

令和 6 年度研究開発成果概要書

採択番号 02401

研究開発課題名 完全ワイヤレス社会実現を目指したワイヤレス電力伝送の高周波化および通信との融合技術

(1) 研究開発の目的

本研究開発ではミリ波帯におけるワイヤレス電力伝送 (WPT: Wireless Power Transfer) と通信の連携・融合を実現し、IoT デバイスの爆発的普及への電力利用インフラ構築する為の基礎検討を完了する。また、WPT セル内において数 100 μ W-数 mW 程度の消費電力を有する受電デバイスを想定したワイヤレス電力伝送システム・デバイス開発の研究を行う。

研究開発項目 1 では、超多素子アンテナシステムの放射近傍界距離での簡易制御手法の適応検討を行う。また、ミリ波多素子アンテナ、高効率ミリ波レクテナ、多素子レクテナなどのデバイス単体での研究を実施する。

研究開発項目 2 では、WPT 装置と通信装置との連携に関する検討を実施する。特に、WPT としては最大 EIRP 75 dBm を有するフェイズドアレイアンテナを開発し、時間同期を想定したミリ波送電装置を構築する。

研究開発項目 3 では既存通信基地局からの電力利用の実現を目指した研究開発を実施する。システム全体での最大効率が得られるようなワイヤレス電力伝送用のダミー信号を生成し、基地局から IoT デバイスに対してワイヤレス電力伝送を行う。

(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

ソフトバンク株式会社<代表研究者>
国立大学法人京都大学
学校法人金沢工業大学

(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 608 百万円 (令和 6 年度 93 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 高周波ワイヤレス電力伝送に伴うデバイス・装置開発

- 1-a) 超多素子アンテナシステム簡易制御・高周波化 (京都大学)
- 1-b) 高周波・超多素子アンテナの最適ビームフォーミング (京都大学)
- 1-c) 高周波レクテナの高効率化 (金沢工業大学)
- 1-d) 微弱電力レクテナ開発 (金沢工業大学)
- 1-e) 受電レクテナの多素子化 (ソフトバンク、京都大学、金沢工業大学)
- 1-f) ビームフォーミングを用いたターゲット捕捉および選択的給電手法 (ソフトバンク)

研究開発項目 2 ワイヤレス電力伝送と通信の連携および融合システム

- 2-a) ワイヤレス電力伝送装置開発と API 化 (ソフトバンク)
- 2-b) ミリ波通信とワイヤレス電力伝送の装置間同期制御手法 (ソフトバンク)
- 2-c) 通信・ワイヤレス電力伝送基地局の一体化 (ソフトバンク)

研究開発項目 3 通信電波の電力利用システム

- 3-a) 既存基地局に対する WPT 制御 (ソフトバンク)

(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	33	12
	外国出願	24	7
外部発表等	研究論文	18	4
	その他研究発表	197	53
	標準化提案・採択	1	1
	プレスリリース・報道	14	0
	展示会	1	1
	受賞・表彰	8	1

(7) 具体的な実施内容と最終成果

研究開発項目 1 高周波ワイヤレス電力伝送に伴うデバイス・装置開発

研究開発項目 1-a) 超多素子アンテナシステム簡易制御・高周波化

- ・ 簡易制御型フェーズドアレーアンテナのビーム走査技術を構築し、4 種類のフェーズドアレーアンテナを開発した。高効率化、製造誤差の低減、ビーム精度の向上を実現し、高性能な簡易制御フェーズドアレー送電装置アンテナを完成させた。
- ・ 低損失移相器の設計が重要であり、さまざまな移相器を開発。90° 移相量で-0.7dB、360° 移相量で-1.7dB から 0.89dB の低損失量を達成し、産業界での実用化が期待される。

研究開発項目 1-b) 高周波・超多素子アンテナの最適ビームフォーミング

- ・ 簡易制御型フェーズドアレーアンテナのビーム走査技術を構築し、4 種類のフェーズドアレーを開発させた。低損失移相器を採用し、高効率化、製造誤差の低減、ビーム精度の向上を実現し、高性能な送電装置アンテナを完成させた。
- ・ 研究開発項目 1-a の簡易型超多素子アンテナを改良し、高効率化とビーム精度向上を目指してビームステアリング技術を構築した。低ロスで広帯域の導波管式移相器を開発し、420 度の位相シフトを実現。特許出願済みのこの移相器を用いて、2 次元ビーム走査可能なスロットアレーアンテナを設計した。

研究開発項目 1-c) 高周波レクテナ開発

- ・ GaAs MMIC に整流器と微小ループアンテナを集積化(AoC 構成)し、マザー基板上にワイヤアンテナを配置し、非接触給電する構成を提案した。
- ・ 入力電力 15dBm、周波数 29.1GHz において 74%の整流効率を達成した。
- ・ 整流器と微小ループアンテナを積載した GaAs MMIC の有効チップ面積は 1mm² 程度であり、一般的な WLCSP 実装とあわせ低廉なスマートフォン用汎用高周波部品と同等の部品コストが実現可能となった。

研究開発項目 1-d) 微弱電力レクテナ開発

- ・ 受電距離 10m 地点(EIRP75dBm の送電)の受電電力-2dBm において、48.7%の整流効率を達成した。また感度点において-16dBm を達成した。
- ・ 整流器と微小ループアンテナを集積化した SOI-CMOS IC に、マザー基板上にワイヤアンテナを配置し、非接触給電する AoC 構成において、アンテナの放射効率 80%と高い放射効率動作を実現した。つまり、CMOS 基板損失、アンテナとの接続損失なしに高効率でレクテナが動作した。
- ・ 整流器と微小ループアンテナを積載した SOI-CMOS IC の有効チップ面積は 1.4mm² 程度であり、一般的な WLCSP 実装とあわせ低廉なスマートフォン用汎用高周波部品と同等の部品コストが実現可能した。

研究開発項目 1-e) 受電レクテナの多素子化

- EIRP75dBm の B5G 基地局と 28GHz 帯 0.18 μ m GaAs レクテナ IC を用いる 2x2 のレクテナアレー【開発⑥a】、アプリケーション端末を組み合わせたマイクロ波送電システムを評価。Case-A) バッテリーレス IoT 端末との組み合わせにおいて、最大送電距離は 20m を達成した。Case-B) Wake-Up 受信機との組み合わせにおいて、最大送電距離 200m を達成した。
- EIRP75dBm の B5G 基地局と 28GHz 帯 0.18 μ m GaAs レクテナ IC を用いる 12x5 のレクテナアレー【開発⑥b】、バッテリーレス IoT 端末を組み合わせたマイクロ波送電システムを評価した。12x5 のレクテナアレーの直流出力の並列および直列合成の数を最適化することで、バッテリーレス IoT 端末が駆動する最大送電距離は 40m まで拡張した。(計算値)。
- 多素子レクテナアレー DC 特性シミュレーション手法確立の完了および電流電圧特性モデルを用いた総合直流特性算出プログラムの作成が完了した。

研究開発項目 1-f) ビームフォーミングを用いたターゲット捕捉および選択的給電手法

- 画像解析および UWB 測位機能のシステムへの組み込み、ならびに TCP/IP ネットワークを介した基地局装置・ビームフォーマとの連携を完了した。研究開発項目 2 での成果の通り、通信フレーム (ms オーダー) でのビーム切り替えおよび、10m で金沢工業大学試作のセンサーモジュールの駆動および近距離通信を介したセンサー情報の取得に成功した。近距離になるほど受電電力は増強され、3m の伝搬距離であれば 10mW 程度の受電となる。WPT セルエリアにおいて数 μ W ~ 数 10 μ W を想定するのであれば、100 個程度のデバイスを収容することが可能となる見込みである。
- 3GPP における Rel-18, Rel-19 の調査を実施し、提案対象となるフィールドを明確化した。Ambient IoT を提案対象として選定し、Ambient IoT との差分を整理して提案内容を絞り込んだ。また、BWF における TG6a/c/d への参加を行った。また、WPT ラボを立ち上げ、当該領域におけるオープンイノベーションの礎を作った。

研究開発項目 2 ワイヤレス電力伝送と通信の連携および融合システム

研究開発項目 2-a) ワイヤレス電力伝送装置の API 化

- 通信用アンテナと WPT 用大開口アンテナを連携させる方式について検討した。WPT アンテナ開発において、イーサネットにより外部制御可能な WPT フェーズドアレー装置の構築を完了した。外部 PC より、フェーズドアレーアンテナのビームチルト角を通信フレーム単位で制御できることを実証した。
- アンテナ素子ごとに振幅・位相制御可能なプログラムの構築を完了した。外部 PC より位相・振幅の設定ができることを確認し、フォーカスビームなどの特殊なビーム形成を可能とするアンテナシステムを実現した。
- フォーカスビームの実証を行い、近傍界領域で送電効率の改善を確認した。また、金工大ワンチップレクテナ結合試験を実施し、同様にフォーカスビームフォーミングによる近傍界領域での受電電力の改善を確認した。
- 試作したアンテナシステムを用いて、金工大試作弱電レクテナ単素子との遠方界結合試験を完了し、5m の距離において 100 μ W の電力受電を確認した。これは、レクテナのアレー化により 10m で 1mW を達成可能な結果である。

研究開発項目 2-b) ミリ波通信とワイヤレス電力伝送の装置間同期制御手法

- OFDM ベースの WPT を実施するにあたり、低 PAPR 信号として Zadoff-Chu 系列 (ZC 系列) 信号を選定した。ZC 系列に基づいた WPT 信号生成プログラムおよびベースバンド装置への組み込みに関する開発を完了した。
- OFDM ベースの信号を整流回路に入力する際、電力・周波数に分布を持った信号が

入力される。一般的な CW での評価では正しく評価できないため、新たに変調波入力による整流回路特性の変化算出方法確立し、理論と実験の結果の一致を確認した。

- OFDM-WPT において、Zadoff-Chu 系列に基づく低 PAPR な WPT ダミー信号の生成により、整流回路の高効率化を実証した。
- TDD による高速スイッチングシステムをベースバンド装置およびアンテナに組み込み、通信フレーム単位で通信と WPT を切り替えるシステムを実現した。1 フレームは 8ms であり、スイッチの切り替えは 1ms のガードバンド内で実現される。

研究開発項目 2-c) 通信・ワイヤレス電力伝送基地局の一体化

- 通信・WPT 連携システムの高効率化のため、通信/WPT 統合装置の機能調査を目的としたアンプ試作を完了した。スイッチングにより、通信と WPT フレームにおいてアンプのモードを切り替えることにより、各入力信号の型式に対して最適化されるような回路設計を実現した。
- アウトフェーシング増幅器の出力にリアクタンス補償回路を用い、通信と WPT に最適化したアンプ特性を実現した。
- 簡易アンテナ/高効率レクテナを用いた統合実証を完了し、国際会議 (WPTCE2024) で動態展示の実施を完了した。2025 年 3 月実施予定の最終試験では、送電アンテナの利得増強および受電レクテナ素子数増強を行い、10m で 1mW 程度の電力受電を目指す。
- アドバンストな実施内容として、アンテナシステムの 5G システムとの接続を実施完了。5G OAI 装置で生成した 5G 信号をもとに、京都大学試作の簡易大開口アンテナを用いて WPT を実施し、金沢工業大学施策の高効率レクテナによる受電を確認した。

研究開発項目 3-a) 既存基地局に対する WPT 制御

- 通信アンテナと WPT アンテナを一体化する方式について検討した。通信ベースバンド装置に対して、ZC 系列信号をベースとした WPT フレームの実装を完了し、研究開発項目 2 と同様に、TDD に基づいた通信・WPT 信号を出力することを確認した。
- ベースバンド装置とアンテナ装置を SPI により連動させ、通信/WPT フレームに連動して切り替わる TDD ベースのアンテナビームフォーミングを確認した。
- WPT ビームのチルト角を所望方向へ向けるため、画像認識および UWB 測位システムをネットワーク経由で統合した。受電デバイスの動きに追尾して、アンテナチルト角が制御されることを確認した。
- 上記システムにおいて屋外実証を実施し、画像解析/UWB による追尾機能・アンテナ制御、電力受電、通信が実現されていることを確認した。

(8) 研究開発成果の展開・普及等に向けた計画・展望

本研究で得られるワイヤレス電力伝送成果を用いて、IoT デバイスやセンサシステムに対する通信および電力をワイヤレスで提供することを目指す。電力と通信の融合システムのサービスプラットフォームを構築し、端末ごとに電力利用可能なインフラの構築を目指す。ワイヤレス電力伝送及び通信プラットフォームを構築し、BtoB もしくは BtoBtoC のビジネス化を果たす。BtoB ユースケースとしては、工場内センサシステムや倉庫等での電子タグ・電子棚札への給電・通信を実現する。BtoBtoC ではウェアラブル IoT デバイスなどに対して屋外・パブリックスペースなどで通信とともにワイヤレス電力伝送サービスを展開する。2024 年までの研究開発フェーズを経て、2030 年までに PoC の実証、標準化・制度化を通し、通信・ワイヤレス電力伝送サービスの展開を目指す。2030 年以降、インフラを構築し、全国的なワイヤレス電力伝送機能を有する B5G サービス展開を目指す。