

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	21	8
	外国出願	16	6
外部発表等	研究論文	14	6
	その他研究発表	144	59
	標準化提案・採択	0	0
	プレスリリース・報道	14	0
	展示会	0	0
	受賞・表彰	7	3

(7) 具体的な実施内容と成果

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

【目標】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。2023 年度の検討では受電デバイス開発として、1mW 以下の微弱な電波を受電するレクテナとレクテナの多素子アレー化を継続して検討する。さらに、受電デバイスの位置検出手法および送電アンテナへの組み込み手法を検討する。2022 年度に開発したビームフォーミング制御の簡易化を行った大開口多素子アンテナを引き続きシステム要求に合うように改良を行いつつ、レクテナアレーの整流効率の減少を抑えるための放射近傍界フラットトップビーム等、ワイヤレス給電に求められる効率重視の最適ビーム形成の検討を行う。

・1-a) 超多素子アンテナシステム簡易制御・高周波化

2022 年度に目標達成済み。

・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

2023 年度は研究開発項目 1-a) で構築した簡易型超多素子アンテナを改良しつつ使用し、拡張性の高い超多素子アンテナでの簡易ビームステアリング技術を構築した。本研究では、簡易制御フェーズドアレーと 2 段ロッドマンレンズ制御型の 2 種類のフェーズドアレーを開発し、焦点ビームなどの最適ビームフォーミングも実現した。さらに、空間電界合成法と導波管式低損失移相器を開発し、ビーム走査可能な大規模スロットアレーアンテナを設計した。昨年度からは、より高い効率化、製造誤差の低減、ビームの精度向上を目的としたアレーアンテナをバージョンアップし、より高性能な送電装置アンテナを設計した。

京都大学が開発した金属板移動式移相器を用いて、フレネルレンズ原理に基づく簡易制御フェーズドアレーを構築した。このフェーズドアレーは X 軸と Y 軸の 2 つだけの制御量を持ち、2 次元のビーム走査を実現した。この成果について、発明特許を出願した。

2 段ロッドマンレンズ制御型フェーズドアレーは、入力ポートを切り替えることで 2 次元のビーム走査が可能である。これを実現するための垂直給電構造を開発し、従来実現が困難であった 2 段ロッドマンレンズを製作することができた。

最適なビームフォーミングを実現するためには、位相と振幅を制御する必要がある。昨年度に開発した焦点ビームをさらに進化させ、サイドローブが低く、伝送効率が向上した平坦な焦点ビームを開発した。

さらに大電力無線電力伝送システムを実現するために、低ロスの導波管式移相器を開発し、広帯域かつ低ロスで 420 度の位相シフトを実現した(実測結果: S21: 0.89dB~1.49dB@23~30GHz, S11: <-10dB@25GHz~30GHz)。導波管式移相器については、発明特許を出願中である。この移相器を使用して、2 次元ビーム走査が可能なスロットアレーアンテナを設計した。

・1-c) 高周波レクテナの高効率化

ループアンテナと整流器を集積化した 0.18 μ m GaAs レクテナ MMIC をマザー基板上のワイヤアンテナと非接触給電する構造での高効率整流動作を実証した。

はじめに、28GHz 帯 0.18 μ m GaAs レクテナ MMIC 単体を試作および測定評価した。アンテナ利得 3.1dBi、整流効率 71.1%@入力電力 16.2dBm、開放負荷での出力電圧 0.5V(電源回路の動作条件)で定義した感度点-8.0dBm が得られた。次に 28GHz 帯 0.18 μ m GaAs レクテナ IC とマザー基板上のワイヤアンテナの組合せたレクテナを試作および測定評価した。アンテナ利得 5.4dBi、整流効率 74.0%@入力電力 15.0dBm、感度点-12.0dBm が得られた。5G の全帯域をカバーしている。過去の発表を 10 ポイント凌駕し、世界最高の効率を達成している。

・1-d) 微弱電力レクテナ開発

ループアンテナと整流器を集積化した 45nm SOI-CMOS レクテナ IC をマザー基板上のワイヤアンテナと非接触給電する構造の試作および 10 μ W 程度の微弱電力での受電動作の実証を行った。

はじめに、28GHz 帯 45nm SOI-CMOS レクテナ IC 単体を試作および測定評価した。アンテナ利得-2.3dBi、整流効率 57.1%@入力電力 0dBm が得られた。また、感度点-15.0dBm と、世界最高の感度性能を達成している。しかしながら、Si 基板の損失でアンテナは低利得を示している。このアンテナ利得の低下を解決するために、マザー基板上のワイヤアンテナとの電磁界結合する構造のレクテナを設計した。現在、レクテナの試作は完了し、性能評価中である。

より高い実効的な感度特性を得るため、高アンテナ利得・高インピーダンスとなるマイクロストリップアレーアンテナ構造を提案した。EM 解析でアンテナ利得 16dBi 程度が得られた。

・1-e) 受電レクテナの多素子化

項目 1-c で試作したレクテナを用いたレクテナアレー構造の検討を実施、2X2 アレーを試作および測定評価した。入出力合成で、直列・並列合成ともに単体のほぼ 4 倍の電力が得られた。感度点は-15dBm が得られており、単体の-12dBm から 3dB 改善され、所期の効果を確認できた。

・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

UWB による三点測位および画像解析について検討した。特に、使用するアンテナ半値幅である $\pm 3^\circ$ の捕捉制度が達成可能かどうかについて検討した。

UWB 三点測位では ToF(Time of Flight) および AoA(Angle of Arrival)による位置検出を実現する。ToF では親機・子機間での応答時間を検出する。また、AoA では親機アンテナにおけるアンテナ素子間位相差を検知し、子機から放射される電波の到来角を推定する。本検討では、UWB システムに ToF/AoA を組み込んだ高精度測位システムについて検証した。測位実証結果より、高精度にアンテナ角度情報を取得可能であることを確認した。また、測位制度は $\pm 3^\circ$ を下回っており、本システムに適合する制度が確保されることが確認された。

本研究では、機械学習 AI を用いた画像解析によるターゲット捕捉についても検討した。今回は例として、ミリ波ホーンアンテナを機械学習させアンテナを囲む Bbox を検知するような画像認識システムを構築した。本システムでは、カメラで補足したターゲットの画像上の 2 次元位置情報を角度情報に変換し、アンテナビーム角度を制御する。カメラと送電アンテナは研究開発項目 3-a で後述する TCP/IP によるハード間通信連携システムに基づいて接続される。検証試験において、ターンテーブル上にカメラを乗せ、 $\pm 10^\circ$ 回転させたときの角度情報を取得した。

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

【目標】研究開発項目 2 では、通信装置と電力伝送装置間の連携手法について検討する。2023 年度の検討では、開発した送電アンテナと通信用アンテナを時分割により連携するシステム検討を完了し、実証試験を行う。

・2-a) ワイヤレス電力伝送装置のAPI化

2022年度までに実施完了済み

・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

2022年度までに実施完了済み

・2-c) 通信・ワイヤレス電力伝送基地局の一体化

通信・WPT フレームに連動してアンプを切り替えることで通信・WPT 装置の高効率化を実現する。本構成では、通信フレーム時には通信用アンプをアクティブとすることで、リニアリティの高いドハティアンプなどを用いた高品質信号増幅を実現する。一方で、WPT フレーム時にはWPT 用アンプをアクティブとすることにより高効率な信号増幅を実現する。

1stステップでは機能実証を目的とし、低周波での実証を行う。試作結果ではWPT 用アンプでは最大 83.1%のドレイン効率が得られたのに対して、通信用アンプでは最大 70%以下の効率にとどまっていることが確認された。一方で、WPT 用アンプでは 42dB 以上の入力電力において利得圧縮したのに対して、通信用アンプでは 45dB 以上の入力電力領域で利得圧縮が確認された。以上より、WPT アンプでは効率向上の効果を、通信用アンプではリニア領域の拡大をそれぞれ確認した。

研究開発項目 3 通信電波の電力利用システム

【目標】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を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。2023年度の検討では、通信アップリンクより得られる端末情報に基づき、基地局装置にて WPT ビーム制御システムを実施するシステム構成について検討・実証する。

・3-a) 既存基地局に対するWPT 制御

UWB 測位情報をアンテナ制御に利用する、測位 - 通信連携システムを構築した。本システムでは、3次元位置情報をアンテナ角度情報に変換し、ワイヤレス電力伝送のビーム制御を行う。本システムはTCP/IP によるハード間通信連携を行う。python ベースで構築されたソフトウェアにより位置情報を解析し、測位解析装置から TCP/IP およびモバイル通信を介して Master 装置側にターゲット位置情報およびデータを伝送する。本システムを用いることで、UWB 測位情報に基づくアンテナビーム制御が可能となる。Master 装置側では、受信したターゲット位置情報に基づきWPT フレームにおけるミリ波アンテナビーム角を制御することにより、WPT ターゲット方向にビーム制御可能となる。UWB 測位情報に基づき WPT ビーム角が指定方向に制御されることを確認した。

画像解析情報をアンテナ制御に利用するシステムを構築した。本システムは Master 側に画像解析装置をアサインし、カメラから得られる画像情報をアンテナ角度情報に変換してビーム制御を行う画像解析自体の精度検証は研究開発項目 1-f に示した通りである。今回の検証では、画像解析装置とアンテナ装置を統合し、指示道理アンテナビーム制御が可能かどうかを実証した。本実測では、アンテナ及びカメラをターンテーブルに乗せ、 $\pm 10^\circ$ の角度を与えたときに、アンテナビームが所望角度に制御されるかどうかを確認した。アンテナ角制御を行った場合、正面方向からの受信電力の劣化は見られなかった。開発した画像解析とビーム制御の統合システムにより、 $\pm 10^\circ$ において受電電力が大幅に改善していることから、本システムが有効に機能していることが確認できた。

画像解析によるアンテナ制御試験について、屋外環境での動作検証のため九十九里浜でのシステム検証を実施した。屋外実験では陸上移動局相当実験試験局（ソフトバンク 29GHz ミリ波アレー実験局）を用いた電波伝搬試験において、QAM/PSK 時空間分離試験を行うものである。時空間分離試験において、画像解析に基づくミリ波ビームフォーミングを検証した。今回の検討では、TDD フレームに対して 16QAM/PSK 信号をそれぞれ割り当てた信号を生成し、PSK 信号のみを移動する受信アンテナで検波するという内容の試験を行った。画像解析によるターゲット位置情報に基づき、PSK 信号フレームにおけるビームを制御するシステムを示す。試験では、検波器として 18dBi ホーンアンテナ及び金工大試作整流器を利用した。約 9m の伝搬試験において、ホーンアンテナをスライダにより位置を移動させた場合であっても、画像解析による位置検出により、全領域にわたり伝搬特性が大幅

に改善されていることが確認できた。また、56dBm の EIRP で電波を照射した場合、最大電力として -20dBm の DC 電力を検波することに成功した。この成果より、WPT として本試験から +20dB 程度の電力増強により 1mW 程度の DC 電力を受電できることが予測される。これは UWB による位置検出においても同様の結果が得られるものと予測される。

2025 年 3 月までには、モバイル通信システムにおいて UE との接続及び WPT のアドイン機能の実装検証までを完了する予定である。

(8) 今後の研究開発計画

【京都大学】

京都大学では最終年度の検証実験に向けて、75dBmEIRP を実現するための高周波・超多素子アンテナを製作および検証する。送電電力が 43dBm (約 20W) 程度で、アンテナの利得が 32dBi と考えられている。高周波・超多素子アンテナを製作に向け、32分配器、ビーム走査可能なスロットアレーアンテナなど開発を展開し、動作確認した上に、2次元ビーム走査可能なフェーズドアレーアンテナを完成させる。また、送電システムを完成させ、最適ビームフォーミングを実現するための送電電力とアンテナ利得のバランスを最適化する。さらに、最適ビームのアルゴリズムはフェーズドアレーを使用して検証し、送電効率の向上とビームステアリングの精度を高めることを目指す。

【金沢工業大学】

2024 年度は、さらなる高感度化に向けて、高放射効率と高インピーダンスを両立するアンテナを提案し、レクテナに適用する (研究開発項目 1-d)。研究開発項目 1-d で開発中の高感度なレクテナを、16 素子以上の多素子化することに取り組む。電源回路を含む電力合成回路を実装し、その効果の確認を行う。(研究開発項目 1-e)

【ソフトバンク】

統合試験実施に向けて、ベースバンド装置の改修を実施する。簡易 WPT アンテナ (京都大学開発) と通信アンテナを連携するために、ミリ波通信ベースバンド装置において、WPT 用信号出力ポートを増設する。通信/WPT ポートはそれぞれ TDD により時分割フレームに連動して信号を出力し、通信/WPT アンテナにフィードする。これにより、WPT アンテナのビーム制御はスタンドアロンで行うことができ、京都大学開発の簡易 WPT アンテナとの統合を容易にする。さらに、研究開発項目 1-f で開発された位置検出装置を簡易 WPT アンテナに組み込むことにより、通信に干渉を与えることなく WPT ビーム制御可能なシステムが構築される。また、最終年度では、これまで実証してきたシステムを 5G コアネットワークに接続する。ソフトバンクがこれまで開発してきた、通信・WPT の時空間多重システムを用いて、5G ネットワークとの接続による通信端末でのデータ送受信とともに、WPT 端末に対する電力給電の両立を実証する。