

令和 5 年度研究開発成果概要書

採 択 番 号 06001

研究開発課題名 Beyond 5G に向けた高速ビームステアリング技術の研究開発

(1) 研究開発の目的

1 シンボル以下で任意の方向に高速ビームステアリング可能な要素技術を確立し、Beyond 5G 時代に求められる5つの上位機能①時分割多元接続 MIMO、②移動局の高速ビームトラッキング、③移動局の高速ビームスキャン、④固定無線のビーム位置自動調整、⑤移動体へのワイヤレス給電の研究開発に展開・貢献する。

(2) 研究開発期間

令和 4 年度から令和 5 年度 (2 年間)

(3) 受託者

学校法人立命館<代表研究者>

学校法人湘南工科大学

学校法人早稲田大学

(4) 研究開発予算 (契約額)

令和 4 年度から令和 5 年度までの総額 200 百万円 (令和 5 年度 100 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 高速切替移相器の研究開発

1-a) 高速切替移相器の回路構成の研究開発 (立命館大学)

1-b) 移相器集積回路の研究開発 (立命館大学)

研究開発項目 2 高速切替フェーズドアレーの研究開発

2-a) フェーズドアレービーム制御の研究開発 (湘南工科大学)

2-b) フェーズドアレー構成と移相器要求条件明確化 (湘南工科大学)

研究開発項目 3 高速切替フェーズドアレーの適用技術の研究開発

3-a) 高速位相切り換え信号の評価 (早稲田大学)

3-b) B5G システムにおける高速切替フェーズドアレーの適用技術の研究開発 (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	5	1
	外国出願	2	2
外部発表等	研究論文	5	2
	その他研究発表	48	33
	標準化提案・採択	0	0
	プレスリリース・報道	1	1
	展示会	6	5
	受賞・表彰	1	1

(7) 具体的な実施内容と最終成果

研究開発項目 1：高速切換移相器の研究開発

1-a) 高速切換移相器の回路構成の研究開発

位相切換の高速化を目指して提案した電流スイッチアレイを用いた移相器について、位相切換時間を維持したまま低消費電力化が可能なデジタル直交分離器を新たに提案した。個別部品の組み合わせにより移相器試作機を実現し、5GHz の CW 信号に対して、位相誤差 7.6° の線形に優れた位相制御特性と 100n 秒以下での位相切換時間を実証した。また、さらなる位相切換高速化を目指し、任意位相差を設定可能な DDS ベースの局部発振器回路を新たに提案し特許を出願した。個別部品の組み合わせにより局部発振回路試作機を実現し、位相誤差は僅か 3.2° であること、位相差を 1 クロックサイクルで切換可能であることを検証した。2 年間の研究開発を通して、国内出願 3 件、PCT 出願 2 件により知的財産確保を目指した取り組みを進めるとともに、査読付き国際会議 5 件、一般口頭発表 9 件、展示会 3 件、プレスリリース 1 件により今後の連携や技術展開を志向した外部発表の取り組みを進めた。

1-b) 移相器集積回路の研究開発

項目 1-a) で提案した移相器回路の集積化設計と試作に取り組んだ。項目 1-a) で提案したインピーダンス変換回路による位相切換高速化手法を適用した集積回路設計においては、インピーダンス変換回路の付加により擬似正弦関数回路のセトリングタイムを 16n 秒から 10n 秒以下まで短縮できる見込みを確認した。さらに、項目 1-a) で提案した電流スイッチアレイを用いた移相器の集積回路設計においては、電流モード動作による回路高速化により擬似正弦関数回路のセトリングタイムを 1n 秒強まで短縮できる見通しを確認するとともに、位相誤差を 1.8° 、すなわち 360 度に対して位相誤差を 0.5% まで低減できる見通しを確認した。消費電力については、目標の 50mW 以下の見通しを確認した。さらに、設計した回路の集積化試作を行い、試作 IC にてフォールディング回路の動作を検証するとともに、ベクトル変調器との接続により目論見通りの移相機能を実現できることを実証した。

研究開発項目 2 高速切換フェーズドアレーの研究開発

2-a) フェーズドアレービーム制御の研究開発

64 素子の階段状アレーアンテナのビーム形成特性を予測するため、有限要素法の電磁界シミュレーターを用いて構造設計および試作を行った。X-Z 面のバトラーマトリクス方向で 8 個、Y-Z 面（移相器方向）で 8 個以上、 $8 \times 8 = 64$ ビーム以上のビーム形成を設計及び実測で確認した。バトラーマトリクス回路で形成した X-Z 面の 8 個のビームにおいてビーム間アイソレーション 10dB 以上が得られることを実測で確認した。階段構造となる Y-Z 面の移相器でのビームステアリングを検証し、ステアリング角度として 120 度以上（6dB 幅）が得られることを実測で確認した。装置高さ 10cm 以下の目標値に向け、バトラーマトリクス回路の基板設計と試作を行い 4.4mm 以下の厚みを確認した。8 枚を階段状に構成し装置サイズ 10cm 以下を達成見込みである。同期信号をユーザ端末探索に用いることで高速化をおこなう制御方法を考案し、MATLAB シミュレーションで有効性を確認し、IEEE の国際会議に採択された。

2-b) フェーズドアレー構成と移相器要求条件明確化

送信用増幅器の設計試作に向け GaN トランジスタを入手し 2GHz および 3.8GHz 帯の設計と試作を行った。2GHz 帯は超小型化設計を行い 20mm \times 33mm の世界最小レベルの小型化を実現した。3.8GHz 帯では RF 出力 10W 以上、効率 60% 以上を実測で確認した。3.8GHz 帯で 8 素子増幅器アレーを試作し平型ヒートパイプを用いた低背の放熱構造を測定評価し温度上昇を約 14° に抑圧できることを確認した。またトランジスタの直流電圧電流特性から増幅器の RF 出力、効率、EVM などを推定する設計手法のプログラムを完成させ、論文投稿し採録された。

研究開発項目 3 高速切換フェーズドアレーの適用技術の研究開発

3-a) 高速位相切り換え信号の評価

オペアンプを用いたアナログ除算器を用いた回路に加えて、FPGA を用いた強度比リアルタイム算出モジュールを作製し、光部品、電子部品の校正精度の改善を進めて、10GHz 以上の

周波数（周波数範囲2GHz以上）の信号に対して、1 ミリ秒以下の切り換え時間に対応した位相変化検出技術を実現した。具体的には周波数 12GHz のマイクロ波の 15 ナノ秒の位相変化が測定可能であることを確認した。

3-b) B5G システムにおける高速切換フェーズドアレーの適用技術の研究開発

70GHz/80GHz ミリ波帯伝送装置に関して、風などによるアンテナの機械振動のアクティブ補償に高速ビームステアリング技術を用いる場合に必要となる構成を、実測された機械振動や実現可能なセンシングシステムを前提に検討した。補償精度と伝送性能のトレードオフの関係をこれまで報告された風雨の影響のモデルなどを参照にして、E バンド帯ミリ波帯伝送装置動作安定化のための基本構成を検討し、伝送距離 150 メートルのシステムでの機械振動と受信電力変動の関係を明らかにした。

(8) 研究開発成果の展開・普及に向けた計画・展望

研究開発項目 1：高速切換移相器の研究開発

移相器回路技術については、より低電力化を目指した電流スイッチを半減できる新回路技術や、アンテナとの実装において位相制御信号を大幅に削減できる制御技術の提案を行い、実用化を想定して技術の完成度を向上させる。集積化技術については、付加価値が高い移相制御チップの完成度向上に努めるとともに、高速ビームステアリングやその他アプリケーションへの展開、実証を目指す。企業との共同研究も検討し、実用化に向けた研究の継続に努める。

研究開発項目 2 高速切換フェーズドアレーの研究開発

階段状アレーアンテナとバトラーマトリクスを組合せる構成、増幅器の配置と放熱方法、高速ユーザ端末探索方法などは新規性があると考えており、学会や展示会等で発表を継続することで広く普及に努める。また、5G/6G 移動通信システムだけではなく、気象レーダーや衛星地球局などへの適用も目指し、気象や宇宙関連などの複数の学会等で発表しアピールを継続する予定である。企業との共同研究なども検討していく。

研究開発項目 3 高速切換フェーズドアレーの適用技術の研究開発

位相測定技術については、さらなる精度向上、周波数範囲の拡大、校正方法の簡便化などを検討し、実用的な技術としての完成度向上を目指す。高速位相易切り替え技術のユースケースとして、アンテナゲインの高いミリ波、テラヘルツ波を使った無線システムを想定し、安定化のためのビーム操作の構成をより具体化し、実用化に向けた研究継続に努める。