

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

市原 卓哉 三谷 友彦 篠原 真毅

京都大学生存圏研究所 〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄

E-mail: {takuya_ichihara, mitani, shino}@rish.kyoto-u.ac.jp

あらまし ワイヤレスセンサネットワークでは各センサ端末のバッテリーを定期的に交換する必要があり、コスト上の問題となっている。そこで本研究はマイクロ波電力伝送を用いてバッテリー交換の不要なワイヤレスセンサネットワークの実現を目指す。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。そこで、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に電力を供給することに成功した。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。そこで、効率の改善をするための受電装置を改良について検討を行った。改良方法として RF-DC 整流回路自身の改良と新たな回路の挿入の 2 点考えられる。前者では反射波利用型 RF-DC 整流回路について検討した。ある入力電力の範囲では 1 素子用いる時より広い負荷範囲で 50%以上の効率を維持することができたが、サーキュレータの挿入損失によって全体の効率は低下した。次にブーストコンバータを利用した RF-DC-DC 回路を用いる検討を行った。これを用いることで最適負荷の 3.9 倍から 13.7 倍の範囲で 70%以上の効率を維持することができた。

キーワード マイクロ波電力伝送, ZigBee, ワイヤレスセンサネットワーク, RF-DC-DC 回路

Improvement of Receiving Equipment for an Intermittent Microwave Power Transmission to a ZigBee device

Takuya ICHIHARA Tomohiko MITANI and Naoki SHINOHARA

Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University Gokasho, Uji, Kyoto, 611-0011 Japan

E-mail: {takuya_ichihara, mitani, shino}@rish.kyoto-u.ac.jp

Abstract Battery problems of a wireless sensor device including its lifetime and exchange cost are serious obstacles to constructing a wireless sensor network. In the previous study we realized to drive a ZigBee device, which is compatible with a wireless sensor network, by intermittent microwave power transmission with the ZigBee device kept participating in the communication network. However, the conversion efficiency from receiving power to ZigBee consumption was only 27.5%. The low efficiency was caused by a gap between the actual load of the RF-DC rectifier and its optimal load because the input voltage of a stable output circuit affected its input impedance. The objective of the present study is improvement of receiving equipment in order to realize high RF-DC efficiency in the wide range of output load. We investigated two ways for the improvement by simulation. First, we simulated a RF-DC rectifier with reflection. We found out that totally efficiency dropped because of the insertion loss of a circulator though the range of the efficiency of 50% or more became wide by using the RF-DC rectifier with reflection. Next, we simulated a RF-DC-DC circuit with a DC-DC PWM boost converter. The conversion efficiency was over 70% in the wide range of load from 3.9 times to 13.7 times of the optimal load of the RF-DC rectifier.

Keyword Microwave Power Transmission, ZigBee, Wireless Sensor Network, RF-DC-DC Circuit

1. 研究背景・目的

ワイヤレスセンサネットワークは様々な用途において注目されており、温度のモニターやセキュリティなどの管理システム等に應用されている [1]。無線通信を用いるとともに電池駆動させることで配線コストが削減でき、設置場所の変更も有線より低コストで行うことができる。また、電池駆動のため電源を確保することが難しい場所での運用も可能となる。しかし、多くのセンサ端末を持つワイヤレスセンサネットワークで

はそれぞれの機器に対しての電池交換が必要となるため、それによる運用コストが増大する。そこで、無線電力伝送により端末の電源を確保することでメンテナンスフリーに近いセンサネットワークを構築できることが期待される。

本研究ではワイヤレスセンサネットワークに適した無線規格である ZigBee を搭載した端末へのマイクロ波無線電力伝送を行う。ZigBee は無線 LAN や Bluetooth など他の通信規格と比べ消費電力が小さい

という利点を持つ。送電マイクロ波を連続的にセンサ端末へ照射すると通信に干渉するため送電電力を抑える必要があった[2]。ZigBee 端末は間欠的に通信を行うため、我々は通信をしていない間に送電マイクロ波を照射することで、ZigBee 端末間の通信を妨害せずに要求電力を供給することに成功した[3]。

一方で、ZigBee 端末に一定の電圧を印加するための電圧安定化回路の入力インピーダンスが入力電圧に対して変動した。そのため整流回路の最適負荷からずれ、RF-DC 変換効率が低下した。従って本研究では受電装置を改良し、より広い負荷範囲で高効率となるようにすることを目指す。

2. 受電システム

ZigBee 端末として本研究では TOCOS 製 TWE-001 評価開発キットを用いた。ZigBee にはネットワークを統括する ZC 端末と中継機能を持つ ZR 端末、中継機能を持たない ZED 端末がある。なお、本研究では主に 1 台の ZED 端末に送電を行う。キットの ZED 端末は 2.7 V から 3.6 V の電圧で動作し、消費電力及び入力インピーダンスは、ネットワーク参加時で 9.46 mW 及び 1.58 k Ω 、非参加時で 61.8 mW 及び 138 Ω である。ZED 端末は中継を行わないためデータ送信時以外スリープすることで消費電力を小さくすることができる。しかし、ネットワークに参加していない状態ではネットワークに参加する手続きのために消費電力が一時的に上昇する。

受電システムは図 1 に示すように、受電アンテナ及び RF-DC 整流回路で間欠的なマイクロ波を受電整流し、電圧安定化回路により ZigBee 端末へ直流電力を供給する。

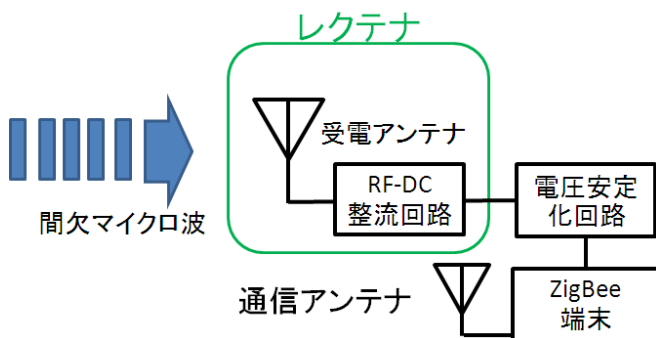


図 1: 受電システム

3. 電圧安定化回路

電圧安定化回路は入力段に蓄電用キャパシタをもつ降圧型 DC-DC コンバータで構成される。DC-DC コンバータの制御 IC には Texas Instruments 製の TPS62120

を使用した。入力電圧範囲は 2.8 V から 9.6 V で出力電圧が 2.7 V から 3.6 V となるよう回路を設計した。

この回路に 149 Ω の負荷を接続し、入力直流電圧に対する電圧安定化回路の入力インピーダンスを測定した。結果を図 2 に示す。入力電圧の増加とともに入力インピーダンスが増加し、最小で 149 Ω 、最大で 1138 Ω であった。つまり負荷抵抗の 1 倍から 7.6 倍まで変化した。

前回の電力供給実験では、ZED 端末の起動時における受電電力利用効率はおよそ 27.5% であった。使用した RF-DC 整流回路は最適負荷を接続すると最大で 65% の効率で、電圧安定化回路は想定する入力電圧の範囲内で 75% 以上の効率であった。従って意図しない損失が 20% 生じた。間欠マイクロ波電力伝送では蓄電用キャパシタに印加される電圧が常に変動する。そのため、入力電圧に対して入力インピーダンスが常に変化し、RF-DC 整流回路の最適負荷とのずれによる変換効率の低下が原因と考えられる。

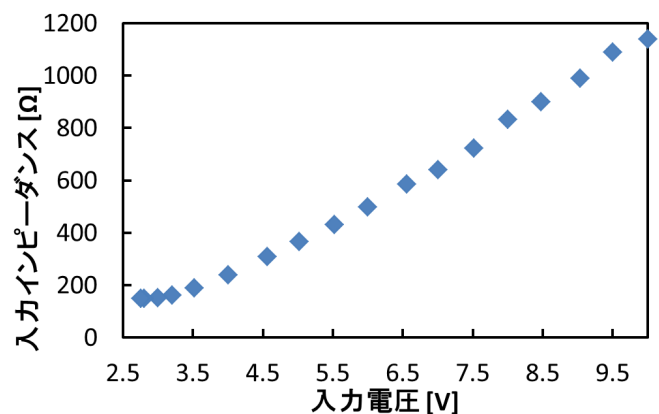


図 2: 電圧安定化回路の入力インピーダンス

4. 受電装置の改良手法の検討

本研究では、受電装置の変換効率改善にあたり 2 つ改良箇所を Agilent 製の回路シミュレータ Advanced Design System を用いてシミュレーションし、比較及び検討を行った。

1 つ目は RF-DC 整流回路の改良である。図 3 のようにサーキュレータで反射波を別の RF-DC 整流回路で再変換する反射波利用型 RF-DC 整流回路[4]で検討を行った。これは接続する負荷によって入力マイクロ波の反射率が異なることを利用して負荷変動に対応することができることが予想される。

他方は RF-DC 整流回路と電圧安定化回路の間に新たな回路を挿入することで、高効率で動作できるように RF-DC 整流回路からみた負荷を最適負荷付近に変換する RF-DC-DC 回路を検討した[5]。

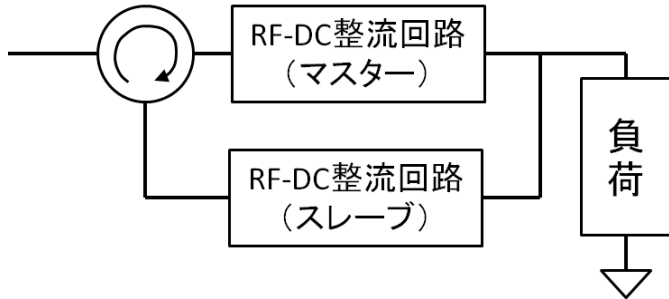


図 3: 反射波利用型 RF-DC 整流回路

4.1. 反射波利用型 RF-DC 整流回路

一般的な RF-DC 整流回路は入力フィルタによって反射を抑制し、出力フィルタによって整流を行う。一方で反射波利用型 RF-DC 整流回路は入力フィルタを持たず反射を抑制しない整流回路（マスター）と入力フィルタを持つ整流回路（スレーブ）で構成される。マスター回路での反射波をサーキュレータでスレーブ回路に入力することで効率を改善させることができる。

はじめに反射波利用型 RF-DC 整流回路がどの程度効率を改善できるかを比較するために、図 4 の簡易的なシングルシャント型 RF-DC 整流回路を設計した。入力するマイクロ波の周波数は 2.45 GHz である。ダイオードは Agilent 製 HSMS2864 を 2 並列で用いることとした。出力フィルタは 4 分の 1 波長線路と 10 μ F の平滑コンデンサである。最適負荷を 140 Ω とし、効率が 80% を超えるよう入力フィルタの線路の長さ及び幅を決定した。入力フィルタ直後のカップリングコンデンサは直流成分が入力側へ逆流しないためのものであり、容量は 1 pF である。設計した RF-DC 整流回路の RF-DC 変換効率を接続負荷と入力電力を変化させて測定したものが図 5 である。横軸が入力マイクロ波電力、縦軸が接続負荷である。

次に反射波利用型 RF-DC 整流回路を設計した。本研究では、図 4 の回路と同様のモデル及びコンデンサ、ダイオードを用いてマスター回路とスレーブ回路を設計した。ただし、マスター回路は入力フィルタを持たない。マスター回路は最適負荷が 140 Ω となるようにした。その後、マスター回路の反射電力で出力電圧が同程度となるような抵抗値をスレーブ回路の最適負荷として設計を行った。

マスター回路の RF-DC 変換効率と反射率を図 6 及び図 7 に示す。最大変換効率は負荷 140 Ω で入力電力 90 mW の時、54% であった。反射率は 10% から 35% の範囲であり、2 mW から 18 mW が反射する。また出力電圧は 3 V 程度であった。マスター回路の反射電力と電圧からスレーブ回路の最適負荷を 400 Ω で入力フィルタを調整し設計した。スレーブ回路の変換効

率は図 8 に示すように低入力電力において 50% 以上の範囲がマスター回路に対して広がっている。

これらの 2 つの整流回路を並列接続し、反射波利用型整流回路を構成した。サーキュレータは小型軽量なマイクロストリップ型のを想定し、挿入損失を 0.4 dB とした。以上のように構成した反射波利用型整流回路の変換効率を図 9 に示す。マスターとスレーブ両者の特性が組み合わせり、それぞれを単体で用いるより広範囲で 50% 以上の効率が得られた。しかし、比較対象とした入力フィルタを持つ最適負荷 140 Ω の整流回路の効率（図 5）に対して効率が 50% 以上となる範囲は 3 割少なかった。入力電力が 20 mW 以下の時に限ると、反射波利用型のほうが効率 50% 以上の領域は 34% 広がっている。

以上から受電アンテナで受ける送電マイクロ波の電力範囲が決まっている場合にはそれに合わせてマスターとスレーブの特性を調整することで接続負荷に対して高い効率を維持できる可能性がある。ただし、サーキュレータの挿入損失によって最大効率は低下する。

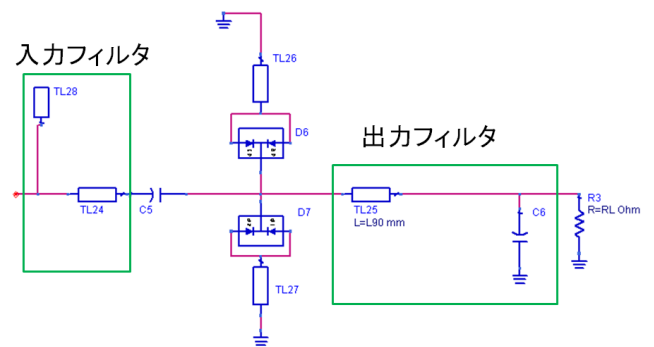


図 4: RF-DC 整流回路

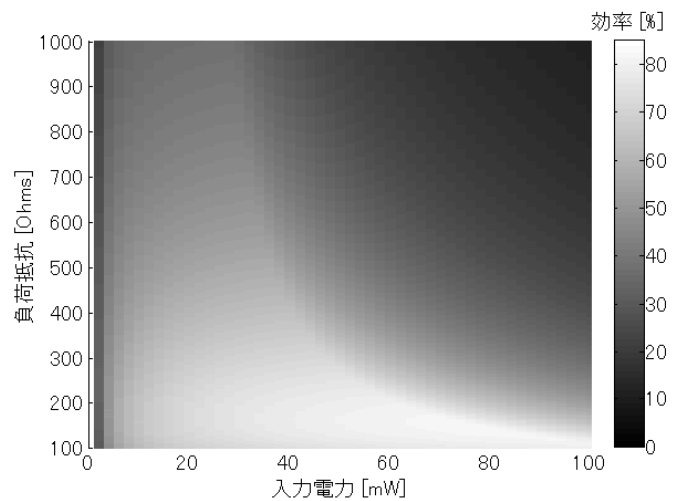


図 5: 比較用 RF-DC 整流回路の RF-DC 変換効率

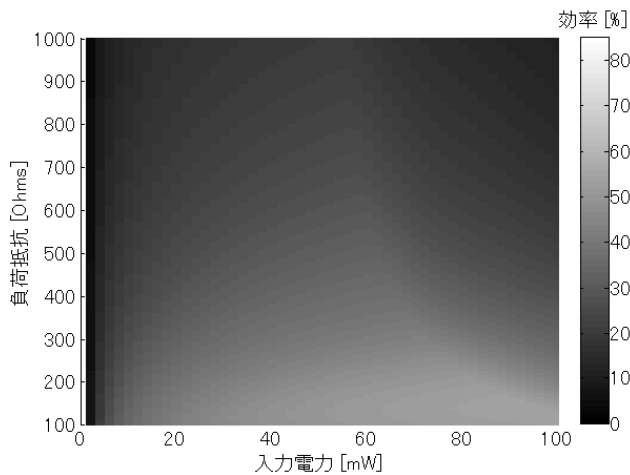


図 6: 整流回路 (マスター) の RF-DC 変換効率

図 7: 整流回路 (マスター) の反射率

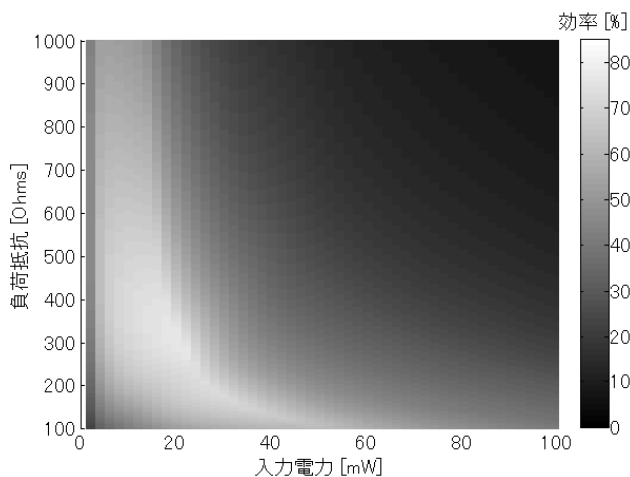


図 8: 整流回路 (スレーブ) の RF-DC 変換効率

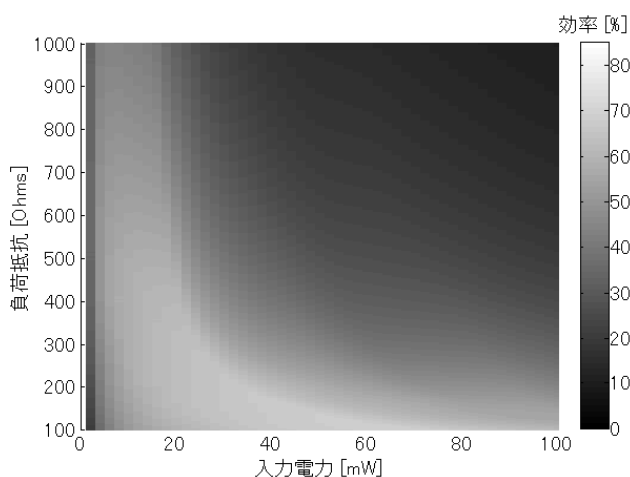


図 9: 反射波利用型 RF-DC 整流回路の変換効率

4.2. RF-DC-DC 回路

RF-DC 整流回路の出力に図 10 の PWM 制御ブーストコンバータを接続しインピーダンス変換をすることで RF-DC 整流回路からみたインピーダンスを制御し、広範囲の負荷に対して高い効率をえられるようにしたものの開発が進められている。我々はこれを RF-DC-DC 電源回路と呼ぶ。RF-DC 整流回路の最適負荷は 95Ω で設計されており、単体の RF-DC 変換効率を図 11 中の破線で示す。100 mW 入力時には接続負荷 95Ω のとき最大効率 83.4%となる。コンバータを含めた RF-DC-DC 回路では図 11 中の実線で示すように 375Ω から 1300Ω と広い範囲にわたって効率 70%以上を維持している。これは昇圧することで負荷に対してコンバータの入力インピーダンスが低くなることによって最適負荷に近づくためである。

この RF-DC-DC 回路は開発中であり増幅器やコンパレータなどの動作に別電源が必要となっている。また、出力電圧は ZigBee 端末の定格 3.6 V を超えて出力されるため後段に降圧レギュレータが必要となる。RF-DC-DC 回路と降圧レギュレータを接続することで RF-DC-DC 回路内のブーストコンバータが発振する可能性がある。

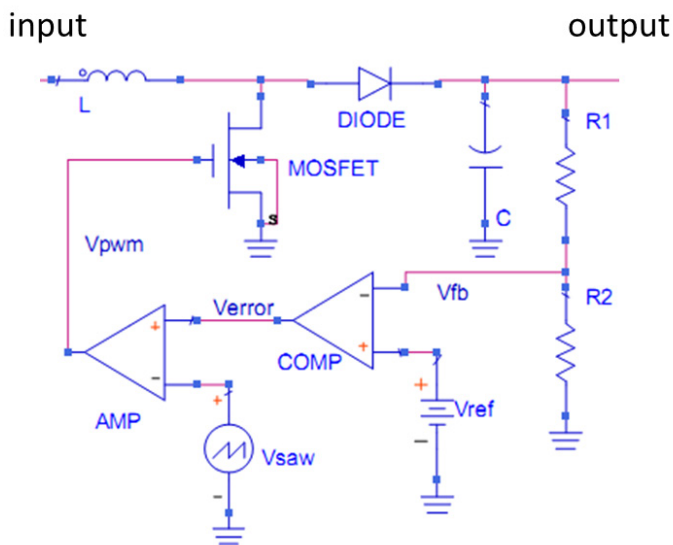


図 10: RF-DC-DC 回路用 PWM 制御ブーストコンバータ [5]

文 献

- [1] 鄭立, ZigBee 開発ハンドブック, 株式会社リックテレコム, 東京都, 2006.
- [2] 鈴木 望, 篠原 真毅, 三谷 友彦, “ZigBee センサネットワークに対するマイクロ波無線電力供給システムの研究開発 II,” 信学技報 WPT2010-21, 2011.
- [3] 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研究”, 第10回無線電力伝送時限研究専門委員会研究会, WPT2011-25, 京都, Mar. 16, 2012.
- [4] 金山, 篠原 真毅, 松本 紘, “反射波を利用したレクテナの高効率化手法の開発”, 電子情報通信学会総合大会講演論文集 2003 年_エレクトロニクス(1), 129, Mar. 3, 2003.
- [5] 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”, 信学技報, vol. 112, no. 251, MW2012-108, pp. 153-156, Oct., 2012.

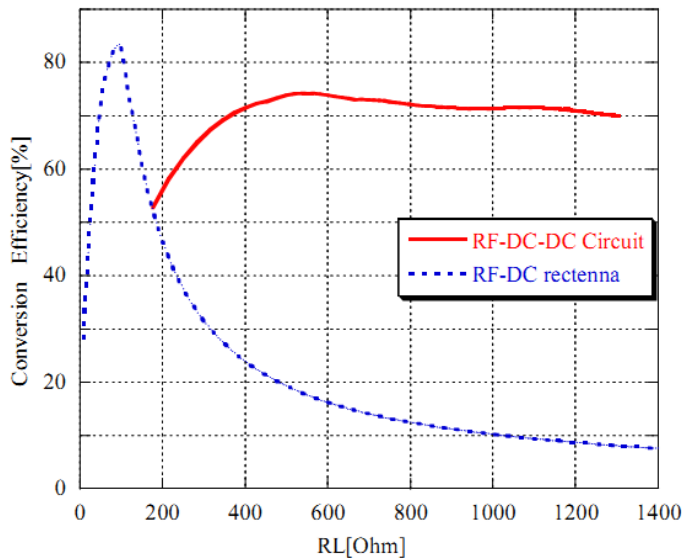


図 11: RF-DC-DC 電源回路の RF-DC 変換効率[5]
(100 mW 入力時)

5. まとめと今後の課題

間欠マイクロ波電力伝送を行った際に電圧安定化回路によって RF-DC 整流回路からみた出力側の負荷が変動するため RF-DC 変換効率が低下した。今回、負荷変動による効率低下を改善するために 2 つの手法について検討を行った。

反射波利用型 RF-DC 整流回路はマスターとスレーブの回路の特性を適切に調整することで広い負荷範囲において高効率を維持できる可能性はあるものの、サーキュレータの挿入損失などを考慮すると最大効率には限界があることがわかった。

RF-DC-DC 回路は別電源が必要なことなど課題はあるが、RF-DC 整流回路の最適負荷の 3.9 倍から 13.7 倍の範囲で 70%以上の効率を維持することができた。したがって RF-DC-DC 回路を用いたほうが効率を大きく改善できることが期待される。また、サーキュレータの挿入損失や装置の大型化を考慮すると上記 2 つを同時に使用するのとは適さないと考えられる。

今後は RF-DC-DC 回路を別電源が不要となるようにした上で、さらに降圧レギュレータなどを用いて高効率で出力電圧が ZigBee 端末の定格内に収まるように改良を行なっていく予定である。

6. 謝辞

本研究における RF-DC-DC 回路の検討に関しては、京都大学工学研究科博士課程の黄勇氏にご助言を頂きました。ここに深く感謝します。

