

## ＜基本計画書＞

### 無線・光相互変換による超高周波数帯大容量通信技術に関する研究開発

#### 1. 目的

5G の商用サービスがスタートし、ユーザスループットとして 1Gbps を超える高速モバイル通信が普及しつつある。しかし、瞬間ピークレート 20Gbps を目指す 5G (3GPP における要求仕様) において、リモートアンテナ局と基地局内ベースバンドユニットを結ぶデジタル伝送システムを用いたモバイルフロントホールの容量不足 (4G と同じ方式では 20Gbps の無線接続のためにモバイルフロントホール区間の伝送容量として 200Gbps 超が必要。) が課題となっている。端末数及び通信容量の激増に伴いスモールセルも急激な増加が見込まれるが、地理的・コスト的要因等から全ての基地局・スモールセル間に光ファイバを敷設することは困難であるため、敷設が容易で 200Gbps を超える伝送容量が確保可能な無線通信技術の開発が急務である。また、北東アジアにおけるモバイルバックホールについて、2025 年にかけて、有線通信方式に対し無線通信方式のシェアが増加することが予測されており、今後無線バックホールの需要が高まっていくことが想定される。さらに、5G の進展に当たっては、更なるユーザスループットの向上に加え、Swarm IoT 応用等の超多数接続が要求されるため基地局とリモートアンテナ局を結ぶモバイルフロントホールの必要容量が激増することが予想されている。

さらに、新型コロナウイルス感染症 (COVID-19) の感染拡大に伴い、デジタル技術を活用したテレワークや遠隔会議、教育現場での遠隔講義等のリモート化があらゆる場面で急速に広がり、社会のデジタル化やサイバー空間とフィジカル空間の一体化 (CPS : Cyber Physical Systems)、デジタル・トランスフォーメーションの進展が求められている。そこで、極めて大量のデータ流通に対応すべく、通信インフラを高度化するため、光通信技術だけでなく、高周波数帯を利用した超高速・大容量無線通信を実現する必要がある。

一方、現行のマイクロ波を用いた商用固定無線通信システムは山間部等の光ファイバ敷設困難地域を中心に、モバイル通信用の基地局と基幹通信網を結ぶ無線バックホール回線として活用されているが、それらは高々数 Gbps の伝送容量にとどまるため、モバイルフロントホールとしての利用は困難である。このため、既存の技術のみで 5G の進展に伴うモバイルバックホール・フロントホールの容量拡大に対応しようとする膨大な周波数帯域が必要となり、周波数のひっ迫が予想される。300GHz 帯においては固定および移動通信システムの開発が進められているが、複数の業務での共用が必要であることと、200Gbps 以上の高速伝送実現には帯域幅が不足するという課題がある。Beyond 5G/6G では高周波ミリ波帯の活用によりユーザサイドでの実効速度のさらなる向上が図られるが、一方で、スモールセル化によりセル半径は 100m 以下となるため、無線バックホール・フロントホールで必要となる伝送距離は 100m 程度とな

る。

また、モバイルバックホール・フロントホール以外にも、工場内における大型可動装置の遠隔操作やワンマン運転を行う鉄道における車上からのホーム監視等、光ファイバを新規に敷設することが困難な、又は有線接続ができない箇所において、短距離伝送区間における超高精細映像の低遅延無線伝送が求められている。

本研究開発では、大気減衰の大きさからこれまで利用が進んでいなかった 350GHz 以上の周波数を利用した 200Gbps 超の低遅延・大容量無線伝送を実現することで、5G における無線バックホール・フロントホールに使用する周波数帯をマイクロ波・ミリ波よりも高い周波数帯に移行することにより、将来のマイクロ波・ミリ波の周波数ひっ迫を緩和する。また、多数の短距離高速無線リンクと光ファイバリンクでネットワークを構成するためには多数の光・無線変換部が必要となるため、光・無線変換部の構成の簡素化と処理遅延の低減を行うためには、モバイルバックホール・フロントホールにおいて光信号と無線信号がシームレスに接続されることが必須となることから、光ファイバ区間とのインタフェースを簡便化した構成についても研究開発を行う。

## 2. 政策的位置付け

### ・「Beyond 5G 推進戦略－6G へのロードマップ－」

(令和2年6月30日報道発表)において「超高速・大容量といった 5G が有する特長の更なる高度化に加えて、自律性や拡張性といった新たな機能を実現するには、テラヘルツ波や光・量子、AI 等の非連続な飛躍的進化を可能とする先端技術を含む無線技術、ネットワーク技術、省エネ技術、セキュリティ技術、そして、これらの基盤となるソフトウェア関連技術等の開発・高度化・標準化が不可欠である。」旨の記載あり。

### ・デジタル時代の新たな IT 政策大綱

(令和元年6月7日：IT 総合戦略本部決定)

「【2つめの柱】官民のデジタル化の推進」において「なお、「5G の次」も視野に入れ、新たな要素技術に関する研究開発や、その円滑かつ迅速な社会実装の観点から、実世界の電波伝搬を模擬する試験環境に関する研究開発を推進する。また、産業・ビジネス創出に寄与する産学連携等を同時並行で進めることとする。」の記載あり

## 3. 目標

本研究開発は、350-600GHz 帯を利用した無線伝送基盤技術を確立し、100m 以上の距離で 200Gbps 超の伝送容量、100  $\mu$ s 程度の遅延といった、超大容量低遅延無線伝送技術の実現を目指す。また、ミリ波帯も有効活用するとともに、マルチホップ方式に対応することにより、安定的かつ長距離の伝送を実現する。

また、無線バックホール・フロントホールは光ネットワークとシームレスに接続されることが必須となるため、光信号と RF 信号を直接変換するデバイスの実現を目指す

す。その際、Beyond 5G /6G での無線セル狭小化に伴うフェムトセル基地局への信号配送を可能とするモバイルバックホール・フロントホールネットワークの低コストでの構築に資するため、光ファイバ区間とのインタフェースの簡便化を図る。

本技術の利用を通じて、5G における無線フロントホール・バックホールに使用する周波数帯を、5G で利用が想定されるマイクロ波・ミリ波よりも高い周波数帯に移行することにより、将来のマイクロ波・ミリ波の周波数ひっ迫を緩和する。

#### 4. 研究開発内容

##### (1) 概要

超高周波数帯（350–600GHz 帯）における RF 技術及び光ファイバ信号との相互変換技術を開発し、ミリ波帯域も活用した 200Gbps 超の無線伝送システムの研究開発を行うとともに、これらの技術を組み合わせたテラヘルツ波・ミリ波統合ネットワークによる大容量通信の実証実験を実施する。

##### (2) 技術課題および到達目標

###### 技術課題

###### ア テラヘルツ帯 RF 技術

本課題では、350–600GHz 帯で動作可能な通倍動作回路を基本要素とし、光ネットワークからの信号を直接無線信号に変換する化合物半導体チップを開発する。

従来の無線通信システムでは、有線（光）ネットワークからの信号をベースバンド部でデジタル化した上で波形等価・誤り訂正処理等を行った後、アナログ無線回路の変復調部に信号を受け渡すことで通信を行っている。また、必要な伝送容量の増大に伴い、ベースバンド部の回路規模が大きくなるため、従来と同様に CMOS により実現しようとする、消費電力や開発・製造コストの増加が問題となってくる。

そこで本課題では、これらのベースバンド処理は既に光ネットワーク側で行われたものを用い、比較的低コストで大容量光信号波形を無線信号に変換可能な化合物半導体デバイスで直接変換することにより行うことでこれらの問題を解決する。具体的には、信号発生部に超高速光ファイバ通信技術で開発された部材・技術を援用し、RF 部開発に注力し、最低限のリソースで実用的な化合物半導体チップの開発を目指す。また、信号受信のための周波数変換デバイスや送受信用オンチップアンテナ等の技術の開発及び実装も行う。これらを通じて、大容量無線通信システムを低遅延・低消費電力・低コストで早期実用化・展開に資することを目指す。

###### イ 光電気相互変換技術

本課題では、低位相雑音かつ高い基本発振周波数を有する光電気発振技術を基盤とし、光信号とミリ波・テラヘルツ信号を効率的に相互変換する技術の研究開

発を行う。

一般的な無線通信システムは 1GHz 程度のマイクロ波帯原振を逡倍することで無線基準信号を発生させているが、350-600GHz 帯へ逡倍するには 1GHz 原振では最低でも 350 逡倍が必要となり、その信号劣化が信号品質に影響を及ぼす。また、ガン・ダイオードによるミリ波帯原振も開発されているが、ガン・ダイオードのみで光信号に直接変換することはできず、信号品質を確保できないといった課題もある。そこで、光電気発振器により光信号から電気信号への直接変換を実現することで、高速光伝送向けに開発されたベースバンド信号処理を活用することが可能となる。

そこで本課題では、ミリ波帯周波数を基本周波数として生成可能な光電気発振器（光入出力、高周波入出力をもつ低位相雑音発振器）を開発することでテラヘルツ帯への逡倍数を削減し、信号品質の劣化の防止を図る。具体的には、光電気発振器を広帯域信号へ適用可能とする集積モジュール技術を開発し、簡便な構成で、信号形式を維持したまま帯域を大きく変化させる技術を開発する。また、光・無線変換部の構成の簡素化と処理遅延の低減を目的として、テラヘルツ帯/ミリ波帯と光ファイバ信号とを効率的に相互変換する技術を開発する。さらに 200Gbps 超の通信速度を 100GHz 程度の帯域で実現するため、光信号・無線信号の直通技術と逡倍に適した振幅多値変調等の信号形式について研究・開発を行い、周波数利用効率向上を図る。

#### ウ テラヘルツ波・ミリ波統合ネットワーク技術

本課題では、テラヘルツとミリ波を組み合わせることにより、高い可用性を有する無線ネットワーク技術の研究開発を行う。

テラヘルツ帯のアンテナは自由空間伝搬減衰を補償するために低周波数帯よりも相対的に指向性が鋭い。そのため、無線機設置時に精緻な方向調整が必要となるだけでなく、例えば、工場内等の可動装置や駅における列車停止時の列車-ホーム間の位置関係の変化や、暴風、経年変化によるアンテナ方向のずれ等が通信品質に大きな影響を及ぼすことが懸念されるなど、アンテナの方向調整にコストがかかることから、ミリ波帯リンクを用いて方向調整を自動的に行う必要がある。また、豪雨等の厳しい環境下においても可用性を維持するためには、環境変化に応じて信号形式を変化させずに適切な周波数帯へ切り替える必要がある。くわえて、テラヘルツ帯無線は自由空間伝搬減衰が大きく、単一の無線送受信機では必要な伝送距離を確保できない場合も想定される。

そこで、本課題では大容量通信のテラヘルツ帯と環境変化に比較的耐性のある通信のミリ波帯の効果的な切り替えや双方を組み合わせる技術を開発し、その実証を行う。具体的には、ミリ波帯リンクの受信状況とテラヘルツ波帯リンクの受信状況の相関について分析を行い、ミリ波受信状況からテラヘルツ帯アンテナの方向推定を行うとともに、設置時、経年変化時等のアンテナ方向を自動的に調整する技術の実装を行う。また、パケット・フレーム構造などを極力変えることな

く伝搬特性状況とユーザ要求により周波数帯を効果的に切り替え・組み合わせる伝送技術を開発することにより、接続可用性を高める制御技術の確立を行う。併せて、約 400m 離れた基地局の双方向接続を目指したマルチホップ型無線接続技術の実装を行う。その際、マルチホップ伝送時に課題となる信号劣化や伝送遅延の抑圧、各無線区間の可用性最適化によるシステム最適化についての研究を行う。

最終的に、課題ア～ウの技術を組み合わせた統合システムの構築を行い、屋内又は地下空間におけるシステム実証試験を実施する。具体的には、5G モバイルフロントホールと同等 140Gbps 超の回線容量が必要となる 8K 非圧縮映像の伝送実証を行う。

#### 到達目標

課題アについては、課題イで生成される信号を IF として用い、逓倍による 350–600GHz 帯 RF 信号を生成する送信用化合物半導体素子とテラヘルツ帯 RF 信号から IF に変換する受信用化合物半導体素子を実現する。送信側の出力は 0dBm 以上とし、オンチップアンテナ実装やアンテナとの導波管インタフェースを有する構成により無線装置へ組み込み可能なモジュール化を実施する。キャリアアグリゲーションや偏波多重等を併用することにより、合計 100GHz 程度の帯域幅で伝送速度 200Gbps 超、変換処理遅延・伝搬遅延を含む遅延量として  $100\mu\text{s}$ 、通信距離 100m（1 対向時）程度の通信が可能となる無線システムを実現する。

課題イについては、350–600GHz 帯信号を効率の高い 3 逓倍器 2 直列に相当する 9 逓倍以下の周波数逓倍数で実現可能な光電気発振技術を開発し、高い信号品質を担保するため 10kHz 周波数オフセット時単側波帯位相雑音  $-90\text{dBc/Hz}$  以下を実現する。また、課題アにて開発されるモジュールとの統合を考慮し、無線装置へ組み込み可能なモジュール化を実施する。光信号とテラヘルツ信号を相互変換するシステム技術を開発し、周波数帯域幅 50GHz 以上の信号相互変換を実現する。また、振幅多値変調など逓倍に適した多値変調形式の検討を行い、より周波数利用効率の高い無線システムを実現する。

課題ウについては、受信信号と気象等外部情報からアンテナ方向を推定するアルゴリズムを開発する。可動域（5 度程度）の範囲で無線機を設置した際に自動的にアンテナ方向を調整し、リンクを確立するとともに、当該可動域内で生じたずれに対する自動アンテナ方向制御により接続性を向上・維持する技術を確立する。また、ミリ波帯（例えば 60GHz、100GHz 等。当該ミリ波帯信号の生成に当たっては、利用周波数帯に応じて、課題イにて開発する光電気発振器だけでなくガン・ダイオード等も考慮し、最適な構成となるよう留意すること。）を制御信号及び小容量ユーザ信号伝送に用い、大容量伝送をテラヘルツ帯で実現するための制御機構を実現する。併せて、双方向マルチホップ伝送により伝送遅延をマ

ルチホップ数 $\times 100\mu s$ 以下とし、伝送距離 400m を実現するための波形等価増幅技術を確認する。開発した技術成果の実証として、屋内又は地下空間等におけるシステム実証試験を実施する。具体的には、5G モバイルフロントホールと同等の 140Gbps 超の回線容量が必要となる 8K 非圧縮映像（例えば、8K120p YCbCr=4:4:4 フォーマット、ビット深度 12bit）の伝送実証を行う。

なお、上記の目標は課題毎（課題ウ技術成果の実証部分を除く。）に達成するとともに、課題ウ技術成果の実証部分において各技術を統合した際にも同等の目標を達成することを目指す。これらの目標を達成するに当たっての年度毎の目標については、以下の例を想定している。

#### <令和 3 年度>

##### ア RF・信号処理技術の研究開発

- ・化合物半導体デバイスを設計するためのモデリング環境を構築し初期検証を実施する。
- ・送受信機に実装するためのテラヘルツモジュールの設計を行う。

##### イ 光電気発振技術の研究開発

- ・基本周波数を 60GHz 帯として動作する光電気発振技術の原理実証を行う。
- ・光電気発振モジュールへ実装するための光及び電気素子のモジュール設計並びに試作を行う。

##### ウ アンテナ方向制御技術の研究開発

- ・実験室環境においてアンテナの姿勢を推定するための基礎データ取得を行う。
- ・通信時に得られる諸データを利用し、アンテナ姿勢を推定するアルゴリズムを構築する。

#### <令和 4 年度>

##### ア RF・信号処理技術の研究開発

- ・350-600GHz 帯において、半導体のモデリングと基本・要素回路の設計を行う。
- ・無線装置への実装へ向けたテラヘルツモジュールの試作及び評価を行う。
- ・8K120p 非圧縮映像を伝送するための評価環境を構築し検証を行う。

##### イ 光電気変換技術の研究開発

- ・光電気発振モジュールの集積化に係る設計、試作及び評価を行う。
- ・光電気発振システムの動作原理を確認し実証を行い、課題の抽出及びフィードバックを行う。
- ・ミリ波帯信号と光信号を相互に変換する光電気相互変換技術の設計と原理検証を行い、課題の抽出及びフィードバックを行う。

##### ウ アンテナ方向制御・統合制御技術の研究開発

- ・前年度までに取得したデータ及びアルゴリズムを用い、アンテナ方向推定時の精度の検証を実施し、アルゴリズム等へフィードバックを行う。
- ・推定されたアンテナ方向から適切な方向へ補正する制御システムの試作を行い評価する。
- ・ミリ波とテラヘルツ波の周波数帯を同時に利用した制御・ユーザ信号を分離・結合するためのアルゴリズムを検討する。

#### <令和5年度>

##### ア RF・信号処理技術の研究開発

- ・送信・受信を行う統合回路の試作と検証を行う。
- ・テラヘルツモジュール用アンテナインタフェース及びオンチップアンテナ構造の設計・試作を行う。
- ・8K120p 非圧縮映像を伝送するテラヘルツ帯無線試作機の設計を行う。

##### イ 光電気変換モジュール技術の研究開発

- ・光電気発振モジュールを小型化する試作機の設計及び試作を行う。
- ・テラヘルツ帯信号と光信号を相互に変換する光電気相互変換技術の原理検証を行い、統合化へ向けた課題の抽出及びフィードバックを行う。
- ・周波数通倍に対応した変調技術の設計・実装・基礎検証を実施し、課題の抽出を行う。

##### ウ 統合制御システムの研究開発

- ・無線機設置時を含む信号受信状況モニタリングによるアンテナ方向推定・制御システムを無線機へ実装する。
- ・ミリ波帯・テラヘルツ帯の受信状況に応じて適切な周波数帯へ切り替える適応型メディア選択手法の検討及び検証を行う。
- ・マルチホップ方式によるネットワーク接続距離の延伸技術の設計、実装及び検証を行う。また、マルチホップ時に増大する信号劣化や伝送遅延の抑制を目指した中継技術の設計を行う。

#### <令和6年度>

##### ア RF・信号処理技術の研究開発

- ・350-600GHz 帯無線送受信システムを構築し、動作実証を行う。
- ・8K120p 非圧縮映像を伝送するための信号処理装置を構築し、その動作実証を行う。

##### イ 光電気相互変換技術の研究開発

- ・小型化した光電気相互変換システムを構築し、その動作実証を行う。
- ・周波数通倍に対応した変調システムを構築し、その動作実証を行う。

##### ウ 統合システムの研究開発

- ・ミリ波・テラヘルツ帯の周波数帯を同時に接続又は適時選択によりネットワークの高可用性を実現する総合無線システムの原理検証を行う。

- ・各課題における開発技術を統合したテラヘルツ無線システムの構築及び信号伝送に係る統合実証を行う。

## 5. 実施期間

令和3年度から6年度までの4年間

## 6. その他

### (1) 成果の普及展開に向けた取組等

#### ①国際標準化等への取組

国際競争力の強化を実現するためには、本研究開発の成果を研究期間中及び終了後、速やかに関連する国際標準化規格・機関・団体へ提案を実施することが重要である。このため、研究開発の進捗に合わせて、国際標準への提案活動を行うものとする。なお、提案を想定する国際標準規格・機関・団体及び具体的な標準化活動の計画を策定した上で、提案書に記載すること。

なお、本研究開発が取り組む周波数帯域では450GHzまでの一部の帯域は既に固定通信業務に特定されているとともに、275GHz～1000GHzまでの研究課題が成立している。標準化活動の計画においては、特定されている450GHz以下の周波数に対しては他業務との周波数共用など周波数分配に向けた寄与文書を提案する計画、及び特定されていない450GHzを超える周波数に関しては275GHz～1000GHzまでの研究課題にのっとり、固定通信業務への特定に向けた基礎特性の寄与文書を提案する計画を含めること。

#### ②実用化への取組

研究開発期間終了後も引き続き取り組む予定の研究開発成果の情報発信をはじめとする「本研究開発で確立した技術の普及啓発活動」及び令和11年度までの実用化・製品展開等を実現するために必要な取組を図ることとし、その活動計画・実施方策については、提案書に必ず具体的に記載すること。

### (2) 提案および研究開発に当たっての留意点

提案に当たっては、基本計画書に記されている目標に対する達成度を評価することが可能な具体的な評価項目を設定し、各評価項目に対して可能な限り数値目標を定めること。また、従来の技術との差異を明確にした上で、技術課題及び目標達成に向けた研究方法、実施計画及び年度目標について具体的かつ実効性のある提案を行うこと。

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頂くと共に、実際の研究開発の進め方について適宜指導を頂くため、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。



なお、本研究開発において実用的な成果を導出するための共同研究体制又は研究協力体制について、研究計画書の中にできるだけ具体的に記載すること。