

令和 6 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 6 年度までの総額 2,040 百万円（令和 6 年度 420 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	6	2
	外国出願	11	4
外部発表等	研究論文	6	1
	その他研究発表	82	22
	標準化提案・採択	12	1
	プレスリリース・報道	5	3
	展示会	4	1
	受賞・表彰	3	1

(7) 具体的な実施内容と最終成果

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

低損失な誘電体材料の選定をおこない、多重のシーケンシャル給電により広い周波数帯域を持つ円偏波パッチアレーアンテナを開発および試作した。統合伝送実験の種類に合わせて、4 ポートの電力合成を可能とする 4x4 素子 4 ポートアレーアンテナ、軸比特性の良好な 4x4 素子 2 ポートアレーアンテナを MIMO 実験向けに開発し、16dBic のアンテナゲインと、±15 度のビーム制御機能を確認した。また、高いアンテナゲインを得るためにレンズアンテナを開発、最大 47dBi のゲインが得られた。さらに、最終目標に合わせて 8x8 素子 2 ポート右旋円偏波アレーアンテナを試作、利得 24dBic が得られる見込を確認した。統合伝送実験に向けて、導波管接続回路によるインターフェースの設計・試作をおこない、これにより通信距離 70m 以上、MIMO による 20Gbps 以上の通信速度を実現するアンテナモジュールを提供した。

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

高周波アナログフロントエンドデバイスに適用した高周波特性に優れる InP 系 HEMT（高電子移動度トランジスタ）について、ゲート微細化トランジスタプロセスの高効率化検討の結果を適用して HEMT を試作・評価し、回路設計の高精度化に向けた HEMT 構造とノイズの関係の解析を進めた。その結果、HEMT 単体のインパクティオン化を抑制することで、無線システムの受信側アンプとして期待される、より低ノイズな LNA（Low Noise Amplifier）が設計できることを実験的に明らかにした。HEMT 単体のインパクティオン化を抑制する方法としては例えば、ダブルドープ構造や非対称リセス構造といった技術が提案されており、これらの技術が 300 GHz 帯 LNA の低ノイズ化に寄与する可能性が高い。これらの解析によって 300GHz 帯無線通信用 IC の性能向上と、これによる設計マージン拡大に向けた重要な知見が得られた。

さらに、アナログフロントエンド部用の高周波モジュールの将来に向けた小型化およびアンテナ接続性のさらなる向上のために、これまで個別モジュールとして実現してきた 3 つの構成要素（アンプ、ミキサ、フィルタ）を格納したマルチチップモジュールの設計・試作を行った。その結果、マルチチップパッケージに実装された IC は、同パッケージ内の構造に影響されることなく、個別モジュールと同等の特性を発揮できていることが示された。マルチチップモジュールの通過特性は、理想的な接続した際に期待される通過特性と良く一致しており、動作周波数である 280-290GHz においては、マルチチップモジュールの

挿入損失が1～2dB程度小さい結果となり、極めて良好な挿入損失が得られた。ただし、ICの特性ばらつきも考慮した検討が必要であるため、挿入損失の同定にはさらなる詳細データと解析が必要である。アナログフロントエンド部の体積削減検討の効果については、昨年度の小型モジュール検討結果を合わせて考えると、モジュール占有体積は54%程度削減できる見通しを得た。さらに本マルチチップモジュール化により、3つのモジュール間の導波管接続部が無くなるため、接続端面での損失発生の懸念が解消、機械強度の向上が実現できる。

② 複数チャンネル中間周波数回路

帯域幅2.16GHzの2チャンネルに対応した広帯域の中間周波数回路を開発し、16GHz帯と4.4GHz帯の周波数変換動作を確認した。研究開発項目2-a)の多素子アンテナ(4×4素子1ポート、4×4素子2ポート、4×4素子4ポート)に対応した300GHz RFフロントエンド部および、中間周波数回路を試作し、複数の装置構成で実施した統合伝送実験に提供した。

2-c) ベースバンド部の研究開発

広帯域ベースバンドシステムについて、TDDに対応したフレームフォーマットを策定、占有周波数帯域2GHzのMIMO-OFDM変復調部(実機はZF:Zero Forcing等化器、シミュレーションはZF等化器およびZF-SIC:Zero Forcing with Successive Interface Cancellation等化器)、RF/IFアナログフロントエンドの振幅と位相の特性を補償するプリコレクション部、5.5dB以上の高符号化利得を有するBCH_LDPC接続符号FEC部(符号化率0.5～1)からなるリアルタイム伝送装置の試作とシミュレーション検証を完了した。実効データ速度は2×2MIMOの同一偏波条件で19.65Gbps(64QAM×2、ベースバンド4.4GHz IFループバック)を実証(シミュレーションでは4×4MIMOまで検証済)し、H.265の圧縮動画で231人(一人1ストリームあたり85Mbps)の伝送容量に相当することを確認した。

ビームフォーミング制御技術について、研究開発項目2-a)のパッチアンテナに見立てた4×4および8×8正方アレイアンテナのモデルを用いて、受信SNRを最適化するための網羅的探索法(ESA:Exhaustive Search Algorithm)ベースのCodebook探索アルゴリズムの動作検証を完了した。伝搬チャネル行列を送信側と受信側で共有できる伝搬条件に於いて、探索後の各アレイの重み係数から得られる合成の放射パターンのピーク方向がそれぞれのアンテナの対向角度となることでビームステアリングの基本動作を確認した。

2-d) 統合伝送実験

各研究開発項目で試作した成果を用いた統合の実験系を組み上げ、スタジアムの屋内に見立てた実フィールドの地上間伝送実験(早稲田アリーナ、無線局免許状_関実第54270号)を実施。通信距離を優先したシングルストリーム伝送については、OFDM変調波の伝送(QPSK、16-QAM、32-QAM)によって遅延スプレッド4nsの伝搬環境の安定受信を確認、通信距離ではOFDM変調としては世界トップクラスの72.4mの伝送を確認し最終目標の伝送距離70mを達成した。

ビットレートを優先したMIMO伝送については、空間フィルタリングによる同一偏波(RHCP+RHCP)と交差偏波を用いた偏波ダイバーシティ(RHCP+LHCP)の2種類の伝送実験を実施した。MIMO-OFDM伝送にて、空中線電力の制約から1.9m～10mの伝送距離を個別に実証した。その結果、同一偏波の空間多重および偏波ダイバーシティによる空間多重のそれぞれで13.1Gbps(16-QAM、6.55Gbps×2)が得られることを確認し

た。当初計画の4ストリーム構成(RHCP×2ストリームとLHCP×2ストリーム)に適用することで16-QAMで最終目標の20Gbpsを十分に達成可能な見込を得た。32-QAMと64-QAMについては、RFループバックのトータルの受信C/N比がCW波で45dBc(送信AMP出力60dBc、受信部の雑音指数12dB)となったことからOFDM変調波での上限18dB(サブキャリアレベルでは27dBダウン)が裏付けられたことで、今後のS/N比の改善に向けた重要な知見を得た。

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

NTNプラットフォームに搭載可能な環境耐性を有する100GHz帯高指向性利得アンテナとアンテナ自動追尾制御システム(アンテナサブシステム)の開発を完了した。40dBi以上の利得を目標に設計した高指向性利得アンテナについては、試験により、48.6dBi以上の利得を有していることを確認した。

開発したアンテナサブシステムに早稲田大学開発のダウンコンバータ(D/C)ユニットを搭載し、地上局間通信試験の統合伝送試験に提供した。その後、実験用航空機にサブシステムをインテグレーションした状態で地上局～航空機間通信試験の統合伝送試験に提供し、実験時のアンテナ自動制御システムの機上運用と地上実験局の準備と運用支援を行った。

地上実験局～航空機間の通信実験時の高指向性利得アンテナの駆動履歴から、地上実験局に対する追尾誤差を評価した結果、0.2度以下の追尾誤差が実験時間の最大66%あることを確認した。

地上実験局については、飛行中の実験機をカメラで追尾撮影した上で航空機認識AIにより認識させ、地上実験局のアンテナの向きをカメラの向きから予測し、半自動的に追尾するアンテナ追尾機構を提供し、最大1分半にわたり、指向誤差1度以内の航空機追尾運用が出来ていることを運用履歴から確認した。

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

デバイス平均寿命 10^6 時間以上、かつNTN環境を担保するための宇宙用信頼性を確保したGaNデバイスプロセスを用いて、3逓倍方式と線形増幅方式との2方式のGaN系高出力アナログフロントエンドデバイスを開発した。3逓倍方式デバイス開発では、Ka帯CW動作におけるGaN増幅器として世界トップ性能を有する結果を得た。さらに、線形増幅方式デバイス開発では、100GHz帯動作GaN MMIC(Monolithic Microwave Integrated Circuit)増幅器と、その増幅器を用いた増幅器モジュールを開発した。線形増幅方式100GHz帯フロントエンドデバイスで出力電力1W以上を達成した。

② 広帯域中間周波数回路

研究開発項目3-b)①および3-c)と連携して、100GHz帯増幅器の評価環境を整備し、GaNデバイスを広帯域変調信号で効率的に駆動できるように、三逓倍方式の増幅器と、100GHz帯の増幅器を用いたRFフロントエンド部の試作および改良を実施した。また、ベースバンド部で用いる16GHz帯と100GHz帯テラヘルツ信号を相互変換する広帯域中間周波数回路を開発した。フロントエンド部の航空機等への搭載方法に伴う設計変更などを含めて、統合伝送実験に試作モジュールを提供、屋外伝送における伝搬特性の測定も実施した。

3-c) ベースバンド部の研究開発

広帯域ベースバンドシステムについて、FDD と TDD に対応した Single Carrier (SC) のフレームフォーマットを策定、占有周波数帯域 1.25GHz (1GBaud、ロールオフ率 0.25) の SC 変復調部 (Frequency Domain Equalizer 等化器)、RF/IF アナログフロントエンドの振幅と位相の特性を補償するプリコレクション部、パワーアンプの AM 及び PM 歪みを補償する DPD (Digital Pre-Distortion) 部、5.5dB 以上の高符号化利得を有する BCH_LDPC 接続符号 FEC 部 (符号化率 0.5~1)、適応変調部からなるリアルタイム伝送装置の試作とシミュレーション検証を完了した。また、ハードウェアと FPGA 論理設計を 2-c) と共通化することで開発効率を改善した。実効データ速度は 32-APSK で 3.70 Gbps を確認した。この結果により、帯域幅 2GHz を用いることで、データ速度 10Gbps 級へ対応できる目途を確認した。適応変調技術は、変調方式と FEC の符号化率を組み合わせたマルチコーディングスキームの受信 SNR ベースでの制御方式を仕様策定し、リアルタイム動作を検証完了した。

3-d) 統合伝送実験

各研究開発項目の成果物を統合し、地上間および上空との伝送試験を実施した。地上間伝送実験では、距離 4.4km に対してビット速度 4Gbps の通信を確認した。上空との伝送実験では、上空 2896m を飛行する航空機を追尾し、距離 3.5km に対してビット速度 4Gbps の通信を確認した。回線設計の確認により、送信機の出力増や航空機のレドームの減衰減などを効力することで、高度 20km の通信が実現することを確認した。また、実験で用いた帯域幅 1.25GHz に対して、92GHz から 104GHz の周波数帯で 6 チャンネルを設定することで、ビット速度 20Gbps 以上の通信を実現する見通しを確認した。

(8) 研究開発成果の展開・普及等に向けた計画・展望

研究開発項目 2 においては、計画時に想定していた「アクセス回線」における実用化の他に、大容量中距離通信の利点を生かした「バックホール」での社会実装も想定した。総務省が発行した令和 6 年度情報通信白書によれば、国内外の 2023 年の機器出荷額として、携帯基地局 400 億ドル、無線ローカルエリアネットワーク (WLAN) に対応する小型基地局 (室内用) 330 億ドル、ネットワークバックボーン機器 (光伝送機器) 150 億ドルであった。この携帯基地局のうち、5G 基地局の市場規模は、2023 年に 22.5 億ドルで、2026 年の予測値は 23 億ドルと報告されている。当初の計画から想定している携帯基地局および WLAN 機器の合計数百億ドルの市場に対して、2030 年に想定している 6G 時代に今回の研究成果が実用化に貢献するよう展開を継続する。さらに、研究開発の途中で想定を広げたバックホールとしての応用では、光伝送を前提としている市場規模 150 億ドルのネットワークバックボーン機器のうち、ファイバー敷設が困難な場所などの適用として実用化が期待できる。この機能は、6G への転換前の実用化も考えられるので、引き続き社会実装に向けて検討を継続する。

研究開発項目 3 においては、HAPS など NTN とのフィーダーリンクにおける実用化を想定した。同情報通信白書によれば、5G NTN の市場規模は、2023 年に 49 億ドル、2026 年の予想が 88 億ドルと拡大傾向にある。また、研究開発項目 2 と同様に「地上間通信」や「バックホールシステム」としての応用も考えられる。現在、80GHz 帯までの無線伝送システムが実用化されているが、本課題の研究成果に基づいて 100GHz 帯へ拡張することは比較的短期間に実施できる実用化候補と考えている。

応用システムを視点とした実用化以外においても、アンテナやデバイスなど個別の要素技術が先行して実用化されることも想定して、実用化の推進を継続する。