

令和 5 年度研究開発成果概要書

採 択 番 号 00501
研究開発課題名 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
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
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
研究開発項目 3 無線信号配信のための光信号処理技術
副 題 超大容量超低遅延無線のための電波/光変換・制御技術

(1) 研究開発の目的

Beyond5G 超大容量超低遅延無線ネットワークのための「50Gbps/ch 級 THz トランシーバ」、「光無線技術」、「THz・光無線シームレス伝送システム」、「DSP 遅延低減伝送・信号処理技術」を開発する。特に、基幹光ファイバ通信ネットワークとの接続性・拡張性を担保しながら、移動体（ドローン、低速走行車）に高品位無線通信環境を提供する Beyond5G フロントホールコア技術を追究する。開発した電波・光融合技術を用いたフィールド実験を行い、Beyond5G 無線としての有用性を実証する。

(2) 研究開発期間

令和 3 年度から令和 6 年度（4 年間）

(3) 受託者

国立大学法人三重大学 <代表研究者>
株式会社日立国際電気
株式会社京都セミコンダクター
株式会社 KDDI 総合研究所
東洋電機株式会社

(4) 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 2,240 百万円（令和 5 年度 640 百万円）
※百万円未満切り上げ

(5) 研究開発項目と担当

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
1-a) テラヘルツ帯高周波 MMIC 開発 (日立国際電気)
1-b) テラヘルツ帯 MMIC 実装モジュール開発 (日立国際電気)
1-c) フォトダイオード素子開発 (京都セミコンダクター)
1-d) 光テラヘルツ波変換モジュール開発 (京都セミコンダクター)
1-e) 光ファイバ無線・小型トランシーバユニットの開発 (日立国際電気)
1-f) 光無線・テラヘルツハイブリッド伝送システム (KDDI 総合研究所)
1-g) 低速移動トランシーバ伝送試験 (日立国際電気)
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
2-a) 光無線トランシーバ技術 (東洋電機)
2-b) 移動局との通信を可能にする捕捉追尾技術 (東洋電機)
2-c) 光無線伝送中継技術 (東洋電機)
2-d) 小型、低コストの光無線トランシーバ (東洋電機)
2-e) オール光接続方式光無線の高信頼化技術 (KDDI 総合研究所)
2-f) 光無線・テラヘルツハイブリッド伝送システム (KDDI 総合研究所)
2-g) 低速移動体向け通信フィールド実証

(東洋電機/日立国際/京都セミコンダクター/三重大学/KDDI 総合研究所)

研究開発項目3 無線信号配信のための光信号処理技術

- 3-a) 低遅延信号配信デバイスの開発 (三重大学)
- 3-b) 端末位置推定技術の開発 (三重大学)
- 3-c) 超高速光変調デバイスの開発 (三重大学)

(6) 特許出願、外部発表等

		累計 (件)	当該年度 (件)
特許出願	国内出願	4	2
	外国出願	2	0
外部発表等	研究論文	2	1
	その他研究発表	65	24
	標準化提案・採択	0	0
	プレスリリース・報道	6	0
	展示会	6	4
	受賞・表彰	5	4

(7) 具体的な実施内容と成果

➤ **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**

- 研究開発項目1-a) テラヘルツ帯高周波 MMIC 開発
前年度・前前年度の評価結果に基づき、MMIC の修正設計後に3次試作評価を実施した。また、評価にあたり、MMIC 評価設備系統について、評価の手法や条件に関する課題を克服して、より効率的な評価環境となるように改善を施した。改造した評価環境を用いて、素子部分を切出した FET や回路を化合物半導体ウェハ上にて評価して、周波数 300GHz 帯、出力電力-10dBm 以上、帯域幅 25GHz 以上の性能達成への見通しを得た。
- 研究開発項目1-b) テラヘルツ帯 MMIC 実装モジュール開発
前年度・前前年度の評価結果より、実装設計を修正し、MMIC 用実装モジュールの2次試作を行う。特に、目標とする実装モジュールの形状 10mm×40mm×10mm(突起物含まず)を実現するための見通しを得た。
- 研究開発項目1-c) フォトダイオード素子開発
面受光型 UTC フォトダイオード素子の評価を行い、動作周波数帯域 70GHz 以上であることを確認した。導波路型フォトダイオード素子に必要な光導波路の設計・試作を実施した。これらの試作・評価の結果、帯域 100GHz 以上の素子開発が可能であることを確認した。
- 研究開発項目1-d) 光テラヘルツ波変換モジュール開発
新たに導入した 110GHz 帯域計測器を用いて、変換モジュールの周波数帯域 100GHz を確認した。さらに、この変換モジュールを用いて日立国際電気および KDDI 総合研究所と連携した共同実験を実施し、ツートーン光源を用いて良好な 100GHz トーン信号(基準信号)の抽出を確認した。
- 研究開発項目1-e) 光ファイバ無線・小型トランシーバユニットの開発
テラヘルツトランシーバのための高速データ伝送ボードを設計した。システム構成は、送信 MMIC モジュール、受信 MMIC モジュール、アンテナ、高速伝送ボード、光無線変換モジュールを組み合わせたものとし、トランシーバユニットとして結合性能を評価した。アンテナを外した状態で送信ユニットおよび受信ユニットを接続して、通信性能試験を行い、小型トランシーバユニットの試作装置実現の見通しを得た。
- 研究開発項目1-f) 光無線・テラヘルツハイブリッド伝送システム

光ファイバ伝送区間、光無線伝送区間およびテラヘルツ伝送区間からなるハイブリッド伝送システムについて、光ファイバ伝送区間の具体的な構成を導出し、機材を購入して所定の動作が得られることを確認した。また、100 GHz 帯光ソートーン信号を京都セミコンダクター製 UTC-PD で RF キャリアに変換し、日立国際電気製テラヘルツ伝送システムで周波数を三通倍した 300 GHz 帯テラヘルツキャリアを 5 Gbit/s OOK データ信号と周波数ミキシングして変調し、3 m 空間伝送する共同実験を実施し、16 GHz 帯 RF キャリアを 18 通倍して生成した 300 GHz 帯テラヘルツキャリアを用いた場合と同等の伝送性能（エラーフリー伝送）を実現できることを確認した。

➤ 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

・研究開発項目 2-a) 光無線トランシーバ技術

光無線トランシーバの特性と周囲環境との相関を正確に把握するために、実使用環境に近い屋外での環境データ（気象、視程、屈折率構造パラメータ）と通信特性（受信パワー、ビットエラーレート）の計測を継続的に実施し、データ収集を行った。装置間距離 300m で伝送試験が実施できるよう環境を整え、コーナーキューブプリズムによる反射経路での 600m 伝送試験を実施した。データ伝送速度は、100m 伝送 40Gbps、300m 伝送 10Gbps とした。

また、GNSS では、基準となる GNSS アンテナを配置する RTK-GNSS 方式を用いることで、装置間の相対位置誤差を 20cm 程度に抑え、初期光軸調整の精度を高めることができた。

・研究開発項目 2-b) 移動局との通信を可能にする捕捉追尾技術

昨年度までに実施したステアリングミラーによる構成に加えて、電動雲台と組み合わせた光無線トランシーバの移動局との通信につき、多軸ロボットの先端にコーナーキューブプリズムを取り付け、光無線トランシーバ内蔵ジンバルにより追尾特性について確認、および内蔵ジンバル+OBS による連携トラッキング方式についてアルゴリズム検証・改良を実施した。

・研究開発項目 2-c) 光無線伝送中継技術

固定局間の通信距離の延長を目指し、近距離 100m での光無線トランシーバの接続試験を行い、課題について確認を行った。課題抽出の為、ループバックによる挿入損失の確認、および光無線トランシーバ 2 対直列接続時の挿入損失につき机上検討を実施した。

・研究開発項目 2-d) 小型、低コストの光無線トランシーバ

移動局用光無線トランシーバで検討、および実験を行ってきた電動雲台によるビームステアリングと 2 軸ミラーによるビームステアリング部を光無線トランシーバ内に取り込むよう検討、設計を実施した。合わせて、回路、プリント基板、光学系（アンテナレンズ）、構造の見直しを行い、回路・プリント基板は設計完了済み、部品実装基板を入手し、確認用組込みソフトウェアを実装してデバッグを開始した。

・研究開発項目 2-e) オール光接続方式光無線の高信頼化技術

東洋電機と連携して、並列した 4 パスのうち 1 パスに光無線送受信器実機（FSO トランシーバ）を導入した。これに SNR 偏差補償方式を適用した結果、その 1 パスの受光パワーが 21dB 減衰した状態でも最低品質の信号 Q 値が改善し、想定するエラー訂正閾値を上回ることを確認した。本結果を国際学会 ECOC 2023 に投稿・採録されて口頭発表を行った。また、4 パスすべてに FSO トランシーバを導入した場合でも SNR 偏差補償方式が動作することを確認した。さらに屋外に FSO トランシーバ設置し、接続試験を実施した。加えて、並列するパスの 1 つが信号断となっても通信を継続可能なアルゴリズムを検討し確立した。

・研究開発項目 2-f) 研究開発項目 1-f) と同一項目、1-f) を参照

・研究開発項目 2-g) 低速移動体向け通信フィールド実証

フィールド実証のうち小型トランシーバにおけるテラヘルツ波伝送では、研究開発項目 1-g の結果より、アンテナ利得を 42dBi として無線回線を構築したときに、アンテナの半値幅は概ね 1 度程度となることから狭長な通信範囲を得ることができる。通信サービスを想定すると、道路の端を歩く歩行者もしくは移動する車椅子との通信が最も身近な形態となることから、テラヘルツ波による適切な通信フィールドを設けることが有効との知見を得た。

三重県鈴鹿市の鈴鹿サーキットを訪問して、国際規格レーシングサーキットを視察して、数千人～10万人の聴衆が集まる大型イベント空間における無線通信環境や通信サービスの現状について調査した。また、最終年度に実施を予定しているフィールド実験実施のための情報収

集を行った。

▶ **研究開発項目3： 無線信号配信のための光信号処理技術**

• 研究開発項目 3-a) 低遅延信号配信デバイスの開発

光ファイバの波長分散効果を補償することができるプリコライジング高速光変調器の設計・試作を継続して、詳細な評価実験を行った。プリコライジング動作における補償ファイバ長を調節するための誘電体・金属板装荷変調電極の評価実験を行い、±10%以上補償長可変であることを実証した。

• 研究開発項目 3-b) 端末位置推定技術の開発

TDOA (Time Difference Of Arrival) 法と光ファイバ無線を用いた端末位置推定実験を行い、2次元空間領域および3次元空間領域で、それぞれ10cm以下の端末位置推定精度が得られることを確認した。

• 研究開発項目 3-c) 超高速光変調デバイスの開発

昨年度に引き続き、テラヘルツ (~350GHz) 帯無線信号を受信して、無給電で光信号に直接変換することができる超高速光変調デバイスの試作と評価実験を行った。また、無線-光信号変換デバイスと光ファイバ分散、波長の異なる複数レーザー光を利用して、新たに考案した無線信号復調方式の評価実験を行い、差動符号無線信号の復調に成功した。

(8) 今後の研究開発計画

- 超高速大容量伝送用 50Gbps/ch 級 THz トランシーバおよび光無線トランシーバを開発して、フィールドでの実証試験を行う。
- 超多数端末同時接続、周波数資源有効利用のために THz 帯無線と光無線を併用した場合および光ファイバ無線技術を活用して融合した場合の評価データを纏めて、有用性を明らかにする。
- フロントホールにおける 50Gbps/ch 級データの超低遅延伝送のために、DSP に頼らない光ファイバ伝送技術を開発する。
- 開発した技術を統合したフロントホールシステムを構築して、国際規格サーキット等でのフィールド実証実験を行って有効性を確認する。特に、社会実装のためのデータを取得する。さらに、論文発表等に加えて、社会実装協力者および各受託者の広報を通じた情報発信を実施する。