

## 審査の結果の要旨

氏名 井口 俊太

本論文は「**Research on Low Power RF Circuits and Highly Efficient Wireless Power Transmission for IoT Nodes**」(和訳: IoT ノード向け低消費電力無線通信回路と高効率無線給電の研究)と題し、**Internet of Things (IoT)**アプリケーション向けの低消費電力な無線通信及び高効率な無線給電を実現するための水晶発振回路及び無線送信回路の低消費電力化と無線給電回路の高効率化に関する手法を提示するもので、全5章で構成されている。

第1章は「**Introduction**」(序論)であり、IoT アプリケーションにおいて低消費電力な IoT ノードの実現が必須であることを先行研究の紹介を行いながら議論している。特に、IoT アプリケーション向けの回路設計において無線通信回路及び電力伝送回路の消費電力削減が必須であることを示しており、本研究の背景及び目的を明確にしている。

第2章は「**Low power crystal oscillator**」(低電力な水晶発振回路)と題し、IoT ノードにおける無線通信用の基準周波数生成を行う水晶発振回路に関する3つの低電力化技術を提案している。第2.1節及び第2.2節でIoT ノードにおける水晶発振回路の必要性及び動作原理、低消費電力化に向けた基本方針を示し、ここで得られた知見をもとに第2.3節以降で高速起動可能な水晶発振回路や低消費電力動作が可能な水晶発振回路の提案及び実証を行っている。第2.3節では、水晶発振回路の起動時間を大幅に短縮する「**chirp injector**」及び「**negative resistance booster**」を新規に提案し、これらの技術によって水晶発振回路の起動時間を92%短縮できることを実証し、世界最小の158 $\mu$ sでの起動を達成している。水晶発振回路を高速に起動させることで、水晶発振回路の起動エネルギーだけでなくIoT ノード全体の待機時電力も削減できるため、本技術をIoT ノードに適応することで低消費電力なIoT アプリケーションの実現が可能になる。第2.4節及び2.5節では、それぞれ「**snooze mode**」及び「**stacked-amplifier architecture**」を新しく提案することでIoT ノードが **snooze** 動作及び **active** 動作を行っている場合における消費電力の削減を実現している。具体的には、第2.4節では新規に提案した「**automatic self-power gating**」によって水晶発振回路に新たな動作モードである「**snooze mode**」を追加し、無線通信回路が動作を停止している場合における水晶発振回路の消費電力を大幅に削減し、世界最小の9.2 $\mu$ Wでの基準周

波数生成を実証している。第 2.5 節では、active 動作時に低消費電力かつ低位相雑音な基準周波数生成を可能にする「stacked-amplifier architecture」を新しく提案し、3.3V の I/O 電圧を用いた場合でも Low-Drop Out (LDO)を必要としない低消費電流動作が可能であることを示している。本節で示された  $5.8\mu\text{A}$  の消費電流は従来設計と比較して 91%小さく、本技術の有用性を実証している。

第 3 章は「Highly efficient dual supply voltage wireless transmitter」（複数の電源電圧を用いた高効率な無線送信回路）と題し、IoT ノードにおいて大きな電力を消費しているパワーアンプ及びドライバ段の消費電力削減手法を示している。本章では、はじめに従来の大出力電力なパワーアンプ設計と IoT ノードに求められるパワーアンプ設計の違いをマッチング回路のロスに着目した理論的な解析によって示し、IoT アプリケーション向けの低出力電力な無線送信回路の設計手法を明らかにしている。さらに、近距離かつ低消費電力な無線送信回路設計において複数の電源電圧を使い分けることでマッチング回路のロスを減らすことが必須であることを示し、40nm CMOS プロセスで F 級パワーアンプを用いた無線送信回路を設計及び試作することで複数の電源電圧を使い分けることによる低消費電力化手法を紹介している。

第 4 章は「Misalignment tolerant magnetically resonant wireless power transmission」（位置ずれにロバストな磁界共鳴方式を用いた無線給電回路）と題し、磁界共鳴方式を用いた無線電力伝送技術の課題である送受信コイルの相互間距離が変化した場合における無線電力伝送効率の低下問題を新規に開発した「zero-phase-difference capacitance control」によって改善し、送受信コイル間の位置ずれが発生した場合でも高効率な無線電力伝送が行えることを示している。本章では、高価な測定器（ベクトルネットワークアナライザ）を必要としない低消費電力かつ小型な容量制御手法である「zero-phase-difference capacitance control」を磁界共鳴方式の無線給電回路に適用することで、従来技術と比較して位置ずれがある場合に 1.7 倍の電力伝送効率の向上が行えることを実測によって実証している。

第 5 章は「Conclusions」（結論）と題し、本論文で示された IoT ノード向けの水晶発振回路及び無線送信回路、無線給電回路の低消費電力化及び高効率化に関する手法に関する成果を要約し結論を述べている。

以上のように本論文は、Internet of Things (IoT)ノード向けの無線通信用水晶発振回路と送信回路の低消費電力化と、無線給電回路の高効率化の設計手法を提案するとともに、チップ試作・実測を通じてその効果を実証したもので電子工学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）の学位請求論文として合格と認められる。