

ZigBee 端末への間欠マイクロ波電力伝送の研究 II

市原 卓哉 三谷 友彦 篠原 真毅 黄 勇

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, huang_yong}@rishi.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%を実現した。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。そこで前回、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。今回、検討した回路の 1 つである反射波利用型 RF-DC 整流回路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%改善することができた。

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, 反射波利用型 RF-DC 整流回路

Study on an Intermittent Microwave Power Transmission to a ZigBee device II

Takuya ICHIHARA Tomohiko MITANI Naoki SHINOHARA and Huang Yong

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

E-mail: {takuya_ichihara, mitani, shino, huang_yong}@rishi.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 while the ZigBee device kept participating in the communicational 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 the improvement of receiving equipment in order to realize high RF-DC efficiency between the wide range of output load. We created a RF-DC rectifier with reflection which we had investigated. We also measured the RF-DC efficiency of the RF-DC rectifier with reflection. We found this circuit drove with higher efficiency between the range of low resistance than a single RF-DC rectifier. Therefore, we conducted an experiment that an intermittent power supply microwave input to the RF-DC rectifier with reflection, which is connected to the stable output circuit and an output load. As the result the efficiency from receiving power to the consumption power of the output load was 55.7%, which was higher than the previous study by 28.2 points.

Keyword Microwave Power Transmission, ZigBee, Wireless Sensor Network, RF-DC rectifier with reflection

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、温度のモニタやセキュリティなどの管理システム等に応用されている[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。これまでの研究で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].

しかし、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する問題があった。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、より広い負荷範囲において高効率の動作を実現することを目指す。

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。

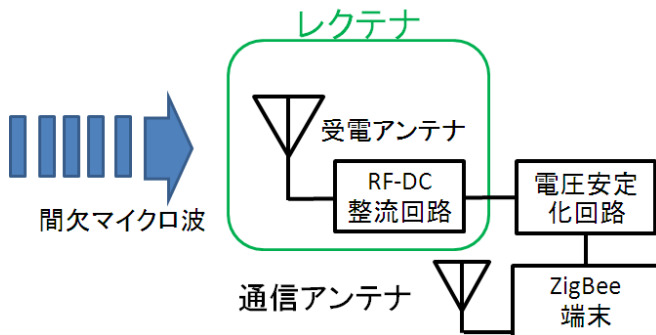


図 1: 受電システム

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[4]。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。

以前行った電力供給実験では、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[3]。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%の効率であった。また、電圧安定化回路単体では想定する入力電圧の範囲内で 75%以上の効率であった。従って受電電力利用効率は 40%程度と見込まれたが、実際には効率が 13%程度悪化した。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。

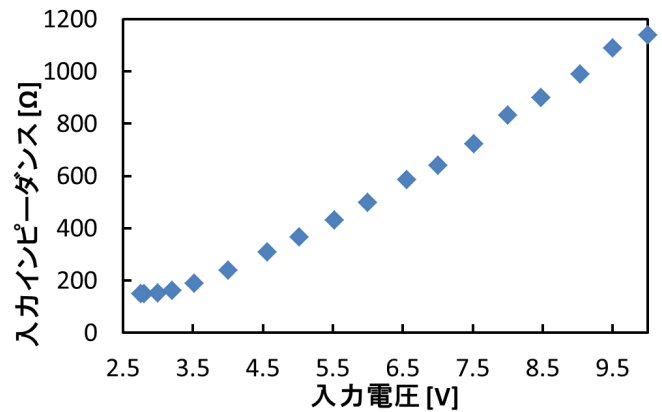


図 2: 電圧安定化回路の入力インピーダンス

3. 受電装置の改良

前回の報告では受電装置の変換効率改善にあたり 2 種類の回路の検討を行った[4]。今回、検討を行ったうちの反射波利用型 RF-DC 整流回路について設計および作成、評価を行った。設計には Agilent Technology 製の回路シミュレータ Advanced Design System を用いた。まず、単体の RF-DC 整流回路について述べ、次に 2 つの整流回路で構成した反射波利用型 RF-DC 整流回路について述べる。

3.1. RF-DC 整流回路

RF-DC 整流回路はシングルシャント型を用いることとした。シングルシャント型 RF-DC 整流回路のモデル図を図 3 に示す。これは整合の為の入力フィルタ及びカップリングコンデンサ、整流用のシャントダイオード、平滑用の出力フィルタから構成される。出力フィルタは主に四分の一波長線路と平滑キャパシタで構成される。ダイオードから出力フィルタを見込んだインピーダンスは基本波および奇高調波では開放、偶高

調波では短絡と見なせるため、この回路は全波整流で動作する。また、ダイオードはF級動作していると見なせるため、平滑キャパシタの代わりに分布定数線路のF級負荷を用いることができる[5]。従って、本研究ではこの分布定数線路のF級負荷を用いた。

作成した RF-DC 整流回路を図 4 に示す。基板は Arlon 製の AD1000 を用いた。なお、基板の仕様を表 1 に示す。ダイオードにはブレークダウン電圧 15 V の Avago 製の HSMS2820 を用いた。最適負荷が 470 Ω となるよう設計を行った。入力する送電マイクロ波の周波数を 2.45 GHz とした。出力フィルタである F 級負荷は 3 次高調波までを考慮して設計を行った。出力フィルタの出力端に 470 Ω の抵抗を接続したときの出力フィルタの入力インピーダンスは、図 5 に示すように基本波である 2.45 GHz では $3.15 + j4.29 \text{ k}\Omega$ 、また 2 次高調波の 4.90 GHz では $0.26 - j5.86 \text{ }\Omega$ 、3 次高調波の 7.35 GHz では $3.32 - j1.82 \text{ k}\Omega$ となり、F 級負荷が実現されていることが確認できた。

作成した RF-DC 整流回路の RF-DC 変換効率及び反射率の測定を行った。まず、負荷に 470 Ω の抵抗を接続し、入力電力を 1 mW から 270 mW まで変化させた時の測定結果を図 6 に示す。横軸が入力電力、縦軸が RF-DC 変換効率及び反射率である。入力電力 100 mW 以上で RF-DC 変換効率が 70% 以上となり、先行研究[2]で作成された RF-DC 整流回路の最大効率 65% を上回った。次に入力電力を 110 mW で固定した時に負荷を 100 Ω から 1.9 kΩ まで変化させた時の結果を図 7 に示す。横軸は負荷の大きさとなっている。最適負荷を 470 Ω として設計を行ったため、400 Ω から 1 kΩ の範囲で 70% 前後の変換効率となった。その範囲における反射率は 5% 以下であるが、それ以外の範囲、特に 100 Ω から 300 Ω までの負荷を接続した時には 10% 以上の反射が発生した。

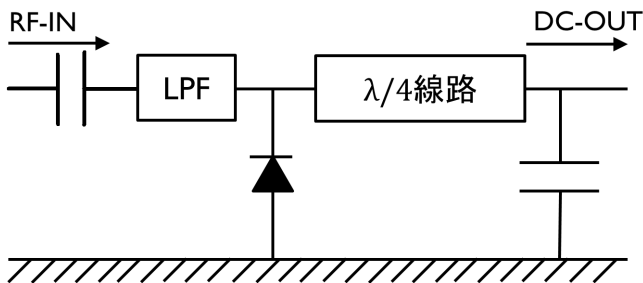


図 3: シングルシャント型 RF-DC 整流回路

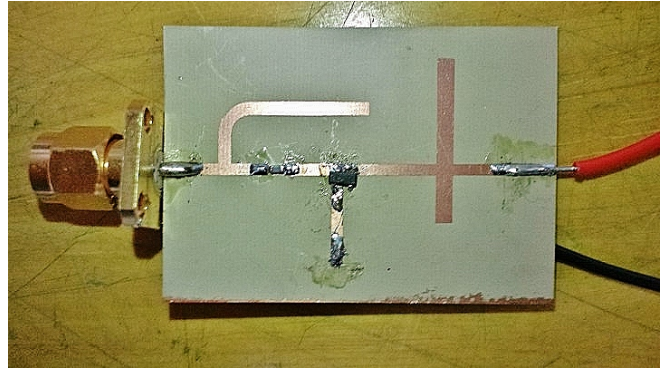


図 4: 作成した RF-DC 整流回路

表 1: Arlon 製 AD1000 の仕様

材質	ガラスクロス・セラミック配合 PTFE
比誘電率	10.35
誘電体厚	0.8 mm
電解銅箔厚	18 μm
誘電正接	0.0023

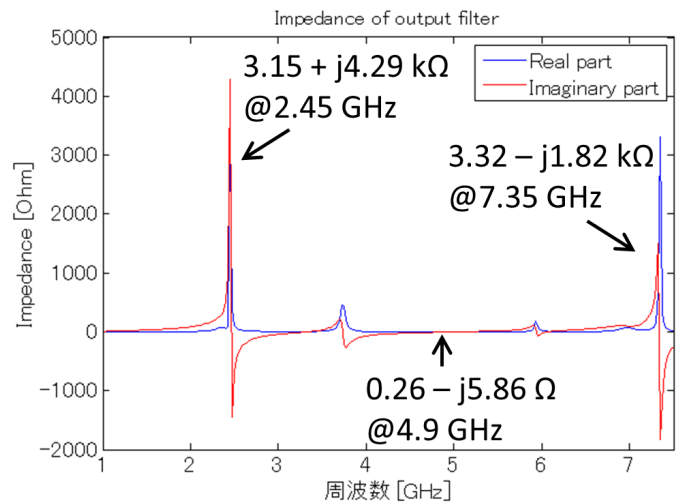


図 5: 設計した F 級負荷の周波数特性 (470 Ω 接続時)

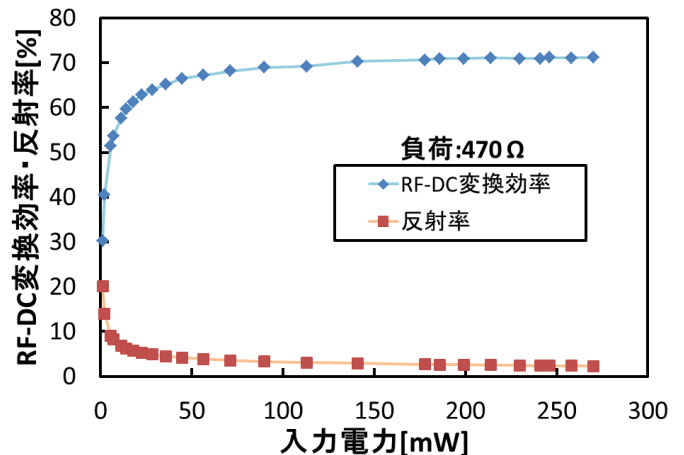


図 6: 作成した RF-DC 整流回路の入力電力特性

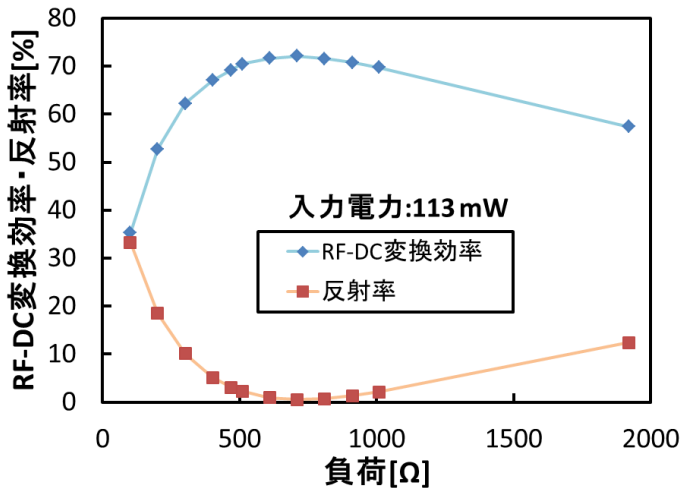


図 7: 作成した RF-DC 整流回路の負荷特性

3.2. 反射波利用型 RF-DC 整流回路

反射波利用型 RF-DC 整流回路はサーキュレータと複数の RF-DC 整流回路で構成される [6]. その概念図を図 8 に示す. この回路に入力された送電マイクロ波は 1 つ目の整流回路 (マスター回路) に入力される. マスター回路で発生した反射波はサーキュレータを通して他方の整流回路 (スレーブ回路) で再整流される. 前節の負荷特性のように出力に接続された負荷が変動するとき, 整流回路単体では反射が発生する. 従って, その反射波を再び別の整流回路で整流することによってより広い負荷範囲で高効率が可能になると予想される. そこで, 前節で作成した RF-DC 整流回路 2 つを並列に接続し, 反射波利用型 RF-DC 整流回路を構成した. サーキュレータには日本高周波製の UC-SMA-1A2000 を用いた. 実際に使用した素子の 2.45 GHz における挿入損失は 0.26 dB, また反射率は -27.7 dB, アイソレーションは 34.7 dB であった.

構成した反射波利用型 RF-DC 整流回路に 2.45GHz で入力電力 113 mW の送電マイクロ波を入力し, 負荷を 10 Ω から 1.9 kΩ までの負荷範囲における RF-DC 変換効率及び反射率を測定した. その結果を図 9 に示す. 図 9 には比較のために単体の負荷特性も記載してある. 負荷が 300 Ω より小さな範囲においてスレーブ回路が反射波を再整流することができ, 整流回路単体と比べて効率が改善した. 一方で負荷が 600 Ω を超える範囲において反射率は整流回路単体と変わらず, 効率は最大で 6.9%悪化した. 効率が悪化したのはサーキュレータの損失やスレーブ回路が整流回路として動作していない為にマスター回路から負荷として見たことによる損失によるものと考えられる.

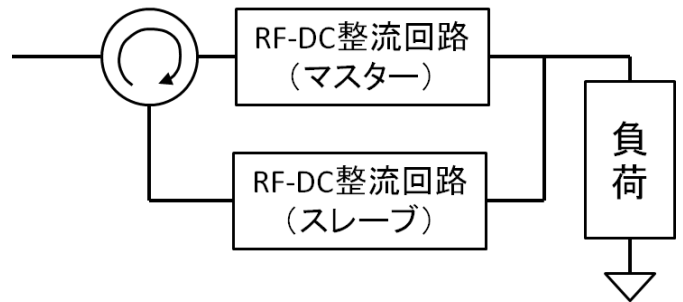


図 8: 反射波利用型 RF-DC 整流回路

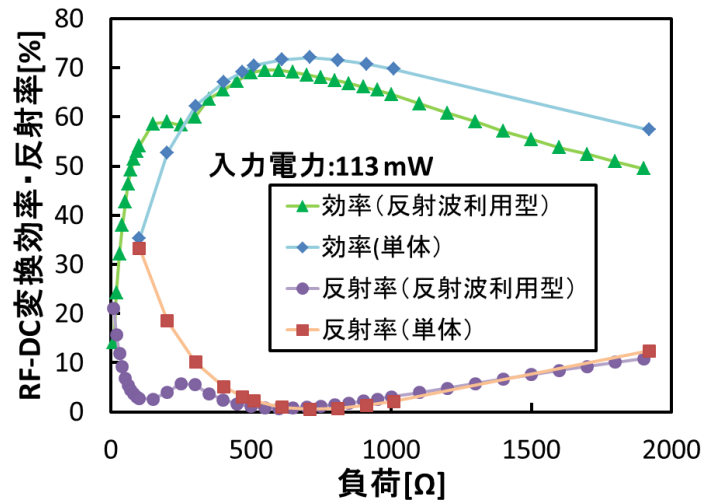


図 9: 反射波利用型 RF-DC 整流回路の負荷特性

3.3. 改良した受電装置への間欠入力時における受電電力利用効率

前節で評価した反射波利用型 RF-DC 整流回路の出力端に先行研究 [3] で用いた蓄電用に 330 μF の電解コンデンサを搭載した電圧安定化回路, ZED 端末の起動時における抵抗 140 Ω を図 10 に示すように接続し受電装置を模擬した回路を構成した. この回路に間欠マイクロ波を入力し, 負荷に安定して直流電圧が印加される送電マイクロ波の最小電力およびその時の負荷が消費する電力の割合 (受電電力利用効率) を測定した. 間欠マイクロ波は以前行った電力供給実験と同様にパルス周波数 10 Hz, デューティ比 0.4 とした.

図 10 の回路において平均電力 124 mW, 尖頭電力 310 mW の送電マイクロ波を入力したときに負荷に平均 3.11 V の直流電圧が印加された. 従って負荷の消費電力は 69.1 mW であるから受電電力利用効率は 55.7%となる. つまり先行研究 [3] における効率 27.5% から 28.2%向上させることができた. この時の RF-DC 整流回路の出力電圧 V_{rfdc} と負荷に印加された電圧 V_{dcdc} の時間波形を図 11 に示す. V_{rfdc} は送電マイクロ波が入力されているときに上昇する. 充電中の電圧 V_{rfdc} は蓄電用キャパシタの容量および DC-DC コンバータの入力インピーダンス, さらに RF-DC 整流回路

の負荷特性によって決定される。一方で送電マイクロ波が入力されていないときには蓄電用キャパシタが蓄えたエネルギーを放電している。実験結果から V_{rfdc} は 5.24 V から 7.24 V の範囲で変動したことが確認できた。 V_{rfdc} は電圧安定化回路の入力電圧でもあるため、図 2 より電圧安定化回路の入力インピーダンスがおよそ 400 Ω から 800 Ω で変動したことになる。このインピーダンス変動範囲は整流回路単体においても 60% 以上の変換効率で動作する範囲である。従って、図 8 の反射波利用型 RF-DC 整流回路の部分を RF-DC 整流回路単体に置き換えた場合にも負荷に直流電圧を供給できると思われる。しかし、RF-DC 整流回路単体では、平均入力電力 124 mW のとき負荷に安定な直流電圧を供給することはできなかった。整流回路が高効率で動作する範囲に電圧安定化回路の入力インピーダンスが達する前に、低効率の動作点である低インピーダンスの範囲で動作しなければならないからであると推察される。

4. 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、RF-DC 整流回路自体の改良を行った。その結果、これまでの整流回路と比べ 5% 以上の改善がみられた。また、より広い負荷範囲において高効率で動作させるために反射波利用型 RF-DC 整流回路を構成し、評価を行った。反射波を再利用することで負荷が低い範囲における改善がみられた。最後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たときの受電電力利用効率を測定した。負荷に直流電圧を定常的に供給できた平均入力電力 124 mW において、受電電力利用効率は 55.7% となり従来の効率 27.5% を 28.2% 上回る結果となった。

今後は前回の報告で検討を行い反射波利用型 RF-DC 整流回路と比べ高効率と予想された RF-DC-DC 回路の作成および評価を行う。また、ZigBee 端末への送電スケジューリングの見直し及び改善を行う。

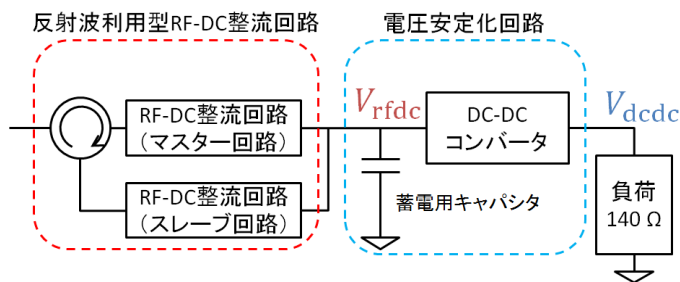


図 10: 受電装置を模擬した回路

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] 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”, 第 14 回無線電力伝送時限研究専門委員会研究会, WPT2012-29, 東京, Nov. 9, 2012.
- [5] K. Hatano, N. Shinohara, T. Mitani, K. Nishikawa, T. Seki, K. Hiraga, “Development of Class-F Load Rectennas”, Microwave Workshop Series on Innovative Wireless Power Transmission: Technologies, Systems, and Applications (IMWS), 2011 IEEE MTT-S International, pp. 251-254, May 2011.
- [6] 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.

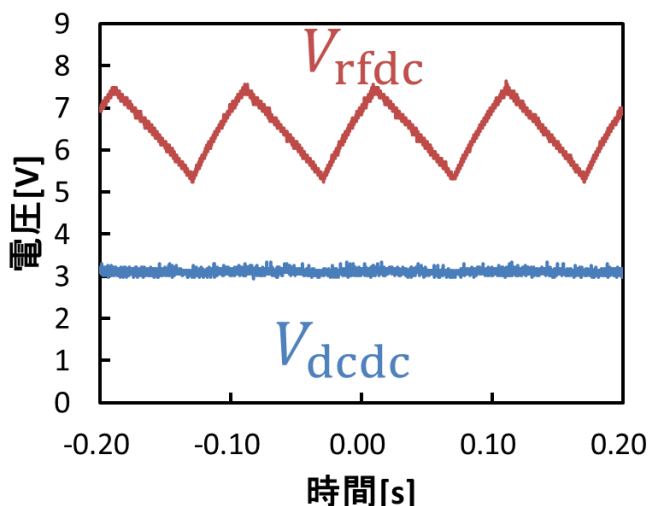


図 11: 負荷に直流電圧 $V_{dc dc}$ が印加された場合の RF-DC 整流回路の出力電圧 V_{rfdc}