

京都大学	博士 (工学)	氏名	田中 勇氣
論文題目	IoT デバイスに向けたマイクロ波無線電力伝送システムの開発		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>本論文は、IoT(Internet of Things)デバイスに向けたマイクロ波電力伝送システム(WPT)に関する要素技術・システム開発についてまとめたものである。具体的には、受電デバイスの受電効率向上に向けた小型高効率アンテナおよび受電回路と、人体暴露と電波干渉を低減しつつ大電力を送電可能な分散協調型無線電力伝送システムの理論検討およびシステム開発についてまとめてあり、全6章から構成される。</p> <p>第1章は序論であり、本論文の研究背景として無線電力伝送に関する研究の歴史についてまとめられている。また、普及するIoTデバイスの応用例や課題について述べられており、IoTデバイスに対応する無線電力伝送技術への要求について整理されている。</p> <p>第2章では受電デバイスに用いられる小型高効率な受電アンテナについて提案している。提案するアンテナは既存の板状逆Fアンテナ(PIFA)を元に同形状の無給電素子を回転対称の位置に配置する構成であり、人体近傍における利得低下が0.7dB、共振周波数の遷移が2%未満であり人体の近傍で良好に動作可能であることを示した。本アンテナを電流分布より三つ折りアンテナと呼んでいる。次に、三つ折りアンテナの課題であった実装時の素子位置ずれによる特性劣化を低減可能な構成として、キャビティスロットアンテナを提案した。本アンテナのエレメント部分は1つの金属板から形成されており、実装ばらつきを低減している。本アンテナは三つ折りアンテナよりさらに小型でありながら人体近接時の利得低下が1.3dBであり、三つ折りアンテナと同様に人体上で良好な動作が可能である。さらに、従来の通信用・受電用の独立アンテナを有するバッテリーレスセンサデバイスのマルチパス環境における課題に着目し、無電源で導通状態を維持するRFスイッチ構成について提案した。試作したRFスイッチは消費電力が$1.5\mu\text{W}$と極めて低く、挿入損失が-0.38dBと良好な導通特性を有することを確認した。さらに、電力が到来する方向に対して高い利得を有することが可能なレクテナ構成について提案し、近接したアンテナと複数の整流回路の間にハイブリッドコプラを挿入することにより、整流後の平均電力が1.3倍に向上することを確認した。</p> <p>第3章では第2章で述べたアンテナによって受電した高周波電力を効率的に安定した直流に変換するための回路構成について提案している。本章ではまず整流回路構成について述べ、IoTデバイスに対して倍電圧整流回路構成が有用であることについて論じている。提案した高速測定システムにより得た倍電圧整流回路の出力特性に着目し、MPPT(Maximum Power Point Tracking)制御が有用であることを示した。MPPT制御について、既存アルゴリズムであるOCV(Open Circuit Voltage)-MPPTが有用であることを示したうえで本手法をWPTに適用する際の課題に着目し、新たにリアルタイムMPPT手法を提案した。さらに、2章で提案したアンテナ、RFスイッチおよび3章で提案した電源回路を統合し、バッテリーレスセンサ端末を試作した。試作したバッテリーレスセンサは現行法規制内の出力を有する送電器に対して12m先での無電源動作を確認した。このとき約6秒に1回の頻度で温度・湿度・気圧情報が取得可能であった。</p> <p>第4章では、送電電力を低減しながら受電電力を大きく向上する手法である分散協調型無線電力伝送(DWPT)システムの概念を述べ、受電電力の定式化を行った。DWPTは多数のアンテナを広い空間に分散配置し、連携動作させるものである。本章ではDWPTシステムにおける受電電力の定式化を行った。次に、DWPTの実装される大規模な空間を解析するため、レイトレースシミュレーションおよびモンテカルロシミュレーション</p>			

京都大学	博士 (工学)	氏名	田中 勇氣
<p>ンを用いる解析手法について述べ、既存のビームフォーミング手法と比較して高い電力を安定して供給可能であることを示した。さらに、各送電アンテナの送電位相を最適化するためのアルゴリズムについて提案し、最適化に要するステップ数が無限回であることについて述べた。一方、実用上十分な受電電力に達するまでのステップ数は従来手法と比較して非常に少なく、送電アンテナ数 N に漸近することをモンテカルロシミュレーションにより示した。</p> <p>第5章では第4章で述べた DWPT システムの実装について述べている。送電位相を最適化するための手法として受電アンテナからのバックスキッタを用いる手法を提案し、実際に電力の集中が可能であることを実験により確認した。また、整流回路の非線形特性を利用してバックスキッタ信号を送信する回路構成について提案し、バイアス電圧を印加することによって-40dBm から+10dBm にわたる幅広い入力電力でバックスキッタ信号の生成が可能であることを確認した。さらに、本システムを実証するためにソフトウェア無線機を用いた信号処理システムを実装し、未知の遅延が有するフィードバックシステムにおいて位相の最適化が可能となる台形位相変調手法について提案した。提案したシステムを統合した DWPT システムの実証実験では5秒以内に位相の最適化が可能であることを確認した。また、分散して多数配置される送電器間の配線を低減可能な接続方式である Cascaded 構成について提案されており、Cascaded 構成を実現するための送電器の開発を行った。開発した送電器は位相誤差± 1.5度未満、振幅変動が± 0.15dB 未満であり、高精度な位相制御と安定した振幅特性を実現している。最後に開発した送電器を用いて8台の送電器を用いた Cascaded 構成の送電システムを構築し、実証実験を行った。実験ではシステムの正常な動作を確認し、受電電力の測定結果は理論値と良好に一致した。</p> <p>第6章は結論であり、本研究で得られた成果と今後の課題について述べられている。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文はIoTデバイスに向けたマイクロ波無線電力伝送システムに関する要素技術・システム開発に関してまとめたものである。本論文で得られた主な成果は以下の通りである。

1. 金属や人体の近傍で動作が可能な小型高効率アンテナの構成を提案し、試作・評価を通して有効性を確認した。設計したアンテナは同一寸法の板状逆 F アンテナ (PIFA) と比較して良好な放射指向性特性を有しながら 12.1% の小型化を実現した。
2. バッテリレスで動作可能な WPT 受電端末には無電源で動作するアンテナ用 RF スイッチが必要である。本論文で提案するバラクタダイオードを用いた RF スイッチは無電源で動作し、1 台のアンテナを電力と通信の両用とすることができる。試作されたスイッチは挿入損失が -0.38 dB と良好な特性を有することを確認した。
3. IoT デバイスのような受電デバイスには広い指向性特性が要求される。本論文では複数のアンテナを近接して配置しハイブリッドカップラを介して複数の整流回路と接続することにより広い指向性と高い受電電力を両立可能であることが述べられている。試作したレクテナは実測の結果ハイブリッドカップラを用いない場合と比較して 1.3 倍の平均受電電力を得られることを確認した。
4. 整流回路の効率を高めるためには入力電力に応じた負荷インピーダンスを接続する必要がある。本論文で提案するリアルタイム MPPT 回路はアナログ回路のみで構成され、従来の MPPT 回路と比較して高速かつ広範囲な追従性能を有する。
5. 提案アンテナ、スイッチと従来 MPPT 制御を採用したバッテリレスセンサ端末の設計と試作を行った。センサ端末の設計方法について述べられているとともに、動作実験においては既存の RFID リーダを送電器として 12 m の動作距離を確認した。
6. N 台の送電アンテナを配置し、周波数を同期した上で位相を最適値に制御する DWPT システムについて提案した。位相最適化により受電電力が最大 N 倍となることを示し、従来のビームフォーミングと比較した場合の優位性をシミュレーションにより示した。
7. DWPT システムを実証するために、バックスキッタ信号を用いて位相を最適化する手法について提案した。バックスキッタ信号を受信し位相制御を行うための台形位相変調アルゴリズムを提案し、SDR デバイスと GNU Radio を用いてシステムの実証を行った。実験では 16 台の送電アンテナから 300 mW を送電し、6.5 mW の電力を受電するとともに、シミュレーション結果と良好に一致する結果を得た。
8. スケーラブルな DWPT システムを実現するために、周波数同期構成として Cascaded 構成を提案した。Cascaded 構成を実現する送電器の開発を行い、低コストな構成でありながら位相変調誤差 ± 1.5 度の性能を確認した。本構成で実証実験を行い、理論値と良好に一致する受電電力を確認し、提案構成の有用性を示した。

本論文で得られた成果は学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士 (工学) の学位論文として価値あるものと認める。また、令和 4 年 8 月 22 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。