

令和 4 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<代表研究者>
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 4 年度 620 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(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	2	1
	外国出願	3	3
外部発表等	研究論文	3	2
	その他研究発表	30	20
	標準化提案・採択	5	4
	プレスリリース・報道	2	1
	展示会	1	1
	受賞・表彰	1	1

(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

4x4 素子 2 ポートの円偏波アンテナを試作した。フロントエンド部と接続する導波管回路について損失 1dB 以下で作製した。フロントエンド部を接続する各ポートよりアンテナゲインを測定し、13dBi のアンテナゲインが得られた。2 ポートを合波することで、16dBi のアンテナゲインが得られる見込みを確認した。フロントエンド部を接続し、ローカル発振器の位相を変えることにより、ビームが $\pm 15^\circ$ の範囲で変化することが確認された。

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

300 GHz 帯を用いた MIMO 伝送実験に供するアナログフロントエンドデバイスであるアンプ IC、ミキサ IC の安定供給を実現するため、ゲート長 52 nm の InP-HEMT 製造プロセスの最適化・安定化の検討を推進した。その結果、 $f_t \sim 280\text{GHz}$, $f_{\text{max}} \sim 860\text{GHz}$ (回路バイアス条件) の特性を有する InP-HEMT の高歩留まり化を達成した。特にアンプ IC で重要な f_{max} を 2 割以上向上させることに成功した。さらに当該 InP-HEMT を用いた回路設計を行い、中間目標である出力 EIRP 29 dBm / 13dBm に対して、本期間に試作した PA モジュールで出力 10 dBm (@ 290GHz) を達成した。この特性は、300 GHz 帯において世界最高水準の性能を有している。本 PA モジュールを 4 並列化により 13 dBm 以上の出力を実現できる見通しを得た。加えて、同様の InP-HEMT を適用したミキサモジュールにおいてもコンバージョンゲイン-20 dB (@290GHz) を達成した。

上記特性を有する IC を安定的に製造するプロセス構築を合わせて検討することで、伝送実験に必要な複数台のアンプ・ミキサモジュールの作製に成功した。これらを 300 GHz 帯の統合伝送実験に提供した。

②複数チャンネル中間周波数回路

300GHz 帯の複数チャンネル中間周波数回路の基本動作を確認し所望の機能を実現できた。

ベースバンド部(研究開発項目 2-c)、300GHz 帯フロントエンド部デバイス(研究開発項目 2-b①)および周波数変換器を接続するための広帯域中間周波数変換装置を完成、2チャンネル信号の同時処理機能の評価で良好な結果を得た。これには複数チャンネル信号の周波数変換のため局部発信器についての評価も含む。中間周波数としては 300GHz RF フロントエンドを駆動し、併せて完成させたビーム指向制御のための位相器と共に、アンテナを含めた電波暗室実験にて機能確認を完了した。

2-c) ベースバンド部の研究開発

チャンネル帯域幅 2GHz の OFDM ベースバンドシステムの試作・評価を完了した。正味ビット速度 5.1Gbps (16QAM)、7.8Gbps (64QAM) の変復調部・同期部および無線制御部の試作・評価を完了。周波数利用効率は SISO で 2.55bps 級/Hz (16QAM 時) 以上を確認した。中間周波数回路部 (研究開発項目 2-b②) との I/F である AGC とビーム指向性制御の論理検証を完了した。ビーム指向制御は、装置への制御仕様の実装を完了した。統合試験では、導波管可変 ATT による RF ループバックおよび電波暗室での 300GHz 高周波部との信号試験を経て技術課題の抽出を行った。

2-d) 統合伝送実験

各研究開発項目の要素技術を結合した伝送実験を電波暗室にて実施し、中間目標「距離 10m に対して正味ビットレート 4Gbps」の実現性を検証し、技術課題を抽出した。

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

最終年度の統合伝送実験時に使用する NTN 模擬航空機に搭載可能なアンテナサブシステムと 2 軸アンテナ追尾機構のシステム設計、NTN 搭載用に向けた各部の試作と評価を完了させ、高精度 CFRP 製高指向性利得反射鏡アンテナの 47.6dBi 以上の利得を実測により確認した。

3-b) 100GHz 帯フロントエンド部の研究開発

① 100GHz 帯高出力アナログフロントエンドデバイス

100GHz 帯フロントエンド部に適用する 33GHz 帯 GaN 増幅器 MMIC、および 100GHz 帯 GaN3 逡倍器の設計・評価を完了した。上述を組み合わせた 100GHz 帯 1W 級フロントエンドデバイスの設計・評価を完了し、飽和出力 10dBm の実測値を得た。また、100GHz 動作増幅器の設計を行った結果、広帯域通信用途では 3 逡倍器よりも有効であることを確認した。

② 広帯域中間周波数回路

100GHz 帯フロントエンド部の広帯域中間周波数回路を試作し評価を完了した。

周波数分割多重で用いる 100GHz 帯フロントエンド部および広帯域中間周波数回路を試作し評価を完了した。当初予定していた 3 逡倍方式から基本波ミキサ+リニアアンプへの方針転換に合わせ、RF フロントエンドの再試作と評価を完了し、電波暗室での統合実験に提供した。また、電波天文保護のためのフィルタに関しては広帯域放射する 3 逡倍方式の見直しにより緩和、通常帯域通過型とした。なお、3 逡倍方式の復調アルゴリズムの検討は継続し、BPSK 変調では実験により復調可能であることを証明できた。

3-c) ベースバンド部の研究開発

3 逡倍前のチャンネル帯域幅 0.5GHz・1.0GHz の 16-APSK 変調方式ベースバンドシステムの試作・基本評価を完了。正味ビット速度 2.4Gbps を満たす SCFDE 変調と無線制御部の AFC/AGC の試作・評価を完了した。中間周波数回路部 (研究開発項目 3-b②) やアンテナ (研究開発項目 3-a) との I/F の論理的な機能検証を完了した。三逡倍方式では、デジタルによる理想的な伝送路である複素三乗系を装置実装し、単体ループバックにて復調信号のエラーフリーを確認した。統合試験では、100GHz 高周波部との導波管可変 ATT を用いた RF ループバック (三逡倍方式) および同 (リニアアップコンバータ方式) による変復調信号試験を行い、実伝送路の信号劣化による課題抽出を行った。

3-d) 統合伝送実験

10m 法電波暗室にて、研究開発項目 3-a) から 3-c) の開発成果の結合動作確認を行い、中間目標「距離 400m で正味ビットレート 2Gbps」に対する達成状況の確認と課題抽出

を行った。

(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4年度に検討・設計・試作した要素技術に対して、評価改良を進めていく。具体的には、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の複数チャン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改良し、統合伝送試験を通して、令和6年度に設定した最終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要素技術の改良・評価を継続する。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4年度に検討・設計・試作した要素技術に対して、評価改良を進めていく。具体的には、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改良し、統合伝送試験を通して、令和6年度に設定した最終目標の達成を目指していく。