

＜基本計画書＞

光回線を代替する高ミリ波帯固定無線通信に関する研究開発

1. 目的

現在、全国における光回線の整備率は 99.84%（令和 6 年 1 月総務省公表。令和 5 年 3 月末時点の数字）まで進捗しており、大容量かつ可用性の高い光ファイバは、我が国における重要な通信インフラとなっている。一方、地理的、物理的な理由や費用対効果等の面から光回線に比べて無線通信の利用が望ましい場合や、光回線と無線通信を併用することで事業継続性の観点からより高い効果を得られる場合等において、固定無線回線が利用されている状況である。

他方、昨今の AI の進化に伴い、生成 AI や自動運転、サービスロボット、メタバースなど様々な技術の進展が見込まれ、今後は情報伝送量が爆発的に増加していくことが予想される。そうした中、その通信インフラのすべてを光回線でまかなうことは困難であり、固定無線による光回線の代替が期待される。

また周波数利用の観点では、現状、固定無線通信において、最も高い周波数帯としては 80GHz 帯が利用されているところ、移動通信システムの利用が進展し今後も周波数拡大の見込みであることから、固定無線通信について、より大容量通信が可能となる高い周波数帯の開拓が必要な状況である。最近では国際的にも、固定無線による 300GHz 帯の利用に向けた検討が始まりつつあり、高ミリ波帯（100～300GHz）の利用に対する期待は高まっていくと予想される。

一方、高ミリ波帯は指向性が高いことから、対向するアンテナとの軸ずれが発生しやすく安定性を確保することが困難であるほか、降雨等による減衰が大きいといった課題があり、実利用は困難な状況である。

そこで、高ミリ波帯を用いて、強風や降雨等の影響が想定される実運用環境下において、固定無線通信を安定的に実施可能にするために必要な技術について研究開発を実施する。実現すれば我が国が優位性を持って国際的な議論を進めることも期待される。

なお、高ミリ波帯固定無線通信は、移動通信システムの基幹通信網（フロントホール、バックホール）や、社会インフラ回線、大規模イベントの臨時回線、災害時臨時回線、自営の回線（ビル間通信等）、ラストワンマイルの回線など様々な利用シーンが想定される。本研究開発は、それらの利用シーンにおいて共通的に必要と考えられる技術の実現を中心に取り組むものである。

2. 政策的位置付け

- ・「統合イノベーション戦略 2024」（令和 6 年 6 月閣議決定）

「（1）先端科学技術の戦略的な推進」において、「2023 年 4 月に改訂した「デジタル田園都市国家インフラ整備計画」に基づき、データ流通や高度な AI の利用を支えるため、5G・光ファイバ等の整備、データセンターの分散立地、地域デジタル基盤の整備等を引き続き推進するとともに、オール光・非地上系ネットワー

ク等の Beyond 5G (6G) の早期実現に向け、研究開発・国際標準化・社会実装・海外展開の取組を一体的に推進する。」旨の記載あり。

3. 目標

本研究開発では、高ミリ波帯(100GHz~300GHz)^{※1}を用いた伝送距離最大1km、伝送速度100Gbps級の固定無線通信の実現を目指す^{※2}。具体的には、当該周波数帯の電波の直進性を活かして、4並列以上の無線通信回線を空間的に多重し、さらにそれらの無線通信が、強風や降雨等^{※3}の影響下であっても安定的、効率的に実施可能な固定無線通信技術の確立に取り組む。これにより、現在固定無線通信では利用されていない周波数帯の開拓を目指す。

※1 テラヘルツ帯(300GHz~)を対象に加えることを拒むものではない。

※2 降雨時など通信の接続性等の観点が発送容量に比べ優先される状況において、必ずしも、伝送距離最大1km、伝送速度100Gbps級の固定無線通信を実現することを求めるものではない。

※3 実運用環境下における車両の通行や地震による地面の振動も勘案することとする。

4. 研究開発内容

(1) 概要

現状、高ミリ波帯を用いた無線通信デバイスの開発が進展し、伝送実験が進められているものの、空間多重による大容量通信とともに、強風や降雨等の影響下であっても安定的、効率的な通信が可能となるシステムを実現し、実装することは技術的困難性が高く実現していない。

そのため、本研究開発においては、ハード面から「課題ア 無線リンク安定化技術」、システム面から「課題イ 高効率並列無線通信技術」の開発及び実証実験を実施する。

なお、本研究開発は、両技術を組み合わせることで効果を発揮するものであるとともに、強風や降雨等の影響が想定される屋外での実運用環境下において、安定的に利用可能にするために必要な技術の確立を目的とすることから、それらを踏まえて取り組む。

(2) 技術課題及び到達目標

技術課題

課題ア 無線リンク安定化技術

ア-1 高ミリ波帯 RF 技術

本課題では、高ミリ波帯において、4並列以上の無線リンクを空間的に多重させることに加え、周波数特性の異なる複数の周波数帯(基本とする一の周波数帯のほか、当該周波数帯に対し搬送波周波数が2倍以上となる周波数帯から構成される複数の周波数帯)で協調動作させて無線リンクを安定させることにより、伝送距離最大1km、伝送速度100Gbps級の通信を行うことが可能な、化合物半導体チップセットを基本要素とする高ミリ波帯 RF 技術を研究開発する。

また、本技術の実現においては、課題イの技術と連携して、アンテナ振動や降

雨減衰に対し、システムとしての冗長性を向上させることが重要である。そのため、課題イと連携して、並列する無線回線の受信電力や位相差などによるアンテナ方位のずれの検出や、小規模アレイアンテナや微少機械駆動などによる方位の自動微調を行う機構のほか、降雨減衰を補償する機構の実現に取り組む。

合わせて、本研究開発成果の普及を勘案し、小型化の観点からも研究開発に取り組むことが重要である。

なお、年間降雨不稼働率 0.01%を達成する降雨マージンを有する無線装置であることを前提とする。

アー 2 固定無線用指向性制御アンテナ

高ミリ波帯では、高利得アンテナを含む無線機筐体を機械駆動することによって、送受信間のアンテナ指向性を最適化する研究が注目されている。一方、従来のモータによる機械駆動では、指向性制御の応答速度と方向分解能が制限される。

屋外において気候状況は時々刻々と変化するものであり、その中で安定した固定無線通信の実施を可能とするためには、課題イの技術と連携して、応答速度が早く精緻に電子制御が可能なアンテナが必要になる。また、高い周波数の固定無線システムでの実用化を見据えると、アンテナの内部に指向性制御機能を有し小型化が可能なアンテナの開発が必要になる。

そのため本課題では、固定無線に適したアンテナ要件を明確化し、応答速度が早く、アンテナ方位を数度の範囲で可変できる高精度な指向性制御アンテナの研究開発を実施する。なお、成果の普及を勘案し、小型化の観点からも研究開発に取り組むことが重要である。なお、アンテナの周波数帯域は課題アー 1 で提案する複数帯域に対応させる。

課題イ 高効率並列無線通信技術

イー 1 ロバスト高密度空間多重技術

高ミリ波帯以上の周波数帯を利用した固定無線システムは、従来の固定無線よりも伝送容量は大きくなる一方、伝送距離は短くなる。そのため、相対的に無線機の設置数は増大する可能性が高く、普及には設置容易性が重要になる。

そのため本課題では、高い周波数で高利得アンテナを利用する際に課題となるアンテナビームの軸ズレ量を、複数の受信側機器の受信電力の解析結果から推定し、ビーム方向を探知する機能を開発する。加えて、それを踏まえて、課題アの技術と連携して、ビーム方向及びビーム幅を機械駆動及び電子制御のそれぞれのメリットに留意しバランスを確保したハイブリッド方式で自動調整するシステムを開発する。その際、並列するアンテナ間で相互に干渉することのないよう、必要に応じて影響の低減方策を実装する。なお、ビーム方向の探知とアンテナのビーム制御は一体で効果を発揮するものであり、実環境で最も効果的な組み合わせを探索していくことが重要である。

また、広い周波数帯域を利用するシステムにおいて通信容量を極大化するには、空間多重性を極限まで活用した多重方式の実現が必要となる。

これについては、空間多重に、偏波多重や周波数多重といった手法を一部併用

して稠密配置することで、効率的に伝送容量を最大化する技術を実現する。なお、他課題との連携により十分なリンクバジェットが得られることに留意し研究開発に取り組んでいくことが重要である。

イー２ 並列接続最適化技術

高ミリ波帯大容量固定無線システムの実現により、光ファイバネットワークの中で物理的に接続できない箇所を光ファイバネットワークの通信に影響を与えない形でネットワーク接続することが求められる。

光ファイバネットワークに遜色のない伝送容量や、同ネットワークにおいて高い可用性を実現するためには、複数の無線チャネルを並列化し統合した無線チャネルを構成する技術が必要である。一般的に無線システムにおいては、伝送容量と接続性はトレードオフの関係となる。そのため、複数無線チャネルの通信状況を適時把握し統合解析することで、適切な伝送容量を適切な接続性で実現するチャネル統合制御技術の実現が必要不可欠である。

本課題では、複数の無線チャネルについて、基本となる対向チャネル及び複数干渉チャネル情報を同時に計測・把握することで、複数無線チャネルの伝送容量・接続性などの統合リンク情報を１秒以内*に収集解析する技術を開発する。

また、当該統合リンク情報をテレメトリ情報としてサーバー等へ保存及び配信することで、ネットワーク側から無線区間も含めたネットワーク制御が可能となる。その際、上記の課題アの技術と連携して、統合リンク情報に基づき、安定した伝送容量もしくは接続性を実現させる等求められるサービスの要求レベルに応じて、変調方式等を含めて制御を行うことにより、最適化を行う技術を開発する。

* この数値は目安であり、システム全体として十分実用に耐えうる性能を満足する数値を別に設定できる場合はその数値による。以下、「*」を付した箇所において同じ。

イー３ 環境評価統合技術

高い周波数帯の利用において、降雨の状態を把握した上で他の無線局等との干渉が発生しない範囲で送信出力の調整を行うことにより、可用性を向上させることが期待される。このためには無線機器周辺の降雨状況を精緻に観測することが重要である。

本課題では、高ミリ波帯における降雨減衰発生時の環境変動を把握（観測）する手法を開発する。これにより、高い接続可能性の実現が期待される。

また、無線システム設置場所の周囲 500m から 1km 程度の範囲での降雨のミクロスケールな環境状況をリアルタイム観測することにより、課題アの技術と連携して、他の無線システムと自システムの与干渉・被干渉の条件を総合的に処理・判断し、最適な送信電力・占有周波数帯幅・変調方式を決定するアルゴリズムの開発を行う。更に他のシステムからの与干渉条件下において、スループットや接続断率など KPI の最大化・最小化が可能となる自律的な無線通信方式制御技術の開発にも取り組む。

イー4 インフラ向け超高信頼通信ネットワーク技術

一般に有線と比べて無線は電波干渉や降雨減衰等様々な要因により、接続性が阻害される。そのため、上記の課題アー1からイー3までの研究開発に取り組むことにより、高ミリ波帯固定無線通信の信頼性の向上を図ることとしている。

一方、高い接続性が求められるインフラに対し、高ミリ波帯固定無線通信を実装可能とするためには、無線部からネットワーク全体の通信に支障が生じないように、無線部、有線部を含むネットワーク全体での制御も重要である。例えば電力網に付随して設置されている通信ネットワークにおいては、現状の最も厳しい技術基準として、250km離れた地点を時間率99.99999%（セブンナイン）以上の高信頼性と、5ms以下の遅延時間での接続性がネットワークシステムとして求められている。

このため、高い接続性が求められるインフラ用に設けられたネットワークに広帯域無線伝送路が導入された時の設計手法の確立が重要になる。

本課題では、既設の光ファイバ伝送路に、広帯域無線によるバイパスやブリッジを付加する接続手法の開発を行い、実インフラ設備での利用を想定した環境での無線通信特性評価を行う。また、光ファイバと広帯域無線を用いたシームレスネットワークにおける回線切替時の通信特性評価や広域災害時を想定したネットワークの運用手法の検討を行い、それらを踏まえて、光ファイバと広帯域無線によるメッシュ型トポロジー通信ネットワークにおける回線設計の最適化技術の開発を行う。なお、その際、無線リンクの接続安定性の確保についても十分に留意すること。

到達目標

課題ア 無線リンク安定化技術

- ・ 4並列以上の無線リンクを可能とし、周波数特性の異なる複数の周波数帯で協調動作可能な化合物半導体装置を含む屋外設置可能な無線装置の実現
- ・ 回線距離最大1km、伝送速度100Gbps級の無線データ伝送の実現
- ・ 応答速度が早く、アンテナ利得を数度の範囲で可変できる高精度な指向性制御アンテナの実現

課題イ 高効率並列無線通信技術

- ・ アンテナビームの軸ズレ量を推定し、ビーム方向を探知するとともに、ビーム方向及びビーム幅を機械駆動及び電子制御のハイブリッド方式で自動調整するシステムの実現
- ・ 空間多重性を極限まで活用した大容量通信の実現
- ・ 複数の無線チャネル通信状況を適時把握するための統合チャネルテレメトリの実現
- ・ 統合リンク情報に基づき、求められるサービスの要求レベルに応じて、変調方式等を含め最適化を行う技術の実現
- ・ 降雨減衰発生時の無線品質維持のため、環境評価技術を確立し環境変動発生時

の高い接続可能性の実現

- ・高い接続性が求められるインフラ（光ファイバ網）に広帯域無線を追加した場合、ネットワークシステム全体で 250km*離れた地点間の 99.99999%以上*の信頼性と 5ms 以下*の遅延時間で接続可能な通信ネットワーク設計手法や最適化技術の確立

なお、上記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。なお、提案する複数の周波数のうち低い周波数帯を【帯域 A】、高い周波数帯域を【帯域 B】と表記する。

<令和7年度>

課題ア 無線リンク安定化技術

アー1 高ミリ波帯 RF 技術

- ・【帯域 A】における集積化半導体素子のパラメータを抽出し集積化の検討
- ・【帯域 B】における MMIC の方式設計を行い、MMIC の一次試作の検討
- ・信号処理方式設計を行い一次試作回路の検討
- ・装置制御方式設計を行い一次試作回路の検討

アー2 固定無線用指向性制御アンテナ

- ・【帯域 A】の指向性制御システムの設計・試作（利得指向性 $\pm 3^{\circ}$ 以内*で可変）
- ・電磁界解析結果と実測した利得特性を比較評価し次年度の設計に向けた基本方針の検討

課題イ 高効率並列無線通信技術

イー1 ロバスト高密度空間多重技術

- ・稠密空間多重伝送システムの概念設計及び原理検証
- ・ビーム方向探知・制御基礎検討の実施

イー2 並列接続最適化技術

- ・単チャネル・複数干渉チャネル情報の収集・解析技術の設計及び基礎検証
- ・ネットワーク制御的手法による無線リソース最適化技術の概念設計とシミュレーション検証の実施

イー3 環境評価統合技術

- ・【帯域 A】・【帯域 B】におけるリアルタイム伝搬特性評価方式の提案及び設計

イー4 インフラ向け超高信頼通信ネットワーク技術

- ・電力や鉄道インフラ等で用いられている通信ネットワークの現状調査を実施し、ネットワーク構成を整理
- ・既設のインフラ用通信の光ファイバ線路に、長期的に屋外環境で利用する広帯域無線機を付加するための課題整理と接続手法の開発

<令和8年度>

課題ア 無線リンク安定化技術

アー１ 高ミリ波帯半導体装置技術

- ・【帯域 A】の MMIC を試作し性能評価
- ・【帯域 B】における集積化半導体素子のパラメータを抽出し集積化の検討
- ・【帯域 B】における MMIC の方式及び回路設計
- ・【帯域 B】における MMIC の試作し性能評価
- ・無線装置アンテナ方位粗調整機能の機能を試作し無線回線確立の検討
- ・無線装置アンテナ方位粗調整構造を試作し調整方法の検討
- ・方位粗調整構造及び制御回路との連動性の評価

アー２ 固定無線用指向性制御アンテナ

- ・【帯域 B】の指向性制御システムを設計・試作（利得指向性 $\pm 3^{\circ}$ 以内*で可変）
- ・電磁界解析結果と実測した利得特性を比較評価し次年度の設計に向けた基本方針の検討

課題イ 高効率並列無線通信技術

イー１ ロバスト高密度空間多重技術

- ・屋外を含む実環境データをもとにした空間多重伝送の設計・原理確認
- ・屋外でのビーム制御技術の設計・動作確認

イー２ 並列接続最適化技術

- ・10 秒以内*に収集・解析する統合チャネルテレメトリ技術の設計と原理検証を実施
- ・ネットワーク制御的手法による無線リソース最適化技術の設計と概念実装

イー３ 環境評価統合技術

- ・環境評価検証システムの基本試作及び動作確認・原理検証の実施
- ・無線・通信品質のモニタリング技術及び送信電力・帯域幅・変調方式等の適応制御技術の設計

イー４ インフラ向け超高信頼通信ネットワーク技術

- ・実環境での無線通信の特性把握のための試験場所の選定と光ファイバ回線確保、電源確保などを含めた測定環境整備
- ・通信特性や周囲環境の長期実験の測定系の構築
- ・6 ヶ月以上の無線通信特性評価の開始

<令和 9 年度>

課題ア 無線リンク安定化技術

アー１ 高ミリ波帯半導体装置技術

- ・【帯域 A】における集積化 MMIC の設計を行い試作性能の検討
- ・【帯域 A】における集積化 MMIC 試作し性能評価
- ・【帯域 B】における集積化 MMIC の設計及び試作を行い、性能評価
- ・無線装置アンテナ方位自動微調整機能の機能を試作し無線回線確立の検討
- ・無線装置アンテナ方位自動微調整機能の構造試作を行い調整方法の検討
- ・方位微調整構造及び制御回路との連動性評価

アー 2 固定無線用指向性制御アンテナ

- ・ R7 年度に試作した【帯域 A】の指向性制御型システムを改良し一次放射器の二次元駆動に対応する機構部の開発
- ・ 二次元走査時の利得指向性の評価方法確立

課題イ 高効率並列無線通信技術

イー 1 ロバスト高密度空間多重技術

- ・ 4 チャンネル以上の空間多重化の実現
- ・ 空間多重とビーム制御の同時動作の確認

イー 2 並列接続最適化技術

- ・ チャンネル情報解析とリソース最適化技術のシミュレータ実証
- ・ 無線フォーマット無依存化に向けたハードウェア抽象化とその検証

イー 3 環境評価統合技術

- ・ 実環境評価システムの試作
- ・ モニタリング技術及び適応評価技術の動作確認・原理検証

イー 4 インフラ向け超高信頼通信ネットワーク技術

- ・ R8 年度に引き続き長期の無線通信特性評価を行い品質評価とデータ分析
- ・ 光ファイバ断線を含む広域災害を想定し、平均修復時間 (MTTR) 等を考慮した通信ネットワークの機能の維持復旧のための運用手法の検討
- ・ 無線機本体の高信頼化の手法の整理

<令和 10 年度>

課題ア 無線リンク安定化技術

アー 1 高ミリ波帯半導体装置技術

- ・ 【帯域 A】における統合半導体無線モジュールを試作し性能評価
- ・ 【帯域 B】における統合半導体無線モジュールを試作し性能評価
- ・ 統合化パッケージ及び評価システムを製作し性能評価
- ・ 無線通信装置とシステム構成装置の試作し通信実験を行いサイトにおける伝送実験の検討
- ・ 屋外サイトにおける伝送実験を行い、屋外での通信性能評価

アー 2 固定無線用指向性制御アンテナ

- ・ 令和 9 年度までに開発したシステムを課題イで得られた成果と統合するための外部制御インターフェースを開発

課題イ 高効率並列無線通信技術

イー 1 ロバスト高密度空間多重技術

- ・ ビーム制御範囲 10 度*、精度 0.5 度以下*を実現
- ・ システム実証

イー 2 並列接続最適化技術

- ・ チャンネル情報解析とリソース最適化技術のシステム実証

イー 3 環境評価統合技術

- ・ リアルタイム伝搬特性評価方式と適応制御技術の統合
- ・ 全体システムの実証

イー 4 インフラ向け超高信頼通信ネットワーク技術

- ・回線設計のための広帯域無線回線の信頼度や遅延特性のモデル化
- ・光ファイバと広帯域無線によるメッシュ型トポロジー通信ネットワークにおける回線設計の最適化技術の開発
- ・インフラへの展開に向けた現場との連携推進

5. 実施期間

令和7年度から10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。

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「本研究開発で確立した技術の普及啓発活動」及び令和15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) 提案及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。