信する出力回路の実現と、その入力信号を光信号とした場合に必要の変換回路の実現。及び、上記回路を安定に動作させるバイアス回路を実現し一体型送信電子デバイスの試作評価を行う。
- b. 光⇄テラヘルツ帯の信号変換デバイスの開発を進め、周波数帯域 70GHz 以上の動作を達成するとともに、同チップ搭載によるモジュール（パッケージ）開発も同時に進める。

アウトカム目標

2025 年

- 100GHz 超テラヘルツ波 光ファイバ無線用トランシーバ・モジュール商品化を実現

2026 年

- 小規模フィールド実証実験。高速、低遅延通信に貢献
- 100GHz 超テラヘルツ波 光ファイバ無線システムの試験導入を実現

（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 高速光無線接続技術及び光無線トランシーバ技術

2024 年度末におけるアウトプット目標（最終目標）

- a. 固定無線時、振動・大気等変動に対する耐性強化を行った 100Gbps 級以上の伝送性能を有する光無線トランシーバの技術開発を行い、通信距離 500m 以上、視野角 5 度以上、損失 15dB 以下を達成する。ただし、光無線トランシーバの動作波長はアイセーフを考慮した近赤外帯域とする。
- b. スマートロボット、パーソナルモビリティ、搬送用ドローンなどの移動時に対しても高速通信が可能となる光無線トランシーバ技術開発を行い、距離 500m 以上、視野角 20 度以上、角速度 10 度/sec 以上（5m 先で時速 3 km 以上の移動体を想定）、損失 20dB 以下を達成する。伝送速度 100Gbps 以上とし、移動の高速化による伝送速度低下は認められる。
- c. 移動時視野角範囲において、ダイバシティ受信等により高い見通し外耐性が確保されること。
- d. 光無線トランシーバは小型化（サイズ 20cm x 20cm x 30cm 以下）を目標とする。
- e. 光無線伝送用の中継技術の開発を行い、中継 1 回で 1 km 以上の伝送距離を達成する。
- f. 研究課題項目 1 と連携し、中継局等の多数接続性を考慮した光無線とエンドユーザに向けた末端リンク（光⇄テラヘルツ波無線等）の間もしくはその逆のリンクプロセス間のシームレス接続を想定した伝送システムにおける光無線トランシーバの動作検証を行うこと。

- g. パーソナルモビリティによる市中内移動シーン等の上記のユースケースを想定し、光無線通信の場合、固定及び移動時ともにフィールド実験を実施。特に移動時はドローンなどによる高画質空撮を試みる。固定通信では最大距離 500m として伝送速度 100Gbps のコネクションをフィールド実証にて達成する。

2022 年度末におけるアウトプット目標

- 固定設置による光無線伝送にて、通信速度 25Gbps 以上、通信距離 250m 以上、損失 15dB 以下を達成する。
- 移動体搭載による光無線伝送にて、通信速度 10Gbps 以上、通信距離 100m 内、損失 25dB 以下、移動体の角速度 5 度/sec を達成する。

アウトカム目標

2025 年

- 100Gbps 超光無線通信トランシーバ商品化（固定局間通信）を実現し、コストダウンと耐環境性能向上に関する検討を実施

2026 年

- 小規模フィールド実証実験。高速、低遅延通信に貢献
- 100Gbps 超光無線通信トランシーバの商品化を実現（固定局—移動局間通信）

（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 無線信号配信のための光信号処理技術

2024 年度末におけるアウトプット目標（最終目標）

- 光ファイバを用いて帯域幅 50GHz 級の信号（たとえば 50Gbps 級の ASK 等）を低遅延で伝送するための信号配信デバイスの設計技術を確立する。伝送経路上の光や電気の信号処理回路を最小限とし、50 Gbps ASK 等の信号を遅延時間 100 マイクロ秒以内でエッジ—アンテナ—ユーザ間の往復 10km 伝送を可能とする技術を達成する。
- RF 端末多接続性向上のための位置推定技術を開発する。20m 離れた位置から 50cm 以内の精度で端末位置推定可能とする。
- 低遅延、多接続アップストリーム信号配信のために、周波数 100GHz 以上の無線信号を光信号に直接変換する超高速光変調デバイスを開発し、光変換効率（搬送波／側波帯比）で -30 dB 以上を達成する。

2022 年度末におけるアウトプット目標

- 光ファイバを用いて帯域幅 50GHz 級の信号を低遅延で伝送するための信号配信デバイスの設計手法を構築する。
- 端末の多接続性向上のための位置推定技術の基本動作を実証する。

- c. 低遅延、多接続アップストリーム信号配信のための超高速光変調デバイスの動作解析、設計手法を構築する。

アウトカム目標

2025年

- 信号配信デバイスの製品プロトタイプの実現
- 端末位置制御装置のプロトタイプ試作と実運用を見込んだデータ蓄積
- 超高速光変調デバイスの製品プロトタイプの実現

2026年

- 信号配信デバイス及び超高速光変調デバイスの製品化
- 端末位置制御装置のシステム製品プロトタイプの実現

(ただし、ステージゲート評価後も研究を継続した場合)

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800百万円（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 B5G 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で開催すること。
- 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。
- 本課題はアクセス/ショートリーチ通信ネットワークに資するハードウェアの研究開発であり、B5G におけるネットワークアーキテクチャやオペレーション、ユースケースや利用シーンに合わせたハードウェア開発が必要である。そのため早期社会実装を念頭に、ネットワーク・オペレータ等のハードウェアの利用主体と見込まれる企業等を委員とする運営連絡会を設置し、定期的な報告・議論を実施すること。
- 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

- B5G 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。特に、3GPP や ITU-T、ITU-R 等へは早期の技術寄書提案により、国際的コンセンサスの獲得に取り組むこと。
- 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。さらに本研究で得られた成果技術・成果物等を以て国際連携を図り、将来的な技術の国際展開を積極的に図ること。

参考

- 2021 年 3 月に 360 度追尾可能な「トラッキング光無線通信技術」が実証されている。B5G 時代の光無線のユースケースについても議論がなされている。本研究ではさらなる大容量化を念頭に、光ファイバ網との接続性を考慮した光無線トランシーバやテラヘルツ波光ファイバ無線トランシーバの開発を目標としている。
https://www.softbank.jp/corp/news/press/sbkk/2021/20210318_01/
- 2020 年 12 月にミリ波帯光ファイバ無線による 100Gbps 級大容量伝送が情報通信分野の著名国際会議に採択されており、100Gbps 級を超える無線通信技術が世界のトレンドとなりつつある。本研究課題はいち早く 100Gbps 級またはスケラブルに拡張可能な 50Gbps/ch 級のトランシーバ技術を社会実装することを目標としている。
D. T., Pham et al, “132 Gb/s 3×3 Full MIMO Fiber-Wireless Seamless System in W Band Using WDM/PDM RoF Transmission,” ECOC2020, Th2G-6.
- 光ファイバ無線技術に関する標準化関連文章は 2020 年に改定されている。： “Radio over fibre systems,” ITU-T G.9803
- 光無線システムに関する標準化がなされているが、100Gbps 級大容量伝送に関する寄書

は無い。

” Co-location longitudinally compatible interfaces for free space optical systems,” ITU-T G.640

- 海外企業より固定光無線装置にて、距離 1500m で 10Gbps/ch が製品・実用化されている。また研究レベルでは固定距離 200m で 40Gbps/ch の報告がなされている。本研究課題は 100Gbps 級で 500m 長に対応した小型トランシーバをターゲットとしている。E. Ciaramella, et. al, “1.28-Tb/s (32 x 40 Gb/s) Free-Space Optical WDM Transmission System” , IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 21, No. 16, pp. 1121-1123, August 15, 2009
- 光⇒電気変換デバイス（フォトディテクタ）において、研究レベルでは帯域幅 110GHz 超、感度 0.2A/W が報告されている。本研究課題では光電変換効率の目標値を 0.6A/W と高く設定し、さらに光デバイスと高周波電子デバイスの集積実装による数 dBm 級の高出力信号生成を目指している。

T. Umezawa, et. al, “Bias-free operational UTC-PD above 110 GHz and its application to high baud rate fixed-fiber communication and W-band photonic wireless communication,” IEEE J. of Lightwave Tech., VOL. 34, NO. 13, pp. 3138-3147, July 1 (2016)