

## 論文の内容の要旨

論文題目	Study on RF Energy Harvesting Rectenna System from Ambient RF Signal for IoT Applications (IoT応用向け環境RF信号RFエネルギーハーベスティングシステムの研究)
学位 申請者	Nguyen Thuy Linh

本論文では、IoT応用に向け環境中に存在するRF信号からエネルギーを取得するRFエネルギーハーベスティングシステムの研究を行った。

まず環境中のRF信号の性質を調査し、エネルギーハーベスティングシステムとの関連性について考察を行った。近年の無線通信の高速化に伴い、高度変調されたRF信号のバンド幅も大きくなっており、環境RFから高効率でエネルギーを収集するためには、広バンド幅のエネルギーハーベスティングシステムにすることが必要であることを明らかにした。典型的なRF信号は950MHzのケータイ基地局からのRF信号で、OFDM変調された信号ではバンド幅15MHz、信号強度約-20dBmである。

この分析結果から、RFエネルギーハーベスティング(RFEH)システムのQuality Factor (Q値)がシステムのバンド幅に影響し、Q値をRF信号のバンド幅に対応して適切に設定した構造にすることが必要であることを示した。

次に、RFEHシステムの効率を決める重要な要素である整流器の特性について理論と実験の評価による検討を行った。65nm SOTB(Silicon on Thin Buried Oxide)テクノロジーでボディとソース電極を結合したBody Tied Source MOSFET(BTMOS)構造と、Dynamic Threshold MOS (DTMOS) 構造を用いた3段クロスカップル整流器(CCR)の設計、試作、評価を行った。実験による評価結果では、DTMOS CCRがBTMOS CCRよりも2倍の整流効率が得られることを示した。さらに、RFエネルギーハーベスティングシステムを、高バンド幅のRFエネルギーを確実に収集できるようなシステムとなるようにQ値を適切に設計した。その結果、変調RF信号からのエネルギーハーベスティングはSine波 (CW信号)からのエネルギーハーベスティングよりも効率よく整流ができる。-20dBm程度の信号入力の場合には、変調RF信号ではCW信号に比べて約3.5倍の整流出力が得られることを示した。

さらに、環境RF信号エネルギーを収集するためのRFエネルギーハーベスティングシステムの設計手法について述べた。環境RF信号からのRFエネルギーハーベスティングシステムにおいては、変調入力信号に対応したマッチング回路も含めたQ値の設定が重要であることを示した。この設計手法を用いて、950MHz、バンド幅15MHzのLong Term Evolution (LTE)ケータイ向けのOFDM変調されたRF信号からエネルギーを収集するRFEHシステムを設計した。アンテナインピーダンスが $75\Omega$ の場合Q値は32、 $50\Omega$ の場合Q値を46とすることにより、それぞれバンド幅を62MHzと41MHzと広く取れた。マッチング回路は、半波長ダイポールアンテナと整流器の間に直接挿入したシステムとした。

最後に、設計試作したレクテナを用いて、環境RF信号からのエネルギーの収集を行った。測定の結果、 $75\Omega$ のレクテナを用いた場合で-20dBmほどの950MHzのLTE信号から約3.5uW程度の電力を収集できた。この値は、従来の変調信号からのエネルギーハーベスティング技術に比べて約15倍も大きい値である。また、八木アンテナを用いてアンテナのゲインを増やした場合では7.6uWの電力が得られた。

また、電通大のキャンパスで、収集電力の分布を測定した。場所やビルの階数にも依存するものの、基地局から160mの範囲では概ね数uWの電力が得られることが分かった。これは、RFタグを駆動できる電力レベルであり、RFタグ技術を駆動できるレベルである。都会においては基地局の頻度は高く、都会では広い範囲でRFタグを駆動できるエネルギーハーベスティングを実現できることを示した。

以上のことから、本研究による広バンド幅エネルギーハーベスティングシステムにより、環境中にある高度変調波信号から発電を行い、RFタグの電源として活用できることを示した。

## 論文審査の結果の要旨

学位申請者氏名      Nguyen Thuy Linh

審査委員主査      石橋 孝一郎

委員      範 公可

委員      松浦 基晴

委員      石川 亮

委員      中嶋 信生

本論文では、IoT応用に向け環境中に存在するRF信号からエネルギーを取得するRFエネルギーハーベスティングシステムの研究を行った。本論文は第1章から第6章までの6章により構成されている。

本論文の第1章では、IoT応用におけるエネルギーハーベスティング技術の有用性について述べられている。

本論文の第2章では、環境中のRF信号の性質を調査し、エネルギーハーベスティングシステムとの関連性について考察を行った。近年の無線通信の高速化に伴い、高度変調されたRF信号のバンド幅も大きくなっており、環境RFから高効率でエネルギーを収集するためには、広バンド幅のエネルギーハーベスティングシステムにすることが必要であることを明らかにした。典型的なRF信号は950MHzのケータイ基地局からのRF信号で、OFDM変調された信号ではバンド幅15MHz、信号強度約-20dBmである。

この分析結果から、RFエネルギーハーベスティングシステムのQuality Factor (Q値)がシステムのバンド幅に影響し、Q値をRF信号のバンド幅に対応して適切に設定した構造にすることが必要であることを示した。

本論文の第3章では、RFEHシステムの効率を決める重要な要素である整流器の特性について理論と実験の評価による検討を行った。65nm SOTB(Silicon on Thin Buried Oxide)テクノロジーでボディとソース電極を結合したBody Tied Source MOSFET(BTMOS)構造と、Dynamic Threshold MOS (DTMOS) 構造を用いた3段クロスカップル整流器(CCR)の設計、試作、評価を行った。実験による評価結果では、DTMOS CCRがBTMOS CCRよりも2倍の整流効率が得られることを示した。さらに、RFエネルギーハーベスティングシステムを、高バンド幅のRFエネルギーを確実に収集できるようなシステムとなるようにQ値を適切に設計した。その結果、変調RF信号からのエネルギーハーベスティングはSine波 (CW信号) からのエネルギーハーベスティングよりも効率よく整流ができる。-20 dBm程度の信号入力の場合には、変調RF信号ではCW信号に比べて約3.5倍の整流出力が得られることを示した。

本論文の第4章では、環境RF信号エネルギーを収集するためのRFエネルギーハーベスティングシステムの設計手法について述べた。環境RF信号からのRFエネルギーハーベスティングシステムにおいては、変調入力信号に対応したマッチング回路も含めたQ値の設定が重要であることを示した。この設計手法を用いて、950MHz、バンド幅15MHzのLong Term Evolution (LTE)ケータイ向けのOFDM変調されたRF信号からエネルギーを収集するRFEHシステムを設計した。アンテナインピーダンスが $75\Omega$ の場合Q値は32,  $50\Omega$ の場合Q値を46とすることにより、それぞれバンド幅を62MHzと41MHzと広く取れた。マッチング回路は、半波長ダイポールアンテナと整流器の間に直接挿入したシステムとした。

本論文の第5章では、設計試作したレクテナを用いて、環境RF信号からのエネルギーの収集を行った。測定の結果、 $75\Omega$ のレクテナを用いた場合で-20dBmほどの950MHzのLTE信号から約3.5uW程度の電力を収集できた。この値は、従来の変調信号からのエネルギーハーベスティング技術に比べて約15倍も大きい値である。また、八木アンテナを用いてアンテナのゲインを増やした場合では7.6uWの電力が得られた。

また、電通大のキャンパスで、収集電力の分布を測定した。場所やビルの階数にも依存するものの、基地局から160mの範囲では概ね数uWの電力が得られることが分かった。これは、RFタグを駆動できる電力レベルであり、RFタグ技術を駆動できるレベルである。都会においては基地局の頻度は高く、都会では広い範囲でRFタグを駆動できるエネルギーハーベスティングを実現できることを示した。

本論文の第6章では結論が述べられ、本研究による広バンド幅エネルギーハーベスティングシステムにより、環境中にある高度変調波信号から発電を行い、RFタグを用いたIoTの電源として活用できることを示した。

以上のように、本論文では環境RF信号からエネルギーハーベスティングを行うのに適した構造を明らかにした上で、実際に環境RF信号の収集を行い、従来提案されている方式の10倍以上の効率が得られることを示した。これにより、環境RF信号からのエネルギーハーベスティングがRFタグを用いたIoTに応用できるレベルであることを明らかにした。

本論文の内容は工学的な価値が高く、本論文は博士（工学）の学位論文として十分な価値を有するものと認める。