

ZigBee 端末用マイクロ波受電システムの研究開発

鈴木 望 篠原 真毅 三谷 友彦

京都大学 生存圏研究所 〒611-0011 京都府 宇治市 五ヶ庄

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

あらまし 本研究の目的は ZigBee を用いたセンサーネットワーク端末に対してマイクロ波無線電力伝送を使用して、配線不要かつバッテリーレス、またはワイヤレスでの充電が可能なセンサーネットワークを開発することである。最適負荷を ZigBee 端末の入力インピーダンスである 140Ω として整流回路を試作したところ、変換効率は 65% であった。しかし、必要な電力を整流するには複数個の整流回路が必要であり、その場合は変換効率が 33% まで低下した。ZigBee 端末に送電マイクロ波を受信させないために ZigBee 端末をマイクロ波受電アンテナの背後に設置することによりマイクロ波送電と ZigBee 通信を同時に行うことが可能で、無線電力伝送による ZigBee 端末の駆動および ZigBee 通信を行うことに成功した。

キーワード マイクロ波無線電力伝送, ZigBee, レクテナ, 通信と送電の両立

Study and Development of a Microwave Power Receiving System for ZigBee Device

Nozomu SUZUKI Naoki SHINOHARA and Tomohiko MITANI

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

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

Abstract The objective of the present study is to develop a ZigBee sensor network powered by external microwave in order to realize a battery-less or wirelessly-charged wireless sensor network. We made a prototypes of rectification circuit whose optimum load was 140Ω , and whose efficiency was 65%. However, multiple rectification circuits were necessary to operate a ZigBee device. In this case, the rectification efficiency was decreased to 33%. The ZigBee device was set at the back of microwave power receiving antennas in order to avoid receiving the microwave for wireless power transmission. Then, the ZigBee device could communicate with the other ZigBee device while being driven by the external microwave power.

Keyword Microwave power transmission, ZigBee, Rectenna, Compatibility between communication and power transmission

1. 研究背景

近年、センサーネットワークは広い用途に使用されることが期待されており、例えば建物内の冷暖房やセキュリティ管理（ビルディングオートメーション）や温度や湿度などのモニターによる農業生産管理などが挙げられる。しかし、有線で通信・電源を確保するシステムにおいてはネットワーク端末自体よりも配線にコストがかかってしまう場合がある。一方、ワイヤレス通信とバッテリーを用いるシステムでは配線の必要が無く、電源の確保が難しい場所にも適用が容易だが、各端末に対してバッテリー交換の必要がある。

本研究の目的はマイクロ波無線電力伝送を用いてバッテリーレスまたは遠距離からのバッテリー充電を可能とするワイヤレスセンサーネットワーク端末の開発である。通信端末には ZigBee を採用した。ZigBee は無線通信規格の一つであり、無線 LAN や Bluetooth

に比べ消費電力が小さいという利点がある。送電できる電力の限られるマイクロ波無線電力伝送に適している。また、ZigBee は生産コストも低く、ネットワーク容量が大きくセンサーネットワークに適した規格と言える [1]。

2. マイクロ波受電システム

受電システムの全体像を図 1 に示す。受電アンテナに入力された送電マイクロ波電力は整流回路によって直流に変換され、ZigBee 端末に入力される。DC-DC コンバータと蓄電回路は必要に応じて使用する。DC-DC コンバータは電圧を一定にするため、または整流回路の負荷インピーダンス調節のために使用し、蓄電回路はマイクロ波電力が不安定になるなどして電力が不足する場合に使用する。蓄電素子にキャパシタを用いた場合は電力の損失も少なく寿命が二次電池に比

べ長くなり、二次電池は安定した電力を供給できるがキャパシタより寿命が短く、またコストもかかる。

本研究では ZigBee 端末キットに ZEC 社製 ZB24FM-Z を使用する。このキットは各 ZigBee 端末に温度センサーが取り付けられており、温度データを一定時間ごとに送信する仕様になっている。端末はおよそ 3V の入力電圧で動作する。ZigBee ネットワークは ZC, ZR, ZED の 3 種類の端末から成り立つ。ZC はネットワークを管理するメインの端末である。ZR は他の端末の通信を中継するルーター機能を持っており、ZED はネットワークの終端となる端末である。ZED の消費電力の時間平均はおよそ 68mW でごくわずかな時間だけ 185mW の電力を消費し、ZR は常に 185mW の電力を消費している。本研究ではまずは消費電力の少ない ZED を無線電力伝送で動作させることを目指す。

送電マイクロ波には ISM バンドである 2.4GHz 帯を用いる。しかし ZigBee も通信に 2.4GHz 帯の周波数を使用しているため、送電マイクロ波によって通信が正しく行えなくなる場合がある。従って送電マイクロ波周波数は ZigBee 通信に与える影響が比較的少ないことが実験でわかっている 2.4575GHz を使用する。この周波数の外部マイクロ波中に ZigBee 端末を設置した場合、外部マイクロ波の電力密度が 0.25mW/cm² 程度でも ZigBee 端末は通信を行えた。さらに高い電力密度で送電を行うにはフィルタやシールドで ZigBee 端末に送電マイクロ波が入力されないようにする必要がある [2]。

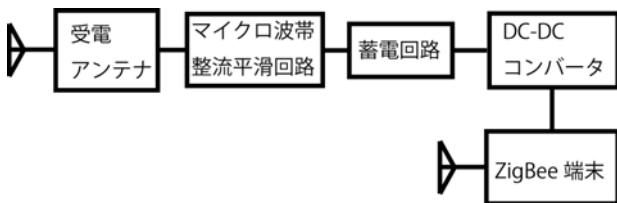


図 1. マイクロ波受電システムの概要図 [2]

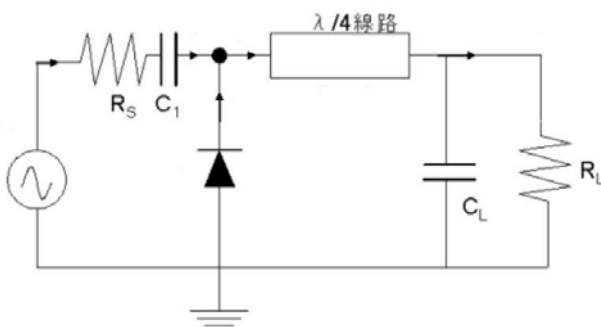


図 2. RF-DC 整流回路の回路図 [3]

3. レクテナの作成

3.1. 整流回路の設計

入力されたマイクロ波を直流に変換する RF-DC 整流回路を設計・作成した。回路の設計およびシミュレーションには Agilent Technologies 社 Advanced Design System を使用した。設計した整流回路の回路図を図 2 に示す。この回路は $\lambda/4$ 線路、ショットキダイオード、DC 阻止キャパシタ、平滑キャパシタで構成されており、理想的な条件で変換効率は 100% となるが、実際には主にダイオードの抵抗性分や接合容量による損失が生じる [3]。設計した回路では 4 つのダイオードを並列に接続してインピーダンスを減らし、ダイオード-GND 間に線路を入れて反射を無くすよう線路長を調節した。また、平滑キャパシタの代わりに U 字型の線路を 2 本入れた。図 3 は作成した整流回路の写真である。

整流回路の最適負荷を ZigBee 端末の入力インピーダンスの 140 Ω として設計した。ダイオードには Avago 社製の HSMS-2860 を使用した。このダイオードは抵抗が 6 Ω であり、回路シミュレーション上において最大で 80% の変換効率が得られた。実際に作成した回路の変換効率および反射率を測定した結果を図 4 に示す。実際に作成した回路では最大 65% の変換効率が得られた。この場合 ZigBee 端末に必要な電力を供給するには整流回路に 105mW の入力が必要で、0.25mW/cm² にてマイクロ波送電を行う場合に必要な受電アンテナの開口面積は約 420cm² となる。しかしこの回路に使用されている HSMS-2860 はブレイクダウン電圧が 7V であり、シミュレーション上では負荷抵抗 140 Ω において 80mW 程度でダイオードがブレイクダウンを起こし、それ以上の電力を整流することができなかった。そのため、この整流回路を使って ZigBee 端末を動作させるには受電アンテナからの電力を分配し、複数の回路を用いる必要がある。

そこで、電力分配器を用いて複数の整流回路に電力を入力した場合の効率を測定した。140 Ω の抵抗整流回路 8 素子を並列に接続した場合の変換効率および出力電圧を図 5 に示す。ZigBee 端末を動作させることができるだけの出力電圧が得られたが、1 素子の回路を使用した場合よりも変換効率が 33% 程度まで下がった。これは整流回路 8 素子を並列に接続したことで、整流回路 1 素子に対する負荷抵抗が 8 倍となったためである [3]。変換効率を上げるためには DC-DC コンバータによって負荷抵抗を変える、並列接続と直列接続を組み合わせることで最適負荷を調節するなどの方法が考えられる。

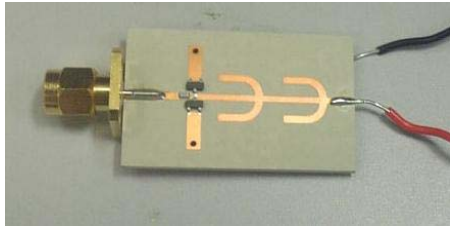


図 3. 作成した整流回路

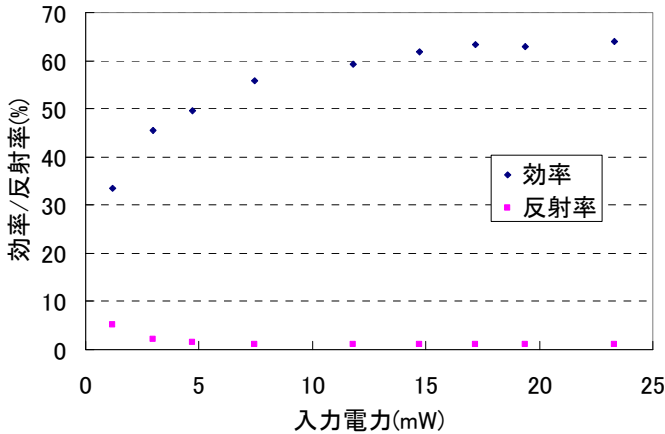


図 4. 作成した整流回路の効率および反射率

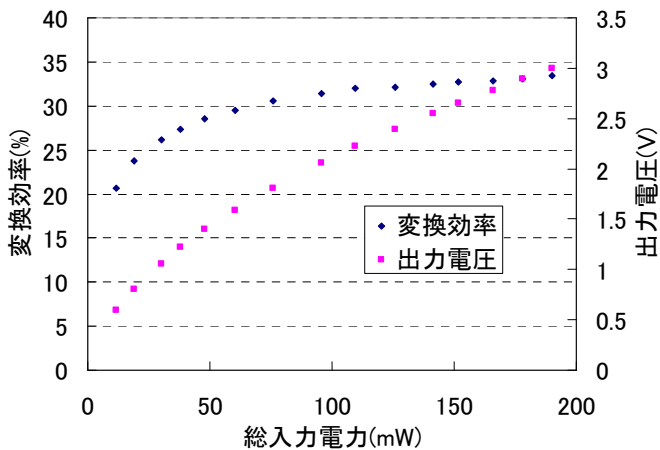


図 5. 整流回路 8 素子を並列に接続したときの変換効率および出力電圧



図 6. 受電アンテナ

3.2. 受電アンテナ

整流回路に組み合わせる受電アンテナには軽量で生産性に優れ、開口面積を広く取れるパッチアンテナを使用する。受電アンテナの写真を図 6 に示す。このアンテナは過去に研究室で作成されたもので、9 枚のパッチアンテナが並べられている。このアンテナを使用することで分配器を取り付けなくとも必要な電力を分配して整流回路に入力することができる。パッチアンテナ 1 枚の直径は 4.6cm、2.4575GHz におけるアンテナ利得は約 8dBi で、開口面積はおおよそ 75cm² である。このパッチアンテナそれぞれに整流回路を取り付け、レクテナとして使用する。

4. マイクロ波送電と ZigBee 通信の両立

マイクロ波送電と ZigBee 通信を両立させる方法として受電アンテナの背後に ZigBee 端末を設置する方法を考案した。送電マイクロ波の電力を受電アンテナが受電することで ZigBee 端末の位置では電力密度が 0.27mW/cm² 以下の通信が行える値まで減少すると考えた。図 7 にこの方法の概略図を示す。この方法では送電マイクロ波のみではなく ZigBee 通信の電波も同様に減衰されてしまうため、ZigBee 端末を近くに設置するなどして通信電波の強度を通信が可能なレベルまで確保する必要がある。しかし、図 7 のように送電マイクロ波に対して横方向に ZigBee 端末を設置すればこの影響は避けられるため、本稿ではこの方向に ZigBee 端末を設置していると仮定する。

この方法におけるマイクロ波電力密度の具体的な減衰量を図 8 に示す実験装置を用いて受電パッチアンテナの枚数、測定用アンテナからの距離を変化させて測定した。測定用アンテナには受電アンテナと同様のパッチアンテナ 1 枚を使用し、ホーンアンテナとの距離を 3m に固定した。受電アンテナを設置しなかった場合との比較から減衰量を求めた結果を図 9 に示す。10~25dB ほど電力密度が減衰したことが確認でき、パッチアンテナの枚数が多く、また測定用アンテナに近いほど減少量が大きかった。0.25mW/cm² 程度の電力密度の外部マイクロ波中ならば ZigBee 通信が可能ながわっているため、この結果を照らし合わせると 1~30mW/cm² 以上の電力密度でマイクロ波送電が可能であると言え、受電アンテナを現在の半分以下まで小型化できると考えられる。

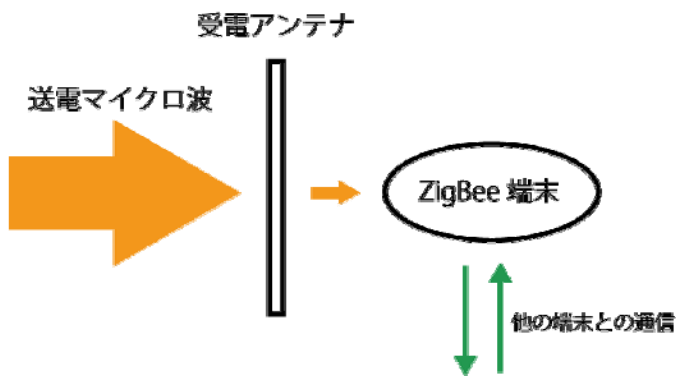


図 7. 受電アンテナによる送電マイクロ波の減衰

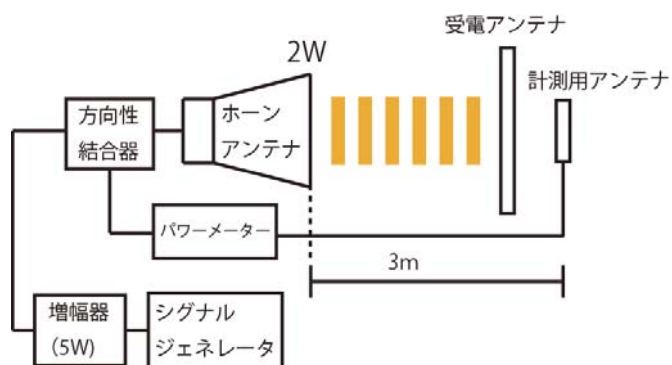


図 8. 減衰量測定実験装置

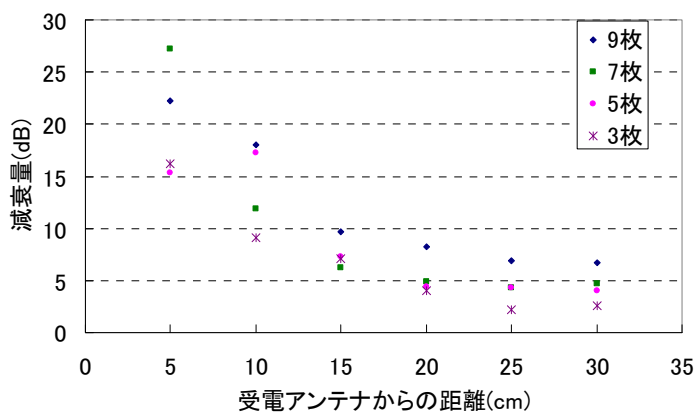


図 9. 受電アンテナによる減衰量

5. 無線電力伝送実験

3 節に記したレクテナを用いて無線電力伝送実験を行った。整流回路の出力端を 140Ω の負荷抵抗に並列接続し、ホーンアンテナによりマイクロ波を放射した場合の電力変換効率および出力電圧を測定した。受電アンテナへの総入力力は測定用パッチアンテナを受電アンテナの横に設置して入力電力を測定し、その値を 9 倍して求めた。測定結果を図 10 に示す。電力分配器を使用した有線入力電力の場合と同等の変換効率、および ZigBee 端末を動作させることができる程度の電圧の出力が確認できた。

次に負荷抵抗の代わりに ZigBee 端末を接続して受電アンテナの背後 10cm の位置に置き、マイクロ波を放射して ZigBee 端末の動作実験を行った。通信時の消費電力を補うためにレクテナに加えて 2.2mF のキャパシタを並列に接続した[4]。受電アンテナへの総入力力が 144mW のとき、 2.8V にて ZigBee の動作が確認でき、同時に横方向 2m 先に設置した ZR 端末との通信を行うことができた。ただし、端末起動時の電力はマイクロ波電力だけで補えなかったため起動時には電池を接続し、起動後に電池を取り外すという操作が必要であった。

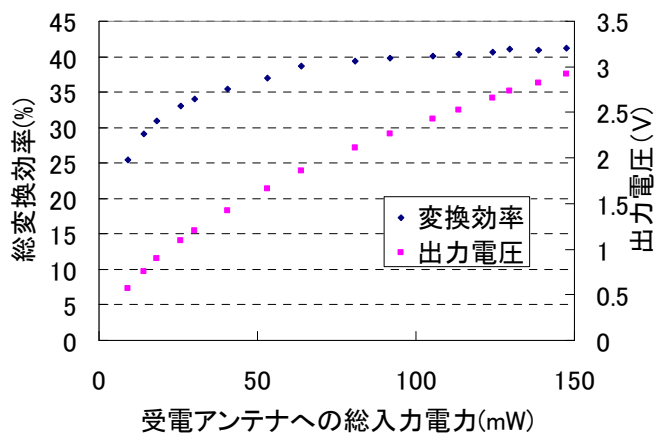


図 10. 無線マイクロ波入力による整流回路の変換効率および出力電圧

6. 結論

本研究では ZigBee 端末用マイクロ波受電システムを開発した。

作成した整流回路の変換効率は 1 素子の場合で 65% と高い変換効率が得られた。必要な電力を入力するため複数の整流回路を使用することで十分な電力を整流することができたが、変換効率が 33% 程度まで下がったため、インピーダンスの調整や整流回路の再設計などで変換効率を向上させる必要がある。

受電アンテナによって ZigBee 端末を送電マイクロ波から防ぐ方法では何も処置をしない場合に比べ 10 ～100 倍以上の電力密度での電力伝送が可能となり、ZigBee 端末の位置に制限がかかるものの非常に大きな電力を送電できることがわかった。ZigBee 端末が通信を行える配置や距離については今後検討していく必要がある。

レクテナ 9 素子および負荷抵抗を用いた無線電力伝送実験ではマイクロ波無線電力によって ZigBee 端末を動作させられるだけの出力電力および出力電圧が得られた。実際に ZigBee 端末を接続した場合には起動時に別の電源が必要であったが、端末起動後は ZigBee 端末の消費電力を無線マイクロ波電力だけで補うことができ、同時に通信を行うことができた。

今後は ZigBee 端末の起動も無線電力のみで供給可能にするとともに、受電アンテナの小型化を主な課題として取り組む。

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, 2006 年.
- [2] 鈴木望, ZigBee センサー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, 信学技報, SPS2009-12, pp.11-15, 3 月, 2010 年.
- [3] 伊藤精彦, 太陽発電衛星受電用地球局端末素子「レクテナ」に関する基礎的研究, 科研費補助金研究成果報告書, 1983 年.
- [4] 川原圭博, センサーネットワークのためのエネルギーハーベスティングの研究動向, 信学会, BT-5-4, pp.SS-56 – SS-57, 3 月, 2010 年.