

令和3年度研究開発成果概要書

採択番号 00302
研究開発課題名 テラヘルツ帯を用いた Beyond 5G 超高速大容量通信を実現する無線通信技術の研究開発
研究開発項目2 テラヘルツ帯を用いた限定エリア内無線システムの研究開発
研究開発項目3 テラヘルツ帯を用いた地上~NTN プラットホーム間フィーダーリンクシステムの研究開発
副題 テラヘルツ帯通信の高密度化・長距離化に関する研究開発

(1) 研究開発の目的

あらゆる環境で Beyond5G の機能を有限な電波資源のなかで実現するために、研究開発項目2「テラヘルツ帯を用いた限定エリア内無線システムの研究開発」に対しては、多数のユーザが集まった環境（スタジアム、航空機内等）における大容量通信を実現するための要素技術を確立する。研究開発項目3「テラヘルツ帯を用いた地上~NTN プラットホーム間フィーダーリンクシステムの研究開発」に対しては、テラヘルツ帯を用いる地上局と成層圏（11~16km）に滞在する NTN プラットホーム間のフィーダーリンクを実現するための要素技術を確立する。

(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

学校法人早稲田大学<研究代表者>
日本電信電話株式会社
国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構
三菱電機株式会社

(4) 研究開発予算（契約額）

令和3年度から令和4年度までの総額 1,200百万円（令和3年度580百万円）
※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2 テラヘルツ帯を用いた限定エリア内無線システムの研究開発

- 2-a) MIMO 機能を有する高利得アンテナ制御技術の研究開発（早稲田大学）
- 2-b) 300GHz 帯フロントエンド部の研究開発
 - ①高周波アナログフロントエンドデバイス(NTT)
 - ②複数チャネル中間周波数回路（早稲田大学）
- 2-c) ベースバンド部の研究開発（早稲田大学）
- 2-d) 統合伝送実験（早稲田大学）

研究開発項目3 テラヘルツ帯を用いた地上~NTNプラットフォーム間フィーダーリンクシステムの研究開発

- 3-a) 高利得リフレクトアレイアンテナの研究開発(JAXA)
- 3-b) 100GHz 帯フロントエンド部の研究開発
 - ①100GHz 帯高出力アナログフロントエンドデバイス（三菱電機）
 - ②広帯域中間周波数回路（早稲田大学）
- 3-c) ベースバンド部の研究開発（早稲田大学）
- 3-d) 統合伝送実験（早稲田大学）

(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	1	1
	外国出願	0	0
外部発表等	研究論文	1	1
	その他研究発表	10	10
	標準化提案・採択	1	1
	プレスリリース・報道	0	0
	展示会	0	0
	受賞・表彰	0	0

(7) 具体的な実施内容と成果

研究開発項目 2：テラヘルツ帯を用いた限定エリア内無線システムの研究開発

2-a) MIMO 機能を有する高利得アンテナ制御技術の研究開発

300GHz の円偏波パッチアンテナの基本設計を完了し、試作を 2 回行った。4x4 素子アンテナでは、利得 10.5dBi@280GHz (目標利得 16dBi) が得られた。ここで、線路損が 5.5dB と大きいことが判った。円偏波特性は、軸比が 3dB 以下の周波数帯域が、42.6GHz と非常に良好な特性が得られた。軸比が 1dB 以下は、257GHz から 287GHz と広い周波数範囲で得られている。導波管インターフェースの接続については、基本設計を実施し、導波管の損失は 7dB/100mm と求められた。この結果から、導波管の長さを 10mm 程度以下とすることで、1dB 以下の損失に抑えられることが判った。

2-b) 300GHz 帯フロントエンド部の研究開発 ①高周波アナログフロントエンドデバイス

300GHz 帯統合伝送実験用の IC 供給に向けた高電子移動度トランジスタ (HEMT) を試作し、HEMT の DC パラメータの典型値を抽出した。過去試作 IC のパラメータと比較し、回路動作バイアス近傍で、世界最高レベルの 300GHz 帯 IC の試作に必要な f_t / f_{max} がそれぞれ 300 / 700GHz の RF 特性が得られる見込みが得られた。これを適用したパワーアンプ、およびミキサの試作を行った。また、テラヘルツ帯デバイスの雑音モデルの構築に向け、ノイズ評価系構成の調査・検討を実施し、75GHz から 325GHz までの超広帯域の範囲で評価できるように、WR10、WR6.5、WR3.4 の各規格に対応するノイズソース、シグナルアナライザ、周波数エクステンダ、信号発生器など、精密測定に必要な部材を選定した。オンウェハで各種特性測定と統合的に評価可能なノイズ測定環境の構築を進めた。

2-b) 300GHz 帯フロントエンド部の研究開発 ②複数チャンネル中間周波数回路

300GHz 帯 RF フロントエンドとベースバンド部を接続するための低ひずみ広帯域中間周波数回路 (中心周波数 14GHz) の設計および開発を行った。2チャンネルを同時並行動作可能な構成をもち、2GHz 以上帯域幅、振幅偏差 ± 0.3 dB 以内、位相偏差 ± 3 度以内の性能を実現した。ビーム指向制御のための位相切替器 (位相器) について設計・試作を完了した。

2-c) ベースバンド部の研究開発

研究開発項目 3-c) とハードウェアの共通設計化をすすめ、チャンネル帯域幅 2GHz、リファレンス出力: 10dBm \pm 3dB (周波数の対温度偏差 50ppb、位相雑音 -161dBc/Hz@100MHz) のベースバンドのハードウェアアーキテクチャの基本設計と装置試作を完了した。また 2-b②との BB-IF 信号フォーマットとインターフェースの基本設計を完了した。信号処理部は OFDM-64QAM による正味ビットレート 6.6Gbps (目標 4Gbps)、周波数利用効率 3.3 bps/Hz (目標 2.5bps 級/Hz) の基本設計を完了した。MIMO 多重法については、2-a) と 2-d) と連携してリンクレベルのアルゴリズム解析に向

けた伝搬モデルの基本パラメータを取得した。無線アクセスとコマンド制御のための通信プロトコルについては、統合伝送実験 2-d にむけて独自仕様のリンク方式を設計した。

2-d) 統合伝送実験

統合実験に向けた予備実験にむけて特定実験試験局（関実第 48731 号）を開局して早稲田大学小野記念講堂における屋内・屋外伝搬実験を実施した。2-a) と連携して、試作した円偏波アンテナなどにおける LoS・建材による反射特性・人体による遮蔽など各伝搬条件での伝搬パラメータの知見を得た。これら知見を含め統合伝送実験の計画書を作成した。

研究開発項目 3: テラヘルツ帯を用いた地上~NTN プラットホーム間フィーダーリンクシステムの研究開発

3-a) 高利得リフレクトアレイアンテナの研究開発

NTN搭載用に向けたフィーダーリンク用のアンテナシステムの設計と部分要素試作を進めた。高指向性利得反射鏡アンテナはNTN搭載用として軽量化させるためにオール高精度複合材を用いることとし、カセグレン方式（ナスミス）の単一給電にリレーミラー2軸駆動の角度走査とアンテナ全体の2軸ジナル駆動を組み合わせた連続的なビーム走査とする設計とした。アンテナの電気性能評価については、アンテナ系の電磁界解析により目標とする40dBi以上の利得実現性を確認した。また、送受信を異なる円偏波で分離する低損失かつ広帯域なポーラライザ（セプタム型）により実現出来ることを解析により確認した。アンテナ給電部の合波部に関して、導波路の挿入損失とアイソレーションを部分要素試作で確認した。追尾機構については、リレーミラーの駆動メカ、ジナル駆動メカを部分試作し、駆動角度精度を確認した。これらの部分試作と解析により確認された各部の性能から、最終目標に向けて試作するフィーダーリンク用アンテナの総合挿入損失を約10dBと見積もった。

3-b) 100GHz 帯フロントエンド部の研究開発 ①100GHz 帯高出力アナログフロントエンドデバイス

33GHz 帯 30W 出力 GaN MMIC および 100GHz 帯 1W 出力の GaN3 逡倍器の基本設計を完了した。また、微細加工プロセスによる GaN 増幅器の高周波動作化（100GHz 動作化）検討のための GaN トランジスタ試作を実施した。

3-b) 100GHz 帯フロントエンド部の研究開発 ②広帯域中間周波数回路

100GHz 帯 RF フロントエンドとベースバンド部を接続するための低ひずみ広帯域中間周波数回路の設計および開発を行った。送信・受信それぞれ2チャンネル、合計4チャンネルを同時並行動作可能な構成をもち、2GHz 以上帯域幅、振幅偏差±0.3dB 以内、位相偏差±3 度以内の性能を実現した。100GHz 信号源として3 逡倍フロントエンドを用いるための周辺回路、熱設計などを行った。不要輻射抑圧のための帯域制限フィルタについては、限界値の抽出を含めてシミュレーションで性能を確認し、機構設計を完了した。

3-c) ベースバンド部の研究開発

研究開発項目 2-c) とハードウェアの共通設計化をすすめ、チャンネル帯域幅 2GHz、リファレンス出力：10dBm ± 3dB（周波数の対温度偏差 50ppb、位相雑音 -161dBc/Hz@100MHz）のベースバンドのハードウェアアーキテクチャの基本設計と装置試作を完了した。また、3-b②との BB-IF 信号フォーマットと FDD システムの無線制御部のインターフェースについて基本設計を完了した。信号処理部は送信 RF 部の特性に合わせて PAPR で OFDM より 6.7dB 低い 16-APSK 変調方式を採用し SC-FDE 復調系とからなるデジタル変復調の基本設計を完了した。正味ビットレート 24Gbps（目標 2Gbps）の見通しを得た。加えて GaN3 逡倍器用に世界初の位相 1/3、振幅三乗根の 16-APSK カスタム変調器と DPD（Digital Pre Distortion）を設計してモデル解析による歪

み除去の効果を確認した。無線アクセスとコマンド制御のための通信プロトコルについては、統合伝送実験 3-d にむけて独自仕様のリンク方式を設計した。

3-d) 統合伝送実験

第 2 年度の統合伝送実験に向けた 10m 法の暗室評価の評価系を調査検討した。また第 4 年度の統合実験に向けて、リンクバジェットにおける天候影響の精査、および実験フィールドと高利得アンテナを有する地上実験局のフェージビリティの調査検討を行った。これら知見を含め統合伝送実験の計画書を作成した。

(8) 今後の研究開発計画

研究開発項目 2 については、300GHz 帯のテラヘルツ帯を用いて、距離 70m に対して、最大 100 人のユーザに圧縮した 8K 映像を伝送する 20Gbps の高密度・大容量無線システムを実現する最終目標に向けて、令和 3 年度に検討・設計した要素技術に対して、試作・評価改良を進めていく。MIMO 機能を有する高利得アンテナおよび制御技術、300GHz 帯 MIMO に対応した高周波アナログフロントエンドデバイス技術、帯域幅 2GHz の複数チャネル中間周波数回路技術、ベースバンド部を含めたシステム技術の各要素技術を確立し、令和 4 年度に設定した中間目標の達成を目指していく。

研究開発項目 3 については、100GHz 帯を用いて、高度 16km の成層圏との 20Gbps 以上の長距離大容量無線通信を実現する。また、天候の影響を低減し、少雨時でも 10Gbps を確保するシステムを確立する最終目標に向けて、令和 3 年度に検討・設計した要素技術に対して、試作・評価改良を進めていく。高利得リフレクトアレイアンテナ技術、100GHz 帯高出力アナログフロントエンドデバイス技術、帯域幅 2GHz の広帯域中間周波数回路技術、ベースバンド部を含めたシステム技術の各要素技術を確立し、令和 4 年度に設定した中間目標の達成を目指していく。