

ZigBee 端末への間欠マイクロ波電力伝送の研究

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、コストの問題となっている。そこで本研究はマイクロ波無線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。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を阻害しないよう送電電力を抑える必要があった。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。そのため、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しないと考えられる。ZigBee通信と同じ周波数の送電マイクロ波を端末へ連続的に照射すると 10 pW/cm^2 程度で通信が不可能となったが、パルス周波数 10 Hz で間欠的に送電マイクロ波を照射することで 4.88 mW/cm^2 まで通信を行わせることができた。一方でレクテナ整流回路が間欠的に送電マイクロ波を受電する際のRF-DC変換効率の測定も行った。整流回路は尖頭入力電力によって変換効率が決まることがわかった。また、出力電圧が間欠的になったことから平滑化回路をレクテナとZigBee端末間に挿入し、電力供給実験を行ったところ通信を妨害することなく送電を行うことを確認できた。

キーワード マイクロ波無線電力伝送, ZigBee, ワイヤレスセンサネットワーク

Study on 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. The objective of the present study is to drive or charge a ZigBee device by intermittent microwave power transmission, which is compatible with a wireless sensor network. We conducted three kinds of experiments to investigate intermittent microwave power transmission toward a ZigBee device. First, supplying microwave for a set of the rectifier and a load intermittently, we measured RF-DC conversion efficiency of the rectifier circuit. We found out that the rectifier could supply the DC power for the output load more efficiently with the intermittent transmission than the continuous transmission. Second, we investigated the influence of the power supply microwave on the network communication. As continuous microwaves near ZigBee-communication-frequencies were irradiated to the devices, communication became interrupted in the power density of 10 pW/cm^2 . However, the ZigBee devices could communicate correctly in the much higher power density of 1 mW/cm^2 using intermittent power transmission. Finally, we realized to drive a ZigBee device by intermittent microwave power transmission with the ZigBee device kept participating in the communicational network.

Keyword Microwave Power Transmission, ZigBee, Wireless Sensor Network

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。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]。そこで、間欠的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。

ZED 端末は 1.14 s 毎に約 2 ms 間データ送信を行う。ZC 端末は ZED 端末からの通信が途絶えて 15 s を超えるとその端末をネットワークから除外する。除外された端末は再びネットワークに参加する手続きを行う必要がある。

電波資源の節約のため、通信用電波と送電用電波は同じ周波数が望ましい。しかしその場合、送電波を照射するとその強度によっては通信が妨害され正常な通信が行えなくなる[2]。また、前述のとおり ZigBee 端末は間欠的に通信を行う。従って、送電波による通信の妨害を解決するため、本研究では間欠的にマイクロ波を照射し通信していない時間に送電を行う方法を提案する。

図 1 のように、間欠な送電マイクロ波をアンテナと RF-DC 整流回路を組み合わせたレクテナで受電し直流に変換した後に電圧安定化回路によって端末に安定な直流電力を供給するシステムを構想している。

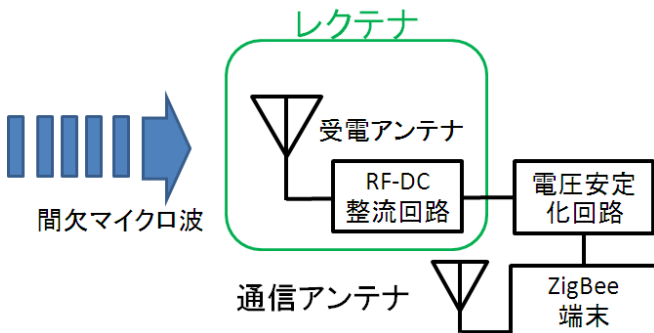


図 1: 受電システム

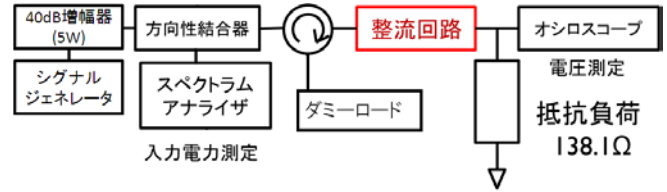


図 2: RF-DC 整流回路の効率測定

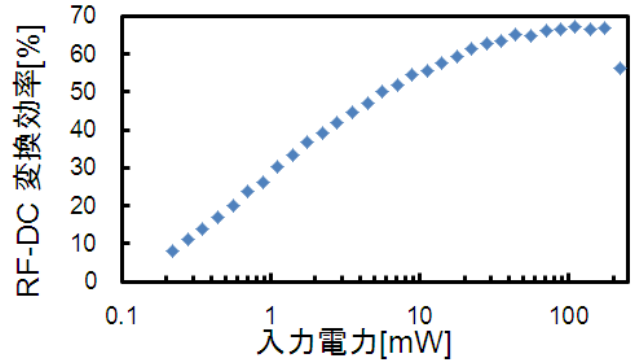


図 3: 連続波入力時の RF-DC 変換効率

3. RF-DC 整流回路の効率測定

連続波用 RF-DC 整流回路に送電マイクロ波を間欠的に入力した場合、連続波入力と比べ RF-DC 変換効率の低下や出力電圧の変動が考えられる。従って本研究では、図 2 の測定系を用いて送電マイクロ波の連続入力時と間欠入力時の RF-DC 変換効率の測定を行った。使用した整流回路は先行研究[2]で作成されたシングルシャント型 RF-DC 整流回路で、入力周波数 2.46GHz 出力負荷 140 Ω で最大効率となるよう設計されている。

測定結果を図 3 に示す。横軸は入力した送電マイクロ波の電力であり、縦軸は整流回路の RF-DC 変換効率である。入力電力に従って効率が上昇し、入力 60 mW 付近で効率 65% となり飽和した。また入力電力が 180 mW を超えると効率が下がり始めた。

次に連続波入力時と同様に図 2 の構成で、間欠的に送電マイクロ波を入力し、整流回路の変換効率を測定した。送電マイクロ波の周波数は 2.46 GHz を用い、送電マイクロ波のパルス周波数を 1.00 Hz で固定した上で、平均入力電力 16 mW, 65 mW, 101 mW の 3 通りについて、デューティ比を 0.1 から 1 まで変化させた。また、整流回路が破壊されないよう入力するマイクロ波の尖頭電力を制限した。

測定結果を図 4 に示す。横軸はデューティ比、縦軸は変換効率である。なお、出力電圧が図 5 のようにパルス状となったので、一周あたり平均電力を用いて効率を評価した。平均入力電力 65 mW でデューティ比 0.3 の時に尖頭電力は 218 mW であり、平均入力電力 101 mW でデューティ比 0.5 の時に尖頭電力は 203 mW であった。つまり効率が低下した 2 点の尖頭

電力はいずれも 180 mW を超えている。また表 1 に示すようにそれぞれの平均入力電力で近い尖頭電力を持つデューティ比では効率がよく一致している。以上から整流回路の変換効率はマイクロ波の尖頭電力に依存すると考えられる。また、平均 60 mW 未満の電力を入力する際には連続的に入力する時と比べ、RF-DC 変換効率が向上することがわかった。

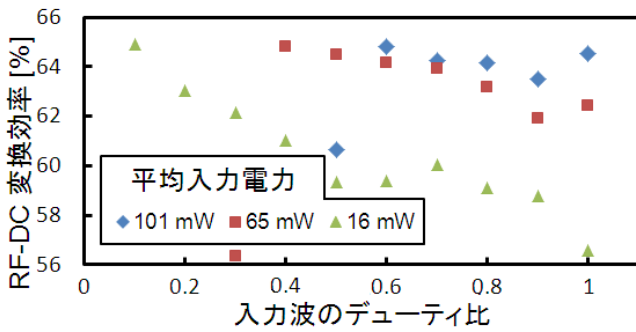


図 4: 間欠波入力時の RF-DC 変換効率

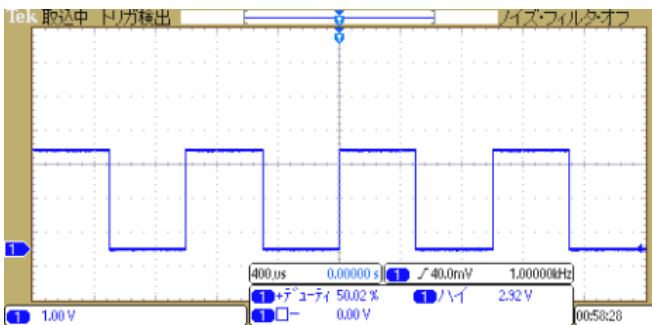


図 5: 間欠波入力時の出力電圧波形

表 1: 近い尖頭電力を持つ間欠波入力時の変換効率

平均入力電力	デューティ比	尖頭電力	RF-DC 変換効率
16.1 mW	0.1	161 mW	64.9%
65.9 mW	0.4	164 mW	64.8%
100 mW	0.6	168 mW	64.8%

4. 電圧安定化回路の作成・評価

レクテナからの間欠的な出力の平滑化と接続する端末に定格以上の電圧が印加されることの防止を目的に、降圧型 DC-DC コンバータの入力段にキャパシタを並列に接続した電圧安定化回路を作成した。この回路は入力電圧が 2.8 V から 10 V の範囲で ZigBee 端末の駆動に必要な 2.7 V から 3.6 V を出力する。

電圧安定化回路をレクテナと ZigBee 端末間に挿入することで、端末の消費電力に対する受電電力の利用効率が低下することが考えられる。そこで、図 6 の測定系でこの電圧安定化回路の DC-DC 変換効率と入力インピーダンスを測定した。接続する負荷は 150 Ω と

した。

入力電圧に対する変換効率の結果を図 7 に示す。最大効率は 97.2% であり、想定する最大入力電圧の 10 V においても 75% の効率であった。一方で図 8 に示す入力インピーダンスは、想定入力電圧 2.8 V から 10 V の範囲で接続した負荷の 0.99 倍から 7.6 倍と大きく変化した。レクテナを接続し送電マイクロ波を入力すると、電圧安定化回路のキャパシタにかかる電圧は上記の電圧の範囲で増減するため、レクテナの最適負荷とずれることによる RF-DC 変換効率の低下が予想される。

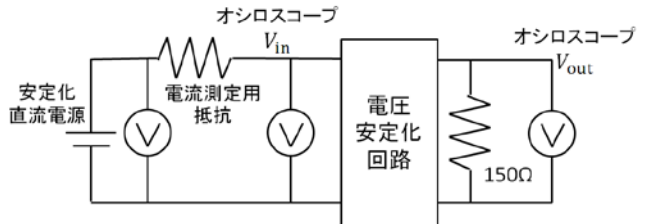


図 6: 電圧安定化回路の評価

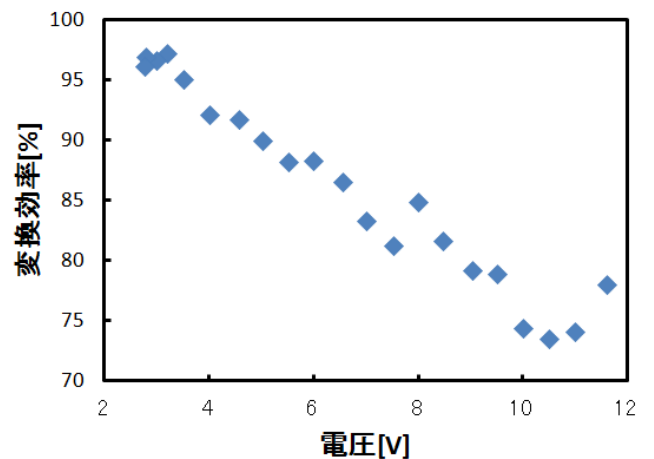


図 7: 入力電圧に対する DC-DC 変換効率

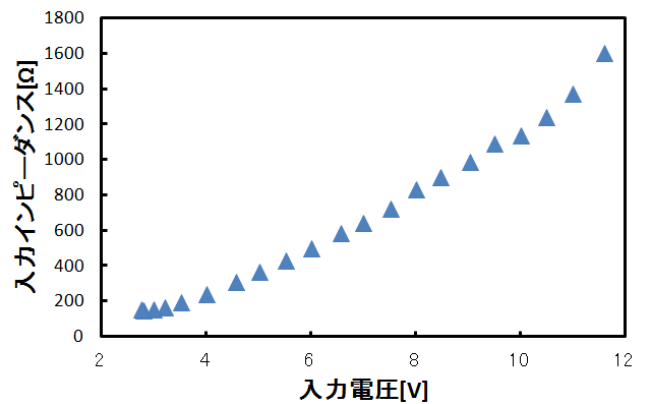


図 8: 入力電圧に対する入力インピーダンス

5. 送電マイクロ波中での ZigBee 通信実験

間欠送電の有効性の検証のために ZigBee 通信と同じ周波数帯の送電マイクロ波を ZED 端末に照射したときの通信を妨害しない送電マイクロ波の強度を測定し、連続入力時と間欠入力時の比較を行った。また、間欠に照射した時には ZED 端末の送信エラー率の測定も行った。

図 9 の測定系を用いて、ZED 端末にホーンアンテナを用いてマイクロ波を連続的に照射し、ZED 端末の位置における通信可能な最大電力密度を測定した。この時、ZigBee 通信の周波数は 2.46 GHz に設定した。照射するマイクロ波の周波数は 2.4 GHz から 2.5 GHz まで 2.5 MHz ごとに測定を行った。

結果を図 10 に示す。横軸は照射した送電マイクロ波の周波数であり、縦軸は通信可能な送電マイクロ波の電力密度の最大値である。通信周波数 2.46 GHz の送電マイクロ波を照射すると、10 pW/cm²程度と他の周波数と比べ低い電力密度で通信が妨害された。

次に通信可能な最大電力密度が最小となった 2.46 GHz のマイクロ波を間欠に照射し通信状況が改善することの検証実験を行った。

前述の実験と同様の状況で、2.46 GHz の送電マイクロ波においてデューティ比を 0.1, 0.5, 0.9 の 3 通りについて実験を行った。送電マイクロ波のパルス周波数は 1.00 Hz から 500 Hz までの範囲で変化させた。送電マイクロ波を照射中に ZED 端末を起動させ、通信可能な電力密度及び通信開始後 2 分間の ZED 端末の送信エラー率を測定した。

いずれの場合においても通信可能な電力密度の尖頭値は 4.88 mW/cm²であった。4.88 mW/cm²より高い尖頭電力密度を持つ送電波を照射すると通信は行われなかった。尖頭電力密度 4.88 mW/cm²の送電波を間欠的に照射した時のエラー率を図 11 に示す。送電マイクロ波のパルス周波数が 10 Hz の時、いずれのデューティ比においてもエラー率が最小となった。送電マイクロ波がパルス周波数 10 Hzかつデューティ比 0.5 の時にはエラーなく通信が可能であった。従って、連続波と比べ通信可能電力密度を約 87 dB向上させることができた。以上から ZigBee 端末に無線電力伝送を行うにあたり間欠送電は有効であるといえる。また、最も通信を妨害しやすい周波数で送電を行う場合で通信可能な電力密度を向上させることができたため、他の周波数を用いた場合にも電力密度の向上が予想される。

一方で、ZED 端末のデータ送信時に送電波が照射されると通信が妨害されると考えられる。そのため、本実験では 2 分間エラーなく通信を行えたが、実際の運用期間を数年とした場合には、その運用期間中に送電マイクロ波による通信エラーが発生する可能性がある。

従って、通信の信頼性をより向上させるためには送電波と ZigBee 通信との間で同期をとる必要があると考えられる。

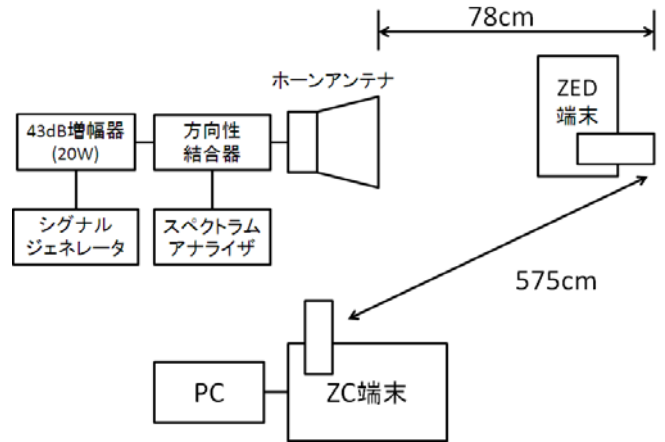


図 9: 送電マイクロ波中での ZigBee 通信実験

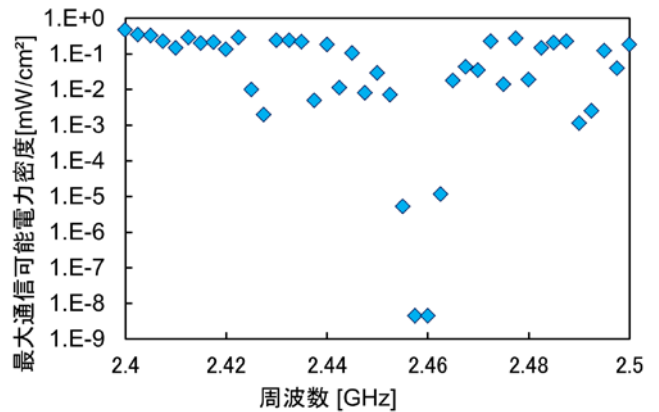


図 10: 通信可能な電力密度の周波数特性

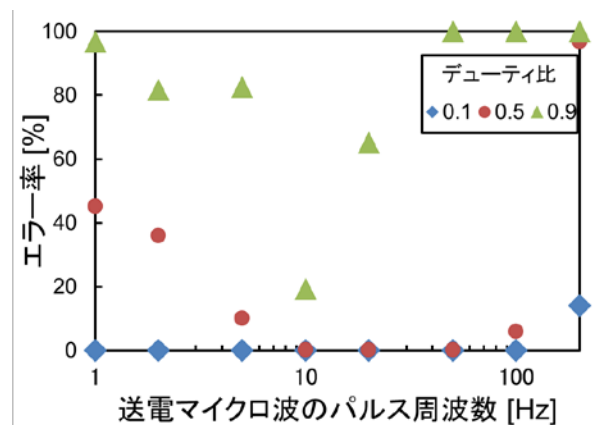


図 11: 通信と同じ周波数を持つ送電マイクロ波を間欠的に照射した時のエラー率

6. ZED 端末へのマイクロ波電力供給実験

実際に送電と通信が両立することを確認するために、図 12 の構成で電力供給実験を行った。通信周波

数と送電マイクロ波の周波数はともに 2.46 GHz を使用した。送電マイクロ波のパルス周波数を 1 Hz から 50 Hz まで変化させた時に ZED 端末が起動し通信を開始する最小のデューティ比と通信開始から 2 分間のエラー率を測定した。レクテナを 4 素子使用し、2 直列 2 並列で接続した。組み合わせたレクテナの最適負荷は 140 Ω と考えられる。送電マイクロ波の尖頭電力密度は受電アンテナの位置では 2.42 mW/cm²、ZED 端末の位置では 0.91 mW/cm² であった。

送電マイクロ波の各パルス周波数に対するデューティ比とエラー率の結果を図 13 に示す。送電波のパルス周波数が 10 Hz の時にエラー率が最小となった。この傾向は第 5 節の結果と一致している。また、パルス周波数が 5 Hz から 20 Hz の範囲で送電マイクロ波のデューティ比が 0.41 以下となり、受電アンテナの位置での平均電力密度が電波防護指針である 1 mW/cm² 以下となった。また、パルス周波数 10 Hz の時の平均受電電力は 225 mW であった。起動時の ZED 端末の消費電力はネットワーク非参加のため 61.8 mW であるから、ZED 端末の電力利用効率は 27.5% であった。電圧安定化回路の入力インピーダンスの変化に対応したレクテナを使用すれば、より高い効率で電力を取り出すことができると思われる。

7. まとめ

今回、ZigBee 通信からは雑音に見える送電マイクロ波を間欠的に照射することで、通信への干渉を回避することを確認できた。加えて、通信を最も妨害しやすい周波数の送電マイクロ波を照射した際にも干渉を回避することができた。また、実際に電力供給実験を行い通信と送電の両立に成功した。通信の信頼性をさらに向上させるために、通信と送電との間で同期を取る必要がある。

一方で連続波受電用に作成されたレクテナ整流回路に間欠波を入力することで効率の低下が予想されたが、入力する尖頭電力で変換効率が決定されることがわかり、平均入力電力によっては効率を改善することが可能ということもわかった。しかし、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化するため整流回路の最適負荷からずれる。そのため、ZED 端末へのマイクロ波電力供給実験において、ZED 端末の受電電力の利用効率は 27.5% となった。従って最適負荷の範囲が大きな整流回路を設計する必要がある。

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.

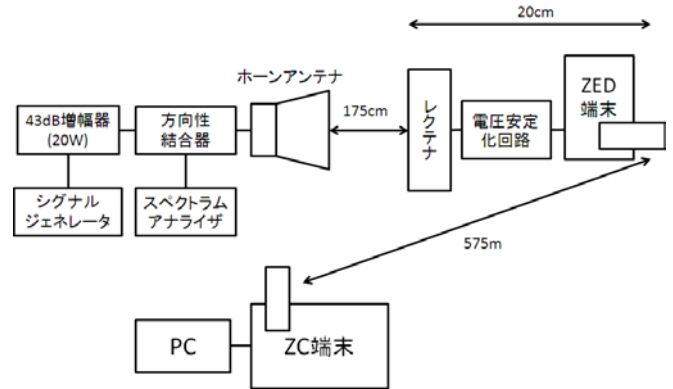


図 12: ZED 端末への電力供給実験

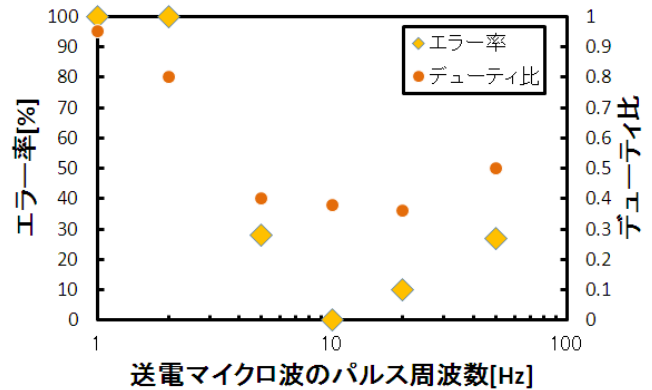


図 13: ZED 端末が駆動した最小のデューティ比とその時のエラー率