

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 2 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560403

研究課題名(和文)ワイヤレスセンサー用パルス無線電力伝送の研究

研究課題名(英文)Development of Pulse Microwave Power Transfer System for Wireless Sensor

研究代表者

篠原 真毅 (Shinohara, Naoki)

京都大学・生存圏研究所・教授

研究者番号：10283657

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究はマイクロ波によるワイヤレス給電技術を用い、バッテリーレス・電池レスセンサーの実現を目指した研究である。その成果として、1) バッテリーレス・電池レスセンサーに適したマイクロ波を受電・整流するレクテナ(Rectifying Circuit)の開発、特にワイヤレスセンサーの動作状態の変化によっても効率が変動しない反射波利用型RF-DC整流回路と、本広範囲・高効率で動作するRF-DC-DC整流回路の開発、2) 間欠(パルス)送電による、センサー情報とワイヤレス給電の干渉低減の研究を行い、ワイヤレス給電によるバッテリーレス・電池レスセンサーの開発に成功した。

研究成果の概要(英文)：A purpose of this research and development is to develop a battery-less sensor with wireless power transfer via microwaves. As a result, 1) I succeeded in developing a suitable rectenna, rectifying antenna, for the battery-less sensor application. Especially, I succeeded in developing a RF-DC conversion rectifier of the rectenna with recollection circuit of a reflected microwave which can stabilize the RF-DC conversion efficiency with any connected sensor and also developing a rectifier with DC-DC converter (RF-DC-DC conversion rectifier) whose maximum efficiency keeps high in wide range of connected load, 2) I succeeded in developing the battery-less sensor with wireless power transfer via intermitted (pulse) microwaves which can suppress interference between the wireless power transfer via microwave and wireless communication.

研究分野：マイクロ波応用工学

キーワード：マイクロ波 無線電力伝送 無線通信ネットワーク レクテナ

1. 研究開始当初の背景

ワイヤレス給電は電磁波を用いた無線電力伝送や、磁場を用いた非接触給電等があり、2010年頃より急速に注目を集め始め、実用化の機運が高まった。無線電力伝送の研究は1960年代頃より存在したが、近年の急速なモバイル機器の発達と充電の利便性への要求の高まり、そして2007年位米国で提唱された共鳴型非接触給電の提唱がきっかけとなり、無線電力伝送・非接触給電技術の研究が近年注目され始めた要因となった。特に実用化が加速しはじめたのは、磁場を用いた共鳴型を含む非接触充電と呼ばれるタイプである。電磁波を用いた無線電力伝送は、無線通信と同様に長距離を電力伝送できる半面、無線通信と近い周波数帯を使うため、周波数干渉が懸念され、実用化の一手手前の状態となっていた。

2. 研究の目的

本研究は、近年急速に普及が始まった無線電力伝送・非接触給電システムの性能と利便性を更に向上させるために、特にマイクロ波による無線給電システムを選び、ワイヤレスセンサの無線情報送受信とマイクロ波無線給電が競合しないような間欠(パルス)無線電力伝送用レクテナ(受電整流アンテナ)の研究開発を行う。これまでの無線電力伝送システムは連続マイクロ波による無線給電もしくは電磁界のカップリング現象を利用した非接触給電がほとんどであったが、連続無線給電ではワイヤレスセンサの情報送受信と競合し、通信速度の低下と無線電力伝送効率の低下という双方の性能を低下させてしまう。本研究では間欠(パルス)無線電力伝送に最適なレクテナの開発と通信との時分割による最適ワイヤレス・電池レスセンサー・システムの開発を行い、新しい無線給電システムの実用化を目的とする。センサとしては一般的なZigBeeセンサーを用いる。

3. 研究の方法

(1) マイクロ波を用いた無線電力伝送では、マイクロ波を受電し整流するレクテナが重要な素子となる。レクテナで理論上最も効率が高くなる整流回路はダイオード1つと $\lambda/4$ 線路+キャパシタを用いたシングルシャント整流回路である。シングルシャント整流回路は $\lambda/4$ 線路+キャパシタで高調波合成を行い、結果としてダイオード1つで全波整流回路を実現するものである(図1)。しかし、本提案研究で目的とするパルス波形の整流では、入力マイクロ波に高調波成分を含むこととなり、図1の動作原でそのまま整流動作するとは考えにくい。また、もともとのシングルシャント整流回路の動作説明はキャパシタが非常に大きいとして高調波合成で全波整流を説明しており、実験でも70%以上の高効率を実際に実現しているものの、 $\lambda/4$ 線路が極端に短い場合でも50%以上の実現した例もあり、高

調波合成だけで説明することができるのか、疑念が残る。本研究ではまずこのシングルシャント整流回路の動作原理の解明に主眼を置き、シミュレーションと実験を組み合わせることで解析を行う。

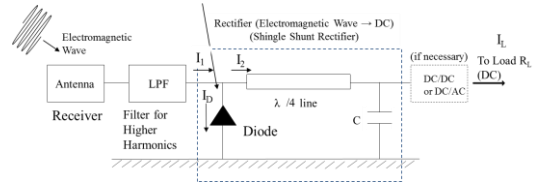


図1 シングルシャント整流回路を用いたレクテナ

(2) 整流回路設計理論を進め、ZigBee センサーに最適なパルス波整流用高効率整流回路の開発を行う。ZigBee を動作させるに適した整流回路とは、パルス波の利用と共に、非常に弱い電力で高効率を実現しなければならないという特徴がある。ZigBee は様々なセンサーの中でも消費電力が小さい。無線電力伝送としては低消費電力センサのほうがシステムとしては適しており、そのために ZigBee を選択しているのであるが、逆にレクテナ整流回路にとって見ると、低すぎるマイクロ波を高効率で整流するのは難しい。レクテナで非常に高い変換効率を実現している理由は、前述のシングルシャント整流回路による高調波処理の他に、ダイオードの抵抗が低くなり、かつダイオードの立ち上がり電圧(V_J)の影響による損失の影響が低い大電力マイクロ波を入力する、つまりダイオードにブレークダウン(V_{br})を起こさない範囲で最大の電圧をかける回路であることに起因する。レクテナ整流回路の高調波に注目した動作解析の結果とあわせ、ZigBee 用低入力パルスマイクロ波送電に最適なレクテナ整流回路の開発を、ADS を用いたシミュレーションと試作を繰り返し実現する。

(3) 無線電力伝送用パルスマイクロ波が干渉しないような時分割システムの開発を行う。開発した高効率レクテナを用い、ZigBee 無線電力伝送システムを完成させる。これまでの研究で通信用マイクロ波と無線電力伝送用パルスマイクロ波を同時に行える電力密度には限界があることがわかっており、更に ZigBee 無線電力伝送システムを高性能化するためには通信用マイクロ波と無線電力伝送用パルスマイクロ波が干渉しないような時分割システムとすることは必須である。そのためのパルス送電という本提案でもある。ZigBee との通信ネットワークにマイクロ波送電システムを組み込み、通信と送電の逆同期をとるアルゴリズムを作る。パルス送電であるため、小型のバッテリーもしくはキャパシタは必須であり、できるだけレクテナを小型化することを念頭に置きながらデューティ比とキャパシタ等の容量、ZigBee 消費電力の関係を最適化する。ZigBee は既存のシステ

ムを用いる。

4. 研究成果

(1) 本研究の送電対象となる ZigBee 端末の通信は一定時間に短時間通信を行う。これまで、通信を行っていない時間に送電を行うことで送電マイクロ波が通信に干渉せず電力を供給することには成功していたが、その時の受電電力利用効率は 27.5%であった。これは電圧安定化回路の入力電圧に対してその入力インピーダンスが変化するため、RF-DC 整流回路の最適負荷からずれることに起因する。シングルシャント整流回路の動作原理の解明に主眼を置いたシミュレーションと実験を組み合わせた解析の結果を用い、様々な整流回路方式を検討した。検討した回路の1つである反射波利用型 RF-DC 整流回路(図 2(a))を作成し評価を行った。RF-DC 整流回路単体の最適負荷より低い負荷範囲において効率の改善が見られた。更に電圧安定化回路および負荷を反射波利用型 RF-DC 整流回路に接続し、間欠マイクロ波を入力し受電電力利用効率を測定した。結果として受電電力利用効率は 51.4%と従来より 23.9 ポイント改善することができた(図 2(b))。

(a)

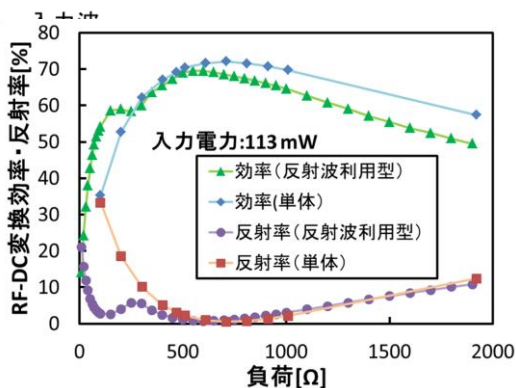


図 2 反射波利用型整流回路 (a) 概念図 (b) RF-DC 変換効率の実験結果

(2) 整流回路の効率の変動は、センサーのような接続負荷の種類・その変動によってダイオードにかかる電圧が変化するために発生する。反射波利用型はその負荷の変化によって発生する反射波を回収・利用して広い負荷範囲での高効率を実現する設計思想であったが、性能に限界があった。そこでさらに接続負荷が変化した場合でもダイオードにかかる電圧を一定・最適化するために、整流回路と負荷との間に DC-DC コンバータを挿入する RF-DC-DC 整流回路を提案・開発した。DC-DC コンバータは通常制御用電源を必要とするが、本研究では整流されたマイクロ波の一部を制御に用い、外部電源不要の RF-DC-DC 整流回路を実現できた。実験により、外部電源不要で、負荷範囲 200Ω から 10kΩ において 66%以上 を得られる RF-DC-DC 整流回路を実現できた。

(3) 送電スケジューリング(図 3)を用いたパルスマイクロ波電力供給システムを構築し、実際にワイヤレスセンサ端末のバッテリーレス駆動を行わせる実験を行った(図 4)。受電装置の RF-DC 整流回路には開発した反射波利用型 RF-DC 整流回路を用いた。1 台のワイヤレスセンサ端末に対するパルスマイクロ波電力供給実験では、24 分間のバッテリーレス駆動及び正常な通信を確認した(図 5)。2 台のワイヤレスセンサ端末に対する電力供給実験では、送電スケジューリングプログラムの不具合によって送電が正常に行われなかったことがあったが、2 台のワイヤレスセンサ共に 74 分間のバッテリーレス駆動及び正常な通信を行わせることができた。

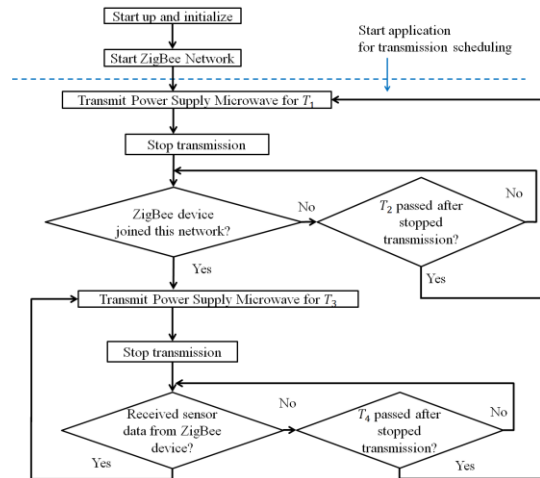


図 3 ZigBee-無線電力伝送共存アルゴリズム

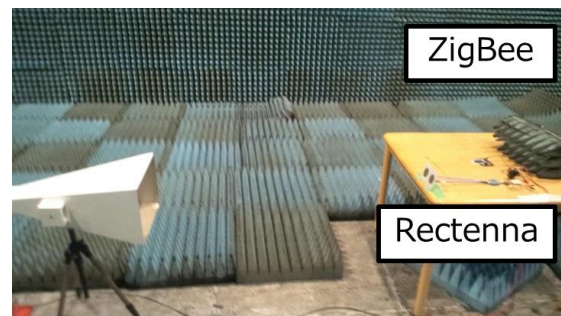


図 4 実験写真

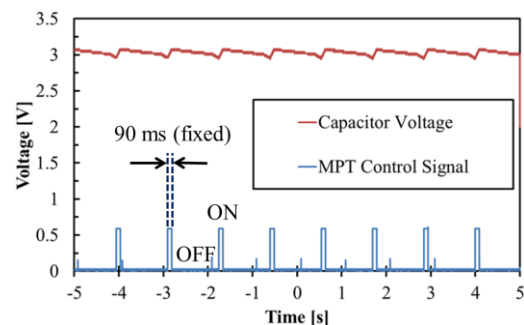


図 5 実験結果の一部

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者に

は下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① 黄勇, 篠原真毅, 三谷友彦, “自給型 DC-DC コンバータを有する超広負荷範囲に対応できるレクテナ整流回路の開発”, 電子情報通信学会論文誌 C, Vol. J97-C, No. 9, pp.342-351, 2014
- ② Yong Huang, Naoki Shinohara, and Tomohiko Mitani, “A Constant Efficiency of Rectifying Circuit in an Extremely Wide Load Range”, IEEE-Trans. MTT, Vol. 62, No.4, pp.986-993, 2014

[学会発表] (計 11 件)

- ① (Invited) Naoki Shinohara, “Simultaneous Wireless Power Transfer and ZigBee Wireless Communication at Same Frequency Band”, IMS2015 Workshop WFH ” RF-On-Demand for the Internet of Things”, Phoenix, 2015.5.22, CD-ROM
- ② 黄勇, 篠原真毅, 三谷友彦, “マイクロ波無線送電における 2.45 GHz 帯整流回路の小型化”, 電子情報通信学会総合大会, 2015.3.10-13, DVD-ROM B-21-16
- ③ Naoki Shinohara, and Takuya Ichihara, “Coexistence of Wireless Power Transfer via Microwaves and Wireless Communication for Battery-less ZigBee Sensors”, EMC’14/Tokyo, Tokyo, 2014.5.13-16, pp.445-448
- ④ Yong Huang, Naoki Shinohara, and Tomohiko Mitani, “Improve the Efficiency-Load Characteristic of Rectifying Circuit Using a Self-Powered DC-DC Converter”, 2014 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTc2014), Jeju Island, 2014.5.8-9, pp.197-200
- ⑤ Takuya Ichihara, Tomohiko Mitani, and Naoki Shinohara, “Study and Development of an Intermittent Microwave Power Transmission System for a ZigBee Device”, 2014 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTc2014), Jeju Island, 2014.5.8-9, pp.40-43
- ⑥ 市原卓哉, 篠原真毅, 三谷友彦, “ZigBee 端末への間欠マイクロ波電力伝送のための送電スケジューリング”, 電子情報通信学会総合大会, 2014.3.18-21, DVD-ROM BCS-1-15
- ⑦ 黄勇, 三谷友彦, 篠原真毅, “DC-DC コンバータを用いて弱電レクテナの効率-負荷特性の改善”, 電子情報通信学会マイクロ波研究会, 2013.12.19-20, 信学技報 vol. 113, no. 365, MW2013-170, pp. 103-108
- ⑧ 黄勇, 篠原真毅, 三谷友彦, “弱電レクテナに適用した電源回路の開発”, 第 16 回宇宙太陽発電システム(SPS)シンポジウム, 2013.10.3-4, 講演集 CD-ROM 07.pdf

- ⑨ 市原卓哉, 三谷友彦, 篠原真毅, 黄勇, “ZigBee 端末への間欠マイクロ波電力伝送の研究 II”, 電子情報通信学会第 16 回無線電力伝送研究会, 第 12 回宇宙太陽発電と無線電力伝送に関する研究会, 2013.3.15-16, 信学技報 WPT2012-49 (2013-03) pp.46-50
- ⑩ 市原卓哉, 三谷友彦, 篠原真毅, “ZigBee 端末への間欠マイクロ波電力伝送のための受電装置の改良”, 電子情報通信学会第 14 回無線電力伝送研究会, 2012.11.8-9, 信学技報 WPT2012-29(2012-11) pp.53-58
- ⑪ 黄勇, 篠原真毅, 三谷友彦, “弱電レクテナに適用した DC 電源回路の開発”, 電子情報通信学会マイクロ波研究会, 2012.10.18-19, 信学技報, vol. 112, no. 251, MW2012-108, pp. 153-156

[図書] (計 1 件)

- ① 篠原真毅, “第 3 章第 2 節 ワイヤレス給電の電磁環境対策”, 「スマートシティの電磁環境対策」監修 藤原修, S&T 出版, 2012, pp.141-152

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

なし

6. 研究組織

(1)研究代表者

篠原 真毅 (SHINOHARA Naoki)
京都大学・生存圏研究所・教授
研究者番号: 10283657

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし