

学 位 論 文 題 名

電波型パッシブRFIDの高速解析手法および最適設計に関する研究

(Study on Fast Analysis and Design Optimization of UHF-band Passive REID)

学位論文内容の要旨

本学位論文では電波型パッシブ RFID の高速解析手法および最適設計法を提案している。提案している高速解析手法は電磁波-回路結合系解析であり、電波型パッシブ RFID 以外にも、高周波電磁機器や EMC 問題などにおいても有効に使用できる。また、最適設計法についても同様に高周波の電磁機器に利用できると考えられる。本論文の第 1 章では研究背景、研究目的について述べている。第 2 章では電波型パッシブ RFID の概要や通信距離の評価について述べる。第 3 章では電磁波-回路結合系解析について述べ、その手法の高速化を行い、その性能の評価を行っている。第 4 章では提案手法による最適設計を行い、第 5 章では実際に RFID タグを用いる場合を考え、周囲の環境を考慮した特性評価を行う。

近年、RFID タグとリーダから構成され、RFID タグに電源を持たず、電波を用いて通信を行う電波型パッシブ RFID が様々な分野に応用され、発展してきている。電波型パッシブ RFID ではリーダから送信された電波により RFID タグを動作させるため、RFID タグは電波を受信するためのアンテナと、アンテナで受信した微小な交流電圧を整流・増幅する回路を含む IC チップから構成される。リーダから送信することができる電力は定まっているため、リーダ-RFID タグ間で長距離通信を行う場合は、RFID タグの最適設計が必要不可欠である。電波型パッシブ RFID の通信距離を決定するものとして、RFID タグの消費電力と最小起動電圧があげられる。本研究では両者の面から電波型パッシブ RFID タグの通信距離の推定を行った。電波型パッシブ RFID のタグの通信距離は消費電力の根に反比例し、最小起動電圧に反比例することが分かった。また、電力の面からみると RFID タグのアンテナと IC チップのインピーダンス整合を行うことにより、通信距離を最大化でき、電圧の面から検討すると直列共振時における電圧増幅を用いたとき最大化できることが分かった。

電波型パッシブ RFID はさらなる長距離通信化が求められているが、そのためには IC チップの非線形性を考慮した RFID タグの解析が必要不可欠である。IC チップはダイオードや FET などの非線形素子を含んでいるために、強い非線形性を持つが、これまでの研究では IC チップを線形回路と仮定して、アンテナの形状設計などが行われてきた。本研究では IC チップの非線形性を考慮した RFID タグの解析のために、Finite-Difference Time-Domain (FDTD) 法と修正節点解析 (MNA) の連成解析である電磁波-回路結合系解析を提案する。提案手法を用いて RFID タグの解析を行うことによって、IC チップを線形素子に近似する必要がなく、RFID タグの実空間の応答をそのまま解析できる。

しかしながら、提案手法は回路の時定数が電磁波の時定数に比べ大きいとき、非常に大規模な計算機資源を必要とするという問題があった。これは電磁波の解析に用いている FDTD 法の計算コストが MNA に比べ大きく、回路の解が定常状態に収束するまで連成解析を繰り返し行う必要があるためである。このような問題の解決を行うために、過渡解析の定常解への収束を改善することで高速化を行う Time-Periodic Explicit Error Correction (TP-EEC) 法を用いて電磁波-回路結合系解析の高

速化を行う。TP-EEC 法においては、マルチグリッド法から発想された EEC 法と同様に、誤差を収束性の速い成分と遅い成分に分解し、収束性の遅い成分に関する方程式を解く。さらにその解により未知変数を補正して収束性を改善させる。数値実験として、CR ダイオード直列回路と電圧整流増幅回路を半波長ダイポールアンテナに装荷した RFID タグの解析を提案手法により行い、TP-EEC 法の高速化の評価を行ったところ、最大で約 80 倍の高速化を行えることが分かった。

RFID タグはアンテナと IC チップから構成されるため、設計を行う際は両者の相互作用を考慮する必要がある。したがって、本研究では TP-EEC 法により高速化された電磁波-回路結合系解析を用いて、RFID タグの特性解析を行う。そして、その結果に基づき、進化型計算手法により RFID タグの最適設計を行う。IC チップとしてはアンテナで受信した電圧を整流・倍増する必要があるため、電圧整流・増幅回路である 2 段 Cockcroft-Walton(CW) 回路と Dickson Charge Pump(DCP) 回路を IC チップとして用いている。まずはじめに RFID タグアンテナに線状アンテナを折り曲げた形状をしているメアンダラインアンテナ (MLA) を用いて、IC チップを装荷した RFID タグの最適設計について検討を行う。長距離通信化を行うためには、小さい大きさの入射電磁波で高い出力電圧を得ることができればよい。ため、電圧整流増幅回路の出力電圧を最大化することによっても通信距離の最大化を行うことができる。本研究では出力電圧の最大化を行っている。提案手法により RFID タグの最適設計を行ったところ、半波長ダイポールアンテナを用いたものと比較して約 8 倍の通信距離を得ることができた。

実際に RFID タグを用いる場合は、周囲の環境によって入射電磁波の大きさが変化することが考えられる。したがって、そのような環境の変化に対して頑健 (ロバスト) な最適設計を行わなければならない。ロバストな最適解を得るためにはロバスト性を必要とするパラメータの変化に対する評価値の感度や期待値を求め、その結果により最適化を行う。しかし、そのような手法では最適化のために感度解析を行う必要があるため、大規模な計算が必要となる。一方、ロバスト性を必要とするパラメータに実際に起こり得るノイズを加え、パラメータ変化を起こさせながら最適化を行う手法がある。この手法では計算量は通常の最適手法と同程度でありながら、ロバストな最適化を得ることができる。本研究では両ロバスト最適化手法により、入射電波の大きさの変化に対してロバストな解を求めた。その結果、入射電波の大きさに対してロバストな MLA 形状を得ることが分かった。また、ノイズを加えて最適化を行う手法が感度解析を行う手法より良い結果を得ることができるということが分かった。

電波型パッシブ RFID の応用の中には、RFID タグを金属や誘電体などの散乱体の近傍で利用することが考えられ、それらの影響を考慮した RFID タグの設計が必要である。また、電波型パッシブ RFID の長距離通信化のために、IC チップを線形回路と仮定してタグアンテナの研究が行われてきているが、実際に用いられる IC チップは非線形回路であり、更なる長距離通信化のためには非線形回路 IC チップを考慮したタグアンテナの解析が必要である。そこで、本研究では、IC チップとして非線形回路の Cockcroft-Walton 回路を用い、IC タグが散乱体近傍に配置されたときの特性の劣化を解析し、その劣化の対策として誘電体のカバーとスペーサを用いた。

学位論文審査の要旨

主 査	准教授	野 口	聡
副 査	教 授	小笠原	悟 司
副 査	教 授	北	裕 幸

学 位 論 文 題 名

電波型パッシブRFIDの高速解析手法および最適設計に関する研究

(Study on Fast Analysis and Design Optimization of UHF-band Passive REID)

本学位論文では電波型パッシブ RFID(Radio Frequency IDentification) の解析法およびそれを用いた設計について論じている.UHF 帯域パッシブ RFID タグは主にアンテナと集積回路から構成されており, アクティブ型 RFID タグとは異なりバッテリーを有さない.RFID タグは数メートル離れた地点にある RFID リーダが放射した電磁波を受信し, その電磁波からエネルギーを得て動作する. さらにその電磁波に含まれた命令コードにしたがって, 情報をリーダーに返信する. この際, RFID タグは返信する情報をコード化し, それを基に RFID タグのアンテナのインピーダンスを時間的に変化させる. このインピーダンス変化により, リーダに向かう逆散乱波の振幅が変化する. リーダはこの振幅変化を検知することにより, RFID タグの返信した情報を得る. 電波型 RFID は電磁誘導型 RFID に比べて通信距離が数 m 程度と長いため, その特性を生かしたさまざまな応用が検討されている. 特に著者は, センサーを搭載した RFID タグによる環境センシングに注目し, その実現のために本研究を遂行してきた.

本論文の第 1 章では電磁波と回路の結合を考慮した RFID タグの特性解析法, 解析法の高速化, 本解析法に基づく RFID タグアンテナの最適設計法の開発など, 本研究の目的についてまとめている. 第 2 章では電波型 RFID の概要を述べている. また電波型 RFID の通信距離の評価を行っている.

第 3 章では電波型パッシブ RFID タグの高速解析手法について論じている. まず電磁波-回路結合系を解析するための FDTD(Finite Difference Time Domain) 法, 修正節点解析法およびそれらの連成解析手法について詳細に述べている. 電磁波-回路結合の過渡解析を基に, RFID アンテナの最適化を行うためには, 解析の高速化が必須となる. そこで著者は

TP-EEC(Time Periodic Error Correction) 法による過渡解析の高速化法を提案した。著者は TP-EEC 法により、計算時間を従来の 1/5 以下にできることを示した。TP-EEC 法を高周波解析に適用した例は他になく、本研究は高く評価されている。つぎに著者は、上記の結合解析法を用いて、電圧整流倍増回路とアンテナの結合系を解析した結果について論じている。

第 4 章では、3 章で述べた電磁波-回路結合系の解析法を用いた、RFID アンテナの最適化法について述べている。これまで RFID のアンテナ最適化は、アンテナと受動素子の結合系を仮定して行われてきた。しかし実際の RFID の集積回路は電圧整流倍増回路などの非線形回路を含んでいるため、上記の仮定は必ずしも成立しない。そこで著者は、電磁波と非線形回路の結合を考慮して、アンテナの最適化法を提案している。このような最適化は他に例がなく、オリジナリティーの高いものと評価できる。3 章ではまず最適化に用いたマイクロ遺伝的アルゴリズムについて述べ、つぎにそれを用いた最適化結果について論じている。さらに、入射波の変化にロバストな RFID タグアンテナの形状最適化と、複数の目的関数について最適化を行うパレート最適化について、それらの方法と最適化結果について述べている。

第 5 章では、周囲の散乱体を考慮した RFID タグの設計について述べている。RFID タグを環境センシングに用いる際には、それを測定対象物近傍に設置するため、測定対象から電磁的な影響を受けることが予想される。著者は、この影響を最小限にするために、測定対象物と RFID タグアンテナの間に誘電体スペーサを導入する方法を提案している。著者は本法が有効であることを、数値計算結果を基に示している。6 章では、本研究を総括し、得られた結果についてまとめている。

これを要するに、著者は電波型パッシブ RFID の特性を正確に解析するために、電磁波と回路の結合を考慮した解析法を提案し、また本解析法を高速化するための新しい方法の提案している。また著者は解析法に基づいた RFID アンテナの最適化法を提案し、その有効性を示している。さらに著者は RFID タグの環境からの影響を低減するための新しい方法を提案し、その有効性を示している。これらから、著者は電波型 RFID の設計開発のみならず電磁波工学、アンテナ工学、電磁界解析学に重要な寄与をしていると考えられる。よって著者は北海道大学博士(情報科学)の学位を授与される資格あるものと認める。