

令和 5 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 5 年度までの総額 1,620 百万円（令和 5 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	4	2
	外国出願	6	3
外部発表等	研究論文	5	2
	その他研究発表	60	30
	標準化提案・採択	11	4
	プレスリリース・報道	2	0
	展示会	3	2
	受賞・表彰	2	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

多素子パッチアンテナとして、4x4 素子 4 ポートアンテナの試作を行い、各ポート 10dBi 以上のアンテナゲインが得られることを確認した。これで 4 ポートを合成することにより 16dBi が得られる見込み得られた。右旋(RHCP)の 4x4 素子 2 ポートアンテナを 2 個試作し、評価を実施した。アンテナゲインは目標 13dBi に対して、290GHz 近傍で最大 1dB の劣化を確認、誘電体基板を 4x4 素子 4 ポートアンテナで使ったものに入れ替えることなど改善策を検討した。また、通信距離 70m 以上を確認するために、コニカルホーンレンズアンテナの設計・試作を行った。アンテナゲインの設計値 47dBi に対して、近傍界の計測結果から計算した推定値と比較し、設計値通りの試作が得られていることを確認した。

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

アナログフロントエンドデバイスの構成要素であるアンプ IC、ミキサ IC 向けゲート構造微細化新規 HEMT を検討した。IC 製造における新検査工程導入により、HEMT ゲート幅を 52nm から 44nm へ削減することに成功し、 f_{max} が 100GHz 程度向上することを示した。また、さらなる IC 設計の高精度化に向けて NF 評価系を構築した。さらに、統合伝送実験に供するミキサー・パワーアンプモジュールの追加試作を実施するとともに、MIMO アンテナへの接続性を考慮した導波管モジュールの小型化を検討した。小型モジュールおよび従来モジュールはほぼ同じ特性が得られ、特性の乖離は IC 特性や実装ばらつき の範囲内にとどまることを確認した。

② 複数チャネル中間周波数回路

300GHz 系 RF フロントエンド部および複数チャネル同時処理 IF 構成の送受信システムの一次試作を完了、ビームフォーミング制御用の移相回路の動作確認をおこなった。

RF フロントエンド部については、デバイス評価時のダイナミックレンジ 60dB 以上が、RF フロントエンド部に実装したときに 50dB に低減する原因を調査し、迷走する超広帯域スプリアスの発生個所を特定して回路実装上の改良により問題を解決した。また、ビームフォーミング用アレイアンテナによる空間電力合成の実証に供すべく 4x4 ストリーム並列送信器および 4x2 ストリームの並列送受信機を試作し、評価を開始した。さらに、中間周波数(IF)回路に、電圧制御広帯域可変利得増幅器を用いた自動利得制御(AGC)を実装し、制御精度や過渡応答特性など基本機能を確認した。

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改良・評価を完了した。具体的には SISO-OFDM で屋内 70m 伝送に適した短フレーム化・低 PAPR 化・パイロット等化によって RF ループバックにおける受信 SNR を平均 4dB 以上改善した。ドップラシフトの周波数補正は、研究開発項目 2 と 3 で十分な補正範囲である $\pm 1007.080\text{kHz}$ (300GHz で移動速度 3,600km/h) の周波数偏差を装置の対向試験で確認した。

誤り訂正部については、IEEE802.15.3d のビット長 1440bit に対応し BCH/LDPC 接続符号 (符号化率: 1/2, 11/15, 14/15 の切換) の装置実装を完了した。符号化利得は BER= 10^{-6} で 5.5dB 以上 (符号化率 14/15) の効果をシミュレーションで確認した。

MIMO については、2x2 及び 4x4 のシミュレーションモデルによる信号処理のアルゴリズム検討と基本評価、課題抽出を完了した。併せて装置では、来年度の実装に備えて 2チャンネルの 4.4GHz IF 入出力に対応するハードウェアの実装と基本動作の確認を完了した。

2-d) 統合伝送実験

暗室における基礎実験では、AWG とオシロと 23dBi ホーンアンテナを用いた 2-b①と②の RF/IF 部の伝送系で、SC-QPSK (帯域幅 2.16GHz、1.76G シンボル/s) 変調信号が距離 5m で EVM20.8%となり空間伝搬損を考慮した回線設計と一致することを確認した。

次に RF/IF 部に 2-c) の BB 部 (占有帯域幅 1.76GHz、8192 次 FFT、FEC なし) を統合して TX と RX を WR-3.4 導波管 ATT で接続した伝送系では、バックオフの調整後の送信パワーは PA の出力端で -4.95dBm (パワーメータ計測値) であり、64-QAM-OFDM 信号にて受信 SNR 13.56%、EVM 17.36%となるなど、QPSK・16-QAM、64-QAM とほぼ理論カーブに一致することを確認した。

2-a) の右旋 (RHCP) の 4x4 素子 2 ポートアンテナを加えた統合伝送系では、まずビームフォーミングの動作を評価し、30GHz ローカル信号の位相制御によって 284.04GHz (IEEE802.15.3d 15ch) の放射角度が $\pm 24^\circ$ (3dB ビーム幅) で概ね設計と一致しており妥当であることを確認した。

次に、BB 部 (占有帯域幅 1.76GHz、512 次 FFT、FEC なし) と、送信側に電力補償のための直線偏波レンズホーンアンテナ (遠方界利得 47dBi) をもちいた伝送距離の評価では、距離 12m で QPSK-OFDM は EVM 37%、BER 1.3×10^{-2} 、距離 8m で 16QAM-OFDM は EVM 28%、BER 7.5×10^{-2} を得た。別途 CW 波を用いた本実験のアンテナ同士のポインティング損失 (8m で -2dB、10m で -3dB) を考慮すれば、この伝送系の評価結果は、当初の実施計画書の回線設計と照らし合わせて概ね一致しており妥当といえる。

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

3-a) 高利得リフレクトアレイアンテナの研究開発

NTN 模擬航空機に搭載可能な利得 40dBi 以上のアンテナサブシステムと角度精度 0.1 度以下で地上局を連続追尾出来るアンテナ追尾制御システム (実証モデル) の製造を完了した。また、アンテナ追尾制御システム単独の地上検証方法を立案し、検証精度の確認試験を実施し、模擬航空機のアンテナ追尾に使用可能な追尾精度を確認した。さらに、統合伝送試験時に使用する予定の NTN 模擬航空機の飛行時の環境条件 (振動・加速度) を実測して、実証モデルの設計条件に反映した。

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 帯動作増幅器の評価・改良設計、および 100GHz 帯高出力アナログフロントエンドデバイスのモジュール化に向けた検討として、フロントエンドモジュールの基本試作・評価を実施した。100GHz 帯動作 GaN MMIC (Monolithic Microwave Integrated Circuit) 増幅器の改良設計では、これまでの評価結果を考慮して高出力化設計を実施した。モジュールの基本試作では、GaN MMIC 増幅器のチップ端の RF 性能評価値で出力電力 28dBm の結果を得た。

② 広帯域中間周波数回路

3 通倍方式から 100GHz 帯動作増幅器を用いる方式に変更するために、基本波ミキサとリニアアンプ方式に変更(中間周波数の変更)した基本構成について1次試作を実施し、電波暗室における伝搬特性試験により基本性能を確認した。RF 部については、100GHz 帯動作増幅器を搭載した送受信機を試作し、広帯域変調信号化における GaN デバイス特有の挙動を掌握した。IF 部は、方式変更に伴う局部発振器の周波数などを変更に加えて、JAXA 臼田観測所での実装も考慮して、RF 部への局部発振器信号の伝達を光接続対応にして、RF 部と IF 部を分離配置できる構成とした。

3-c) ベースバンド部の研究開発

チャンネル帯域幅 1.0GHz (ロールオフ率 0.25) の 16-APSK、32-APSK 変調方式 SC ベースバンドシステムの改良・評価を完了した。具体的にはドップラーシフトの周波数補正で研究開発項目 2 と 3 で十分な補正範囲である $\pm f_d = \pm 1007.404\text{kHz}$ (100GHz で移動速度 1,100km/h) の周波数偏差を装置の対向試験で確認した。FDE (周波数領域等化器) については、ベースバンドループバックの振幅位相特性を評価し、2GHz 帯域のチャンネルフィルタのアナログ群遅延偏差 2.7ns が補正されることを確認した。

誤り訂正部については、2-c) と同様に、IEEE802.15.3d のビット長 1440bit に対応し BCH/LDPC 接続符号 (符号化率: 1/2, 11/15, 14/15 の切替) の装置実装を完了した。符号化利得は $\text{BER}=10^{-6}$ で 5.6dB 以上 (符号化率 14/15) の効果を 16-APSK と LDPC 符号のシミュレーションで確認した。適応変調については、QPSK を加えた変調方式と三種類の符号化率の組合せを受信 SNR が 10~30dB の範囲で割り当ててループバックで切り換える運用仕様を明確化した。

3-d) 統合伝送実験

高度 16km に対して、ビット速度 20Gbps の通信の実現可能性を検討するための試験方法として、地上局の候補の調査、アンテナ追尾のための航空機の位置把握方法の試作、送受信機のシステム構成の決定をおこない、2024 年度の統合伝送実験の詳細計画を立案した。

地上局の候補として、研究開発項目 3-a) と連携して JAXA 臼田観測所の調査と、代替え手段としての簡易版の地上局の検討を実施した。同様に、研究開発項目 3-a) と連携して上空の飛行体の位置情報の獲得方法について試作評価をおこなった。抽出された重要課題である通信距離の確保およびアンテナの高精度の追尾を解決するために、電波暗室実験、地上での通信実験、航空機実験まで複数段階の実験により確認する詳細計画を立案した。

(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5年度までに検討・設計・試作・改良した要素技術の統合および評価を進めていく。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の研究開発成果を統合し、統合伝送試験を通して、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を統合し、最終目標の達成を確認する。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5年度までに検討・設計・試作・改良した要素技術の統合および評価を進めていく。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の研究開発成果を統合し、統合伝送試験を通して、最終目標の達成を目指していく。