

複数のアンテナ位相制御における 位相最適化アルゴリズムの検討

濱政 光¹ 川崎 慈英¹ 田中 勇氣² 木崎 一廣¹ 猿渡 俊介¹ 渡辺 尚¹

概要：

IoT デバイスへの電力供給のために、複数の分散アンテナの位相を制御して複数の IoT デバイス上に強め合う定常波を発生させる位相制御協調電力伝送手法が提案されている。位相制御協調電力伝送手法は個々に最適化された送信アンテナの各位相セットを時分割で切り替えることにより、すべての IoT デバイス間で均等な電力を供給を可能にする。特に、各送信アンテナの位相セットを最適化するために RSSI (Received Signal Strength Indicator) フィードバックパケットを利用して、ヒューリスティックなアルゴリズムを適用することで RSSI フィードバックパケットの数を減らしている点が特徴である。しかしながら位相制御協調電力伝送手法の位相セット最適化アルゴリズムは計算量が非常に大きいことが問題である。本稿では、計算量を削減したアルゴリズムとして漸進的全探索法・漸進的山登り法・漸進的中点探索法の 3 つのアルゴリズムを提案して、コンピューターシミュレーションを使用して提案アルゴリズムを給電効率と位相推定速度の観点から評価した。

1. はじめに

マイクロ波の無線電力伝送は、屋内や機器内に設置された IoT デバイスやセンサ端末に電力を供給するのに適している。電波電力伝送は距離減衰が大きく供給電力が小さい欠点があるが、エネルギーハーベスティング技術と比較すると時間や環境にかかわらず安定した電力供給が可能な点と、アクセスポイントでデータ通信が可能な点の 2 つの利点がある。文献 [1-3] では、無線電力伝送と情報通信を組み合わせた研究が行われている。無線通信と電力伝送を同時に行う技術である SWIPT (Simultaneous Wireless Information and Power Transfer) は IoT 時代を支える重要な技術になると考えている。

本研究では SWIPT の将来的な実現を念頭に置いて、電波による無線電力伝送の効率の向上に取り組んでいる。図 1 は単一のアンテナを用いた無線電力伝送の様子を示している。単一のアンテナを使用した無線電力伝送では、アンテナと IoT デバイスの距離が遠いほど IoT デバイスが得るエネルギーが少なくなるため電力不足の問題が発生する。電力不足によって、一部の IoT デバイスは駆動できない場合がある。

分散型の複数のアンテナを用いると、アンテナと IoT デバイス間の相対距離は単一のアンテナを用いた場合と比べて小さくなるため、効率的に電力を供給できる。複数のアンテナを使用

した無線電力伝送には 2 種類の研究があり、1 つは単一の IoT デバイスを対象にした研究 [4-7] で、もう 1 つは複数の IoT デバイスを対象にした研究 [8,9] である。私たちの研究は、複数のアンテナを用いて複数の IoT デバイスを対象にした無線電力伝送に着目している。

複数の IoT デバイスに対して複数の分散型アンテナを用いると定常波の問題が発生することが知られている [9]。図 2 は定常波問題の様子を示している。複数のアンテナが同時に電波を放出すると、強め合う干渉と弱め合う干渉が発生する。弱め合う干渉に位置する IoT デバイスは十分に電力を得ることができない。

この問題を解決するために文献 [9] では CSD (Carrier Shift Diversity) 電力伝送を提案している。図 3 に CSD 電力伝送の様子を示す。CSD 電力伝送は電波の位相制御量を連続的に変化させることにより、定常波の影響を除いた電力供給を可能にする。連続的な位相変化によって強め合う干渉と弱め合う干渉が短時間で交互に発生するため、IoT デバイスが受信する電力は平均化される。しかしながら、CSD 電力伝送は弱め合う干渉の影響を減らすことが、強め合う干渉の影響も減らしてしまう。

したがって、文献 [10] では位相制御協調電力伝送 (PC-CPT: Phase-Controlled Cooperative Power Transfer) が提案されている。PC-CPT は、分散型の複数のアンテナと複数の IoT デバイスの条件下で電力伝送効率を改善する手法で、各アンテナから放射される電波の位相を制御することで各 IoT デバイスでの強

¹ 大阪大学情報科学研究科

² パナソニック株式会社

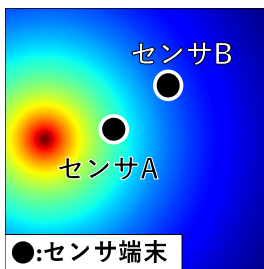


図 1 単一アクセスポイントの無線電力伝送

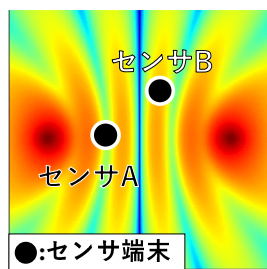


図 2 複数アクセスポイントの無線電力伝送, PC-CPT ($\Theta_1 = 0, 0$)

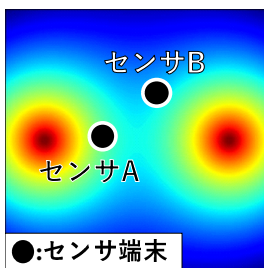


図 3 CSD 電力伝送

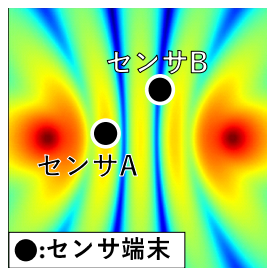


図 4 PC-CPT ($\Theta_2 = \frac{2\pi}{3}, \frac{5\pi}{3}$)

め合う干渉量を増加させる。すべての IoT デバイスで供給される電力が最適化されるように個々に最適化された位相の組み合わせを切り替える。本稿では、位相の組み合わせを位相セット Θ と呼ぶ。図 2 と図 4 に PC-CPT の例を示す。図 2 と図 4 は、強め合う干渉のパターンを変更するために時分割で位相セット Θ_1 と Θ_2 を切り替えることを示している。 Θ_1 は 2 台のアクセスポイントの両方が位相制御量 0 で電波を放出する位相セット、 Θ_2 は 1 台のアクセスポイントが位相制御量 $\frac{2\pi}{3}$ 、もう 1 台のアクセスポイントが位相制御量 $\frac{5\pi}{3}$ で電波を放出する位相セットである。文献 [10] では CSD 電力伝送などの既存の手法と比較して提案手法を評価して、評価結果は提案手法が既存手法よりも優れていることが示されている。

以下に本稿の構成を記す。2 章ではネットワークモデルと IoT デバイスモデルを含むシステムモデルを紹介し、モデルの RSSI フィードバック問題を示す。3 章では RSSI フィードバック問題を改善するアルゴリズムを提案して、4 章では提案アルゴリズムの評価と考察を行う。5 章で関連研究を示して、最後に 6 章で本稿のまとめとする。

2. システムモデル

2.1 PC-CPT のシステムモデル

図 5 に PC-CPT のネットワークモデルを示す。複数の送信アンテナと IoT デバイスがネットワークに展開されている。送信アンテナと IoT デバイスの位置は固定である。それぞれの送信アンテナは無線電力送信機に接続されて、送信アンテナは局部発振器を共有して同じ周波数の電波を送信する。

無線電力送信機は、位相制御器によって各送信アンテナからの電波を各位相を制御する。すべての送信アンテナの位相の組み合わせは、位相セット $\Theta = \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m$ と呼ばれる。 m は送信アンテナの数である。送信アンテナは時分割で

$\Psi = \Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_p$ 内の位相セットを切り替え、すべての IoT デバイスに電力を公平に供給する。 p は位相セットの数である。無線電力送信機は、IoT デバイスからの RSSI フィードバックに従って送信アンテナからの電波の位相制御量を中央で制御する。

図 6 に IoT デバイスモデルを示す。IoT デバイスは Backscatter モジュール、環境発電モジュール、および低電力のデータデコーダモジュールを具備していると想定する。Backscatter モジュールは、アクセスポイントからの電波を反射および吸収することによりデータ通信を実行する。Backscatter 通信は、外部のアクセスポイントの電波を搬送波として使用する従来の無線通信よりも消費電力ははるかに少なくなる [11–13]。環境発電モジュールは、レクテナを介して電波からエネルギーを吸収してコンデンサに保存する。コンデンサは、メインコントロールユニット (MCU: Main Control Unit)、Backscatter モジュール、そして低電力データデコーダに電力を供給する。データデコーダモジュールは文献 [14, 15] で説明されているように、非常に低い電力とエネルギー検出器を使用して無線電力送信機からのデータ信号をデコードする。さらに、IoT デバイスはデータデコーダを使用して RSSI を測定できる。

2.2 RSSI フィードバック問題

前節の提案システムモデルでは、複数のアンテナと IoT デバイスを使用した最適な電力伝送は次のように表すことができる。

$$\text{minimize} \quad \sum_{i=1}^p T_i \quad (1)$$

$$\text{subject to} \quad E_j \geq C_j, \forall j \quad (2)$$

$$E_j = \sum_{i=1}^p W_{i,j} T_i, \quad \forall j \quad (3)$$

$$W_{i,j} = \text{Energy}(\Theta_i, j) \quad \forall j \quad (4)$$

上式で p は位相セット数、 T_i は位相セット Θ_i の送信期間、 C_j は IoT デバイス j のコンデンサに保存される可能性のある電力、 $W_{i,j}$ は位相セット Θ_i の場合に IoT デバイス j に供給される電力、 E_j は IoT デバイス j に供給される電力を表す。方程式 $W_{i,j} = \text{Energy}(\Theta_i, j)$ は、 $\Theta_i = \theta_{i,1}, \theta_{i,2}, \dots, \theta_{i,m}$ について IoT デバイス j に供給される電力を表す。 m は送信アンテナの数である。例えば、 $\theta_{3,5}$ は 3 番目の位相セット Θ_3 内の 5 番目の送信アンテナから放射される電波の位相制御量を表している。

方程式 (1) は目的関数を表す。最適な時間配分は、制約式 (2)~(4) を満たす最小の総送電時間である。方程式 (2) では、供給される電力はそれぞれの IoT デバイスのコンデンサに蓄積されるエネルギー以下でなくてはならない。方程式 (3) は、それぞれの IoT デバイスで供給される電力を表す。IoT デバイス j に供給される電力 E_j は、1 秒間当たりの電力供給量 $W_{i,j}$ と位相セット Θ_i のときの伝送時間 T_i の積で表される。方程式 (4) は、それぞれの IoT デバイスの 1 秒当たりの電力供給量を表す。

方程式 (1)~(4) を解くことにより最適な電力伝送が導き出される。ただし、ある位相セットで IoT デバイスに供給される電

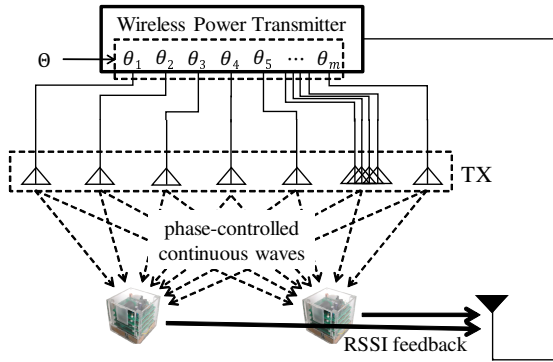


図 5 PC-CPT のシステムモデル

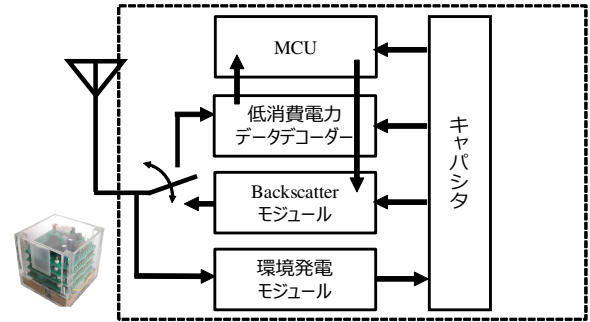


図 6 IoT デバイスモデル

力を示す RSSI フィードバックパケットである pnr^m が問題となる。 p は位相セットの数で無限となる。位相セットの数が無限となる理由は、送信アンテナの位相の値が理論上無数に決められるためである。 n は IoT デバイスの数であり通常 128 台か 256 台、 r はデジタルの位相制御器の解像度である。 $\text{Energy}(\Theta_i, j)$ 関数は、送信アンテナが位相セット Θ_i を用いて連続波を放射するときの IoT デバイス j の供給電力を 1 つの RSSI フィードバックパケットとして返す。1 台の IoT デバイスに供給されるエネルギーを得るには 1 つの RSSI パケットが必要であるため、それぞれの IoT デバイスについて各位相セットで供給されるエネルギーを測定する必要がある。したがって、位相セットの組み合わせ Ψ を計算するには pnr^m 個のフィードバックパケットが必要となる。

3. 計算量削減手法

RSSI フィードバック問題を解決するためにフィードバックパケット数を削減する手法を考える。まず、位相セット数 p を $p = n$ を仮定することでフィードバックパケット数を無限から有限に減らす。求める位相セットの数を IoT デバイスの数と一致させることで、IoT デバイス 1 台あたり 1 組の位相セットを推定すると考えることができる。位相セットの数が n に制限されているとき方程式 (1)~(4) を解くことが可能である。しかしながら $\text{Energy}(\Theta_i, j)$ の計算に $n^2 r^m$ のフィードバックパケットが必要になる。位相セットごとに 1 つの IoT デバイスに供給される電力のみを最大化することにより、フィードバックパケット数は $n^2 r^m$ から nr^m に削減できる。本章ではより計算量を減らした位相セット推定手法として、漸進的全探索法と漸進的山登り法について説明して、最後に漸進的中点探索法を紹介する。

3.1 漸進的全探索法 (Gradual estimation)

文献 [10] では、フィードバックパケット数を減らしたヒューリスティックな手法が提案されている。IoT デバイスが得る電力を最大化する位相セットを送信アンテナ 1 から m まで順次推定することで、漸進的全探索法による位相セットの組み合わせ Ψ を求めるための計算量は、 $O(nrm)$ で表すことができる。

アルゴリズム 1 の i, j, k はそれぞれ IoT デバイス、送信アンテナ、位相制御量についてのループカウンタを表す変数である。

a と t はそれぞれ暫定の最大 RSSI フィードバックを格納する一時変数と RSSI フィードバックを取得する一時変数、 n は IoT デバイスの数、 m は送信アンテナの数、 r はデジタル位相制御器の解像度である。 $\text{startRF}(j, k)$ はデジタル位相制御器に k を設定すると送信アンテナ j から連続波の放射を開始させる関数、 $\text{stopRF}(j)$ は送信アンテナ j が連続波の放射を停止する関数である。 $\text{getRSSI}(i)$ は IoT デバイス i から RSSI フィードバックを取得する関数、 $\text{stopAllRF}()$ は連続波のすべての送信アンテナの放射を停止する関数である。

アルゴリズム 1 の 1~2 行目では、IoT デバイス i の位相セットを推定するとき、送信アンテナ 1 が位相 0 の連続波の放射を開始する。次にアルゴリズム 1 は、IoT デバイス i について送信アンテナ 2 から m への信号の位相を制御する。3~14 行目では、IoT デバイス i から RSSI フィードバックを取得することで、送信アンテナ j からの信号の IoT デバイス i の受信電力を最大化する位相を推定する。9~12 行目では、取得した RSSI フィードバックが暫定の最大 RSSI フィードバックよりも大きければ最大 RSSI フィードバックの値を更新して、15 行目では、送信アンテナ j からの信号の位相を推定した後、送信アンテナ j は推定された位相で連続波を放射する。17 行目では、IoT デバイス i の送信アンテナからの信号のすべての位相が推定され

Algorithm 1 漸進的全探索法 (Gradual estimation)

```

1: for  $i = 1$  to  $n$  do
2:    $\text{startRF}(1, 0)$ 
3:   for  $j = 2$  to  $m$  do
4:      $a \leftarrow 0$ 
5:     for  $k = 0$  to  $r - 1$  do
6:        $\psi \leftarrow 2\pi \frac{k}{r}$ 
7:        $\text{startRF}(j, \psi)$ 
8:        $t \leftarrow \text{getRSSI}(i)$ 
9:       if  $a < t$  then
10:         $a \leftarrow t$ 
11:         $\theta_{i,j} \leftarrow \psi$ 
12:       end if
13:     stopRF( $j$ )
14:   end for
15:    $\text{startRF}(j, \theta_{i,j})$ 
16: end for
17: stopAllRF()
18: end for

```

た後、すべての送信アンテナが連続波の放射を停止する。

3.2 漸進的山登り法 (Gradual hill climbing)

漸進的全探索手法からより効率的に位相セットを推定する手法として漸進的山登り法がある。漸進的山登り法は逐次的に位相を変化させる点で漸進的全探索法と同じだが、RSSI フィードバックが極大値に達した時点で探索を終了する点の特徴である。漸進的山登り法を用いて位相セットの組み合わせ Ψ を求めるとき、最悪計算量は $O(nrm)$ 、最良計算量は $O(nm)$ で求めることができる。次に漸進的山登り法のアルゴリズムを示す。

アルゴリズム 2 の i, j, k はそれぞれ IoT デバイス、送信アンテナ、位相制御量についてのループカウンタを表す変数である。 a と t はそれぞれ暫定の最大 RSSI フィードバックを格納する一時変数と RSSI フィードバックを取得する一時変数、 n は IoT デバイスの数、 m は送信アンテナの数、 r はデジタル位相制御器の解像度である。startRF(j, k) はデジタル位相制御器に k を設定すると送信アンテナ j から連続波の放射を開始させる関数、stopRF(j) は送信アンテナ j が連続波の放射を停止する関数である。getRSSI(i) は IoT デバイス i から RSSI フィードバックを取得する関数、stopAllRF() は連続波のすべての送信アンテナの放射を停止する関数である。 $C[k]$ は送信アンテナ j の位相制御量 $\psi[k]$ のときの RSSI フィードバックを格納する。

アルゴリズム 2 の 1~2 行目では、IoT デバイス i の位相セットを推定するときに、送信アンテナ 1 が位相 0 の連続波の放射を開始する。次にアルゴリズム 2 は、IoT デバイス i について送信アンテナ 2 から m への信号の位相を制御する。3~16 行目では、IoT デバイス i から RSSI フィードバックを取得することで、送信アンテナ j からの信号の IoT デバイス i の受信電力を最大化する位相を推定する。5~14 行目では、位相制御量 ψ_{k+2} のときの RSSI フィードバック $C[k+2]$ を測定する。9~11 行目では、前後の RSSI フィードバックと比較して $C[k+1]$ が極大値となるときの $\psi[k+1]$ を最適な位相と推定してループを終了する。15 行目で、送信アンテナ j からの信号の位相を推定した

Algorithm 2 漸進的山登り法 (Gradual hill climbing)

```

1: for  $i = 1$  to  $n$  do
2:   startRF(1, 0)
3:   for  $j = 2$  to  $m$  do
4:      $a \leftarrow 0$ 
5:     for  $k = 0$  to  $r - 1$  do
6:        $\psi[k+2] \leftarrow 2\pi \frac{k+2}{r}$ 
7:       startRF( $j, \psi[k+2]$ )
8:        $C[k+2] \leftarrow \text{getRSSI}(i)$ 
9:       if  $C[k] < C[k+1]$  and  $C[k+1] > C[k+2]$  then
10:         $\theta_{i,j} \leftarrow \psi[k+1]$ 
11:        break
12:       end if
13:       stopRF( $j$ )
14:     end for
15:     startRF( $j, \theta_{i,j}$ )
16:   end for
17: stopAllRF()
18: end for

```

後、送信アンテナ j は推定された位相で連続波を放射する。17 行目では、IoT デバイス i の送信アンテナからの信号のすべての位相が推定された後、すべての送信アンテナが連続波の放射を停止する。

3.3 漸進的中点探索法 (Midpoint search)

二分探索的に位相セットを推定するアルゴリズムとして漸進的中点探索法を提案する。漸進的中点探索法は、2 点の位相区間を決定して極大値を含むように探索区間を $\frac{1}{2}$ ずつ狭めていく手法である。探索中は区間の両端の位相制御量で IoT デバイス j から RSSI フィードバックを受け取る。漸進的中点探索法による位相セットの組み合わせ Ψ を求めるための計算量は、 $O(nm \log_2 \alpha)$ で求められる。 α は探索区間の両端が $\frac{2\pi}{\alpha}$ まで接近したら探索終了する閾値を表している。アルゴリズム 3 に、IoT デバイス i と送信アンテナ j における漸進的中点探索法のアルゴリズムを示す。

アルゴリズム 3 の i, j はそれぞれ IoT デバイス、送信アンテナを表す変数である。 ψ_1, ψ_2 と t_1, t_2 はそれぞれ探索中の位相制御量を格納する一時変数と RSSI フィードバックを取得する一時変数、 n は IoT デバイスの数、 m は送信アンテナの数である。startRF(j, ψ) はデジタル位相制御器に ψ を設定すると送信アンテナ j から連続波の放射を開始させる関数、stopRF(j) は送信アンテナ j が連続波の放射を停止する関数である。getRSSI(i) は IoT デバイス i から RSSI フィードバックを取得する関数、setRF(j, ψ) は送信アンテナ j が位相制御量 ψ で連続波を放射

Algorithm 3 漸進的中点探索法 (Midpoint search)

```

1: for  $i = 1$  to  $n$  do
2:   startRF(1, 0)
3:   for  $j = 2$  to  $m$  do
4:      $\psi_1 \leftarrow 0$ 
5:      $\psi_2 \leftarrow \psi_1 + 2\pi$ 
6:     startRF( $j, \psi_1$ )
7:      $t_1 \leftarrow \text{getRSSI}(i)$ 
8:      $t_2 \leftarrow t_1$ 
9:     while  $|\psi_1 - \psi_2| < \frac{2\pi}{\alpha}$  do
10:      if  $t_1 > t_2$  then
11:         $\psi_2 = \frac{\psi_1 + \psi_2}{2}$ 
12:        setRF( $j, \psi_2$ )
13:         $t_2 \leftarrow \text{getRSSI}(i)$ 
14:      else if  $t_1 < t_2$  then
15:         $\psi_1 = \frac{\psi_1 + \psi_2}{2}$ 
16:        setRF( $j, \psi_1$ )
17:         $t_1 \leftarrow \text{getRSSI}(i)$ 
18:      else if  $t_1 == t_2$  then
19:         $\psi_2 = \psi_2 - \Delta\psi$ 
20:        setRF( $j, \psi_2$ )
21:         $t_2 \leftarrow \text{getRSSI}(i)$ 
22:      end if
23:    end while
24:     $\theta_{i,j} \leftarrow \frac{\psi_1 + \psi_2}{2}$ 
25:    setRF( $j, \theta_{i,j}$ )
26:   end for
27: stopAllRF()
28: end for

```

する関数, stopAllRF() は連続波のすべての送信アンテナの放射を停止する関数である。

アルゴリズム 3 の 1~2 行目では, IoT デバイス i の位相セットを推定するときに, 送信アンテナ 1 が位相 0 の連続波の放射を開始する。次にアルゴリズム 3 は, IoT デバイス i について送信アンテナ 2 から m への信号の位相を制御する。3~26 行目では, IoT デバイス i から RSSI フィードバックを取得することで, 送信アンテナ j からの信号の IoT デバイス i の受信電力を最大化する位相を推定する。9~23 行目では, 位相区間の両端の位相制御量 ψ_1, ψ_2 の差の大きさが閾値 $\frac{2\pi}{\alpha}$ を満たすまで位相推定を繰り返す。10~17 行目では, 位相区間の両端の位相制御量における RSSI フィードバックの大きさを比較して, 新たな位相区間を設定する。18~21 行目では, 位相区間の両端の位相制御量における RSSI フィードバックの大きさが等しいときに区間を $\Delta\psi$ 狭めて位相区間を再設定している。25 行目では, 送信アンテナ j からの信号の位相を推定した後, 送信アンテナ j は推定された位相で連続波を放射する。27 行目では, IoT デバイス i の送信アンテナからの信号のすべての位相が推定された後, すべての送信アンテナが連続波の放射を停止する。

4. 評価

3 章で提案した漸進的全探索法, 漸進的山登り法, 漸進的中点探索法について, それぞれ給電効率と雑音に対する評価と位相セット推定速度に関する評価の 2 点についてコンピュータシミュレーションによる性能評価を行った。どちらの評価においても 10 台の送信アンテナが 1 台の IoT デバイスに対して給電すると考える。シミュレーションはそれぞれの提案アルゴリズムについて 1000 回ずつ行い, シミュレーションごとに各送信アンテナの位置と初期位相制御量はランダムに設定している。アルゴリズム 1, 2 におけるデジタル位相制御器の解像度 r は 256, アルゴリズム 3 における $\Delta\psi$ は $\frac{2\pi}{r}$, 閾値 α は 256 としている。

4.1 給電効率と雑音に対する評価

給電効率と雑音に対する評価として, 理論上給電できる最大受信電力 (P_{max}) に対して漸進的全探索法, 漸進的山登り法, 漸進的中点探索法はどれくらいの割合給電できたかという点で評価した。理論上給電できる最大受信電力 (P_{max}) とは, それぞ

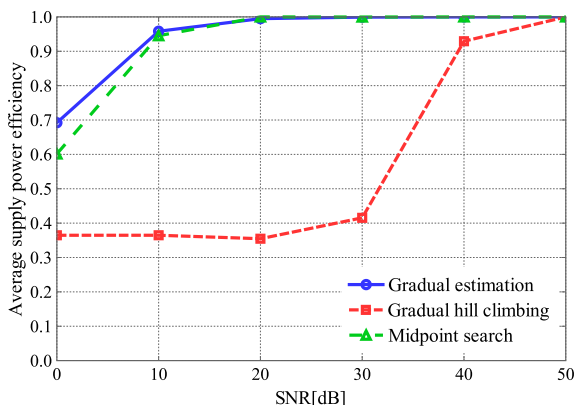


図 7 雑音を含む給電効率

れの送信アンテナが放射した電力が IoT デバイスで最大化されたときの受信電力のことである。各アルゴリズムの雑音に対する耐性を評価するため, 雑音を加えた場合に推定した位相セットで給電した場合の給電効率を測定する。雑音は SNR(信号雑音比: Signal-Noise-Ratio) がそれぞれ 0, 10, 20, 30, 40, 50 [dB] の場合で測定した。雑音が生じない場合として SNR が無限大 (INF) のときの測定も行った。雑音を含めた受信電力の大きさ (P'_s) は次式で表される。 P_s は雑音を含まない電力の大きさ, P_n は雑音の電力の大きさである。 x は SNR [dB] を表し, $N(0, 1)$ は標準正規分布である。

$$P_n = P_s \times 10^{\frac{x}{10}} \times N(0, 1)$$

$$P'_s = P_s + P_n$$

P'_s はアルゴリズム 1~3 より, IoT デバイス i から RSSI フィードバックを取得する getRSSI 関数で得られる。アルゴリズム 1~3 について, 雑音がある状態で推定した位相セットを $\Theta_{noise,l,i}$ とする。 l は試行回数を表す。 $\Theta_{noise,l,i}$ を適用したときの IoT デバイスの受信電力の大きさを $P'_{noise,l}$ として, 給電効率を $P_{eff,l}$ とする。 $P'_{noise,l}$ は位相セットの推定が終了したときの最大の P'_s である。 $P_{eff,l}$ は $\frac{P'_{noise,l}}{P_{max}}$ で求められる。アルゴリズムごとに 1000 回試行して, アルゴリズム 1~3 について平均給電効率 P_{eff} を求める。 P_{eff} は $P_{eff} = \frac{1}{l} \times \sum_{l=1}^{1000} P_{eff,l}$ で求められる。給電効率 P_{eff} が 1.0 に近いほど, 推定した位相セット $\Theta_{noise,l,i}$ は IoT デバイス i に対して最適な位相セットである。

図 7 に雑音に対する各アルゴリズムの給電効率の推移を示す。縦軸は平均給電効率 P_{eff} , 横軸は SNR の大きさである。図 8~10 に SNR が 0, 20, 40 dB のときの処理ごとにおける各アルゴリズムの給電効率の推移を示す。縦軸は暫定給電効率の平均 $\frac{P'_s}{P_{max}}$, 横軸は処理回数である。まず, 漸進的全探索法, 漸進的山登り法, 漸進的中点探索法について処理回数をどのように定義するかについて述べる。漸進的全探索法ではアルゴリズム 1 の 3~16 行目における for 文の処理 1 回を 1 処理と定義する。漸進的山登り法ではアルゴリズム 2 の 5~14 行目における for 文の処理 1 回を 1 処理と定義する。漸進的中点探索法ではアルゴリズム 3 の 9~23 行目における while 文の処理 1 回を 1 処理と定義する。図 8~10 ではアルゴリズム 1~3 のうち, 最も位相セット推定が遅いアルゴリズムの推定が終了するまで他 2 つのアルゴリズムは推定した位相セットを適用したままにしている。

図 7~10 より, 雑音があるときの給電効率について 2 つのことがわかる。1 つ目は, 漸進的全探索法と漸進的中点探索法は雑音に対して強く, 漸進的山登り法は雑音に対して弱いことである。図 7 より漸進的全探索法と漸進的中点探索法は SNR が 10 dB 以上で 95 % 以上の給電効率を達成しているのに対して, 漸進的山登り法が 95 % 以上の給電効率を達成するのは 50 dB からである。漸進的山登り法の給電効率が悪化した原因として, 直前 3 つの RSSI フィードバックを比較して極大値を発見すれば探索を終了する特徴が挙げられる。雑音が大きいほど前後の RSSI フィードバックの大小関係に影響が及ぼされ, 本来推定す

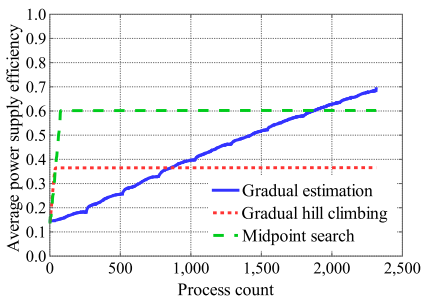


図 8 SNR = 0 dB の給電効率

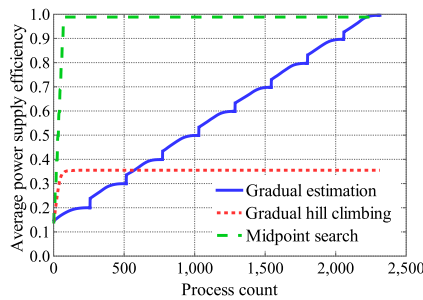


図 9 SNR = 20 dB の給電効率

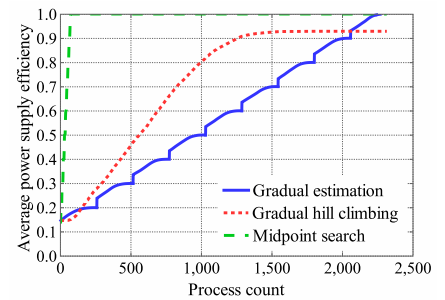


図 10 SNR = 40 dB の給電効率

表 1 位相セット推定までの処理回数

SNR[dB]		0	10	20	30	40	50	INF
		2314	2314	2314	2314	2314	2314	2314
漸進的全探索法	平均	2314	2314	2314	2314	2314	2314	2314
	最大	2314	2314	2314	2314	2314	2314	2314
	最小	2314	2314	2314	2314	2314	2314	2314
漸進的山登り法	平均	38.70	39.68	78.20	584.5	1086	1179	1179
	最大	51	51	187	1119	1847	1850	-
	最小	30	30	32	118	450	560	-
漸進的中点探索法	平均	74.30	74.33	74.49	74.83	75.01	75.01	75.00
	最大	80	79	80	81	79	80	-
	最小	73	73	73	73	73	73	-

べき位相制御量にたどり着く前に極大値を発見してしまったと考えられる。

2つ目は、探索範囲の違いが結果に影響を及ぼすことである。漸進的全探索法や漸進的中点探索法と漸進的山登り法の探索方法の違いとして、位相推定の際に探索する範囲が異なっている点がある。漸進的全探索法は $0 \sim 2\pi$ まですべての組み合わせについて探索して、漸進的中点探索法は最初に $0 \sim 2\pi$ まで考慮したうえで二分探索のように $\frac{1}{2}$ ずつ探索範囲を狭めている。しかしながら漸進的山登り法は直近 3 つの RSSI フィードバックのみを参照しているため探索範囲が非常に狭い。狭い探索範囲の中で位相推定を行ったため、漸進的山登り法は正確に位相を推定できなかったと考えられる。

4.2 位相セット推定速度に関する評価

漸進的全探索法、漸進的山登り法、漸進的中点探索法のそれぞれのアルゴリズムについて位相セットの推定が完了するまでにかかった処理回数を比較して評価する。表 1 に各アルゴリズムの 1000 回の試行の平均処理回数、最大・最小処理回数を記す。漸進的全探索法は全探索のため平均・最大・最小処理回数はすべて同じである。図 8~10 と表 1 より、位相セットの推定速度について 2 つのことがわかる。1 つ目は漸進的山登り法は処理回数の少なさと給電効率の高さを両立していることである。漸進的中点探索法は位相セットの推定にかかる処理回数は 74 回前後で、漸進的全探索法の 2314 回と比べると $\frac{1}{30}$ 以下である。SNR が 0, 10 dB のとき漸進的中点探索法の処理回数は漸進的山登り法の処理回数より多いが、給電効率の観点では漸進的山登り法が 0 dB で約 42%，10 dB で約 59% 優れている。漸進的中点探索法によって処理回数を減らすことができたのは、探索区間を $\frac{1}{2}$ ずつ狭めて更新した効果であると考えられる。

2 つ目は漸進的中点探索法は漸進的山登り法よりも位相セットの推定の処理回数が安定していることである。処理回数が安定することで位相セットの推定にかかる時間を予測できる点で有用である。処理回数の安定性は漸進的全探索法よりも劣るが、

漸進的中点探索法は漸進的全探索法よりも処理回数が少ない。漸進的山登り法の処理回数が安定しない理由として、漸進的山登り法のアルゴリズムは極大値の RSSI フィードバックを与える位相制御量の値に大きく依存しているためだと考えられる。与えられた初期位相が極大値の RSSI フィードバックを与える位相制御量から近い場合は処理回数を削減できるが、意図的に処理回数を削減するように初期位相を決めることはできない。その一方で漸進的中点探索法は、極大値の RSSI フィードバックを与える位相制御量の値に依存せずに推定を行うため処理回数を安定させることができたと考えられる。

5. 関連研究

5 節では本研究の関連研究について述べる。最初に提案手法以外の無線電力伝送を紹介して、次にバッテリーレスセンサネットワーク、最後に無線電力伝送とバッテリーレスセンサネットワークの関連研究を紹介する。

5.1 磁界結合式無線電力伝送

磁界結合方式の無線電力伝送手法は、電磁誘導を用いたものと電磁界共鳴を用いたものの 2 種類に分けられる。電磁誘導の法則は 1831 年にファラデーによって発見され、以下の式で表される。

$$V = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

式中の V は誘導起電力、 N は 2 次コイルの巻き数、 Φ は磁束を示す。電磁誘導を用いた電力伝送は、送電側の 1 次コイルから発生した磁界によって受電側の 2 次コイルに誘導電流が発生する。受電側のデバイスは誘導電流を電力に変換することで充電を行う。

電磁界共鳴における数メートル程度離れていても数 kW の電力を伝送できる特徴を利用して、電気自動車の無線充電に応用する研究もなされている。2016 年にディズニリーサーチ社は、 $54m^3$ の空間全体に 1900 W の電力伝送を達成している [16]。さらに、端末間だけでなく他の端末を経由して無線電力伝送を

行うことでさらなる長距離無線伝送を実現する手法が提案されている [17]. 電磁界共鳴を用いた電力伝送は 40% ~ 60% の効率での電力伝送が可能である [18]. しかしながら、伝送範囲を広げるためには大規模設備が必要となる。

5.2 電波電力伝送の種類

電波を用いた電力伝送は、かつてニコラ・テスラがウォーデンクリフタワーから電力伝送を試みるなど、古来より良く知られた無線電力伝送手法である。電波を用いた無線電力伝送の 1 つとして、送信部から位相や振幅を制御して電力を送る対象デバイス方向にビームを形成することで集中的に電力を送るビームフォーミングの手法が考えられる。送信部から放射された電波を受信部で直流に変換して、電力を得ることができる。文献 [19] では、室内でスマートフォンなどのモバイル機器を充電する無線電力伝送手法が提案されている。しかしながら、電波には距離減衰特性が存在しているため、伝送距離が 2 倍になると電力密度は $\frac{1}{4}$ 倍となって電力の伝送効率が低くなる。

出力を大きくすれば電力密度の問題はカバーできるが、文献 [20-22] では、過度な電波曝露が生体に悪影響を与える可能性について指摘されている。電力密度を高めながら電波曝露を抑える手法として、文献 [23] では、電力伝送の対象デバイスが位置する周囲以外の領域で高エネルギーを発生させない電力伝送手法を提案している。デバイスを囲うように送信機を設置することで、デバイスの静止・移動に関わらず空間全体においてデバイスにのみに対して電力供給を行うことに成功している。本研究では生体に対する電波曝露を考慮するだけでなく、センサの周囲にアクセスポイントを設置して時分割で位相セットを切り替えることにより、複数のセンサに公平な電力の供給を可能にした。

5.3 バッテリレスセンサネットワーク

センサネットワークに適した手法として、現在バッテリレスの通信技術も考案されている。代表的な例が RFID や Backscatter, パッシブエナジーハーベスティングである。本節では、RFID や Backscatter, パッシブエナジーハーベスティングについて紹介する。

5.3.1 RFID と Backscatter

センサネットワークにおいて、電波を用いた通信技術として RFID (Radio Frequency IDentier) が存在する。RFID には電池を搭載しないパッシブ型と電池を搭載するセミパッシブ型、アクティブ型の 3 種類存在していて、通信距離はパッシブ型とセミパッシブ型が数 mm ~ 数 m, アクティブ型が数 m ~ 数十 m である。本節で用いる RFID はパッシブ型を指す [24]. RFID は、受信した電力を利用して受動的に通信を行うことが可能で、既に様々な場面で利用されている。RFID の技術は既存のバーコードと異なり、データの読み取りだけでなくデータの書き込みが可能で、まとめて読み取り可能な点、金属以外で RFID タグが遮蔽されている状態でも読み取り可能な点などで有用である。文献 [25] では、RFID を拡張した WISP (Wireless Identification and Sensing Plat-form) が提案されている。WISP

では、タグの ID だけではなく、タグに付属するセンサのデータも読み取る事ができる。

RFID 以外の電波を用いたバッテリレスセンサネットワークの手法として Backscatter 通信がある。Backscatter 通信とは、自身とは異なる機器から発せられた電波を搬送波として利用する超低消費電力通信手法である。既存研究の例として、無線 LAN から送信される電波を利用して通信することで電力なしで 2.1 m の距離を 1 kbps で通信する Wi-Fi Backscatter の研究 [26] や、大型のシステムとして、宇宙に配置した太陽光発電パネルで発電した電気を電波電力伝送を用いて伝送する宇宙発電システムの研究が行われている [27, 28].

5.3.2 パッシブエナジーハーベスティング

消費電力が非常に小さいセンサが電力を得る手法として、環境内電波を利用したパッシブエナジーハーベスティングが考案されている。環境内電波とは、テレビや携帯電話などから発せられる微弱な電波のことを示す。環境内電波を収集して活用することで、バッテリー交換をせずとも端末間での通信が可能となる。既に文献 [29, 30] では、テレビ塔からの電波や電子レンジから発せられる電波からセンサを駆動できることが確認されている。環境内電波を用いた手法はマイクロワットレベルで動作するデバイスに適した手法である。一方で、より高い電力を必要とする IoT アプリケーションには不向きであることや、得られるエネルギーが安定しないという欠点がある。したがって、パッシブエナジーハーベスティングは一日中センサが駆動する必要があるセンサネットワークでは不向きである。

6. おわりに

本稿は、計算量を削減した位相セット推定アルゴリズムとして漸進的全探索法、漸進的山登り法、漸進的中点探索法の 3 つのアルゴリズムを提案して、コンピューターシミュレーションから給電効率と位相推定速度の観点から評価した。送信アンテナ 10 本、IoT デバイス 1 台を想定したシミュレーションの結果、漸進的中点探索法は給電効率の観点では SNR が 10 dB 以上で理論上給電できる最大受信電力の 95 % 以上の給電効率を達成して、位相推定速度の観点では漸進的全探索法の $\frac{1}{30}$ 以下の処理回数で位相セットの推定できた。現在は実機を用いた検証を行っている。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 (JP19H01101, JP19K11923, 18H03231) の支援の下で行った。

参考文献

- [1] Perera, T. D. P., Jayakody, D. N. K., Shree, K. S., Chatzinotas, S. and Li, J.: Simultaneous Wireless Information and Power Transfer (SWIPT): Recent Advances and Future Challenges, *IEEE Communications Surveys Tutorials*, Vol. 20, No. 1, pp. 264-302 (2018).
- [2] Yamazaki, K., Sugiyama, Y., Kawahara, Y., Saruwatari, S. and Watanabe, T.: Preliminary Evaluation of Simultaneous Data and Power Transmission in the Same Frequency Channel, *2015 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (IEEE WCNC'15)*, pp. 1237-1242 (2015).
- [3] Kassab, H. and Louveaux, J.: Simultaneous Wireless In-

- formation and Power Transfer using Rectangular Pulse and CP-OFDM, *Proceedings of 2019 IEEE International Conference on Communications (IEEE ICC'19)*, pp. 1–6 (2019).
- [4] Ng, D. W. K. and Schober, R.: Secure and Green SWIPT in Distributed Antenna Networks with Limited Backhaul Capacity, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 14, No. 9, pp. 5082–5097 (2015).
- [5] Lee, S. and Zhang, R.: Distributed Wireless Power Transfer with Energy Feedback, *IEEE Transactions on Signal Processing*, Vol. 65, No. 7, pp. 1685–1699 (2017).
- [6] Fan, X., Ding, H., Li, S., Sanzari, M., Zhang, Y., Trappe, W., Han, Z. and Howard, R. E.: Energy-ball: Wireless Power Transfer for Batteryless Internet of Things through Distributed Beamforming, *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, Vol. 2, No. 2, pp. 65:1–65:22 (2018).
- [7] Choi, K. W., Aziz, A. A., Setiawan, D., Tran, N. M., Ginting, L. and Kim, D. I.: Distributed Wireless Power Transfer System for Internet-of-Things Devices, *IEEE Internet of Things Journal* (2018).
- [8] Naderi, M. Y., Nintanavongsa, P. and Chowdhury, K. R.: RF-MAC: A Medium Access Control Protocol for Rechargeable Sensor Networks Powered by Wireless Energy Harvesting, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 13, No. 7, pp. 3926–3937 (2014).
- [9] Maehara, D., Tran, G. K., Sakaguchi, K., Araki, K. and Furukawa, M.: Experiments Validating the Effectiveness of Multi-point Wireless Energy Transmission with Carrier Shift Diversity, *IEICE Transactions on Communications*, Vol. 97, No. 9, pp. 1928–1937 (2014).
- [10] 川崎慈英, 小林 真, 木崎一廣, 猿渡俊介, 渡辺 尚: 複数アクセスポイントを用いた位相制御協調電力伝送の基礎検討, 第 80 回全国大会講演論文集, Vol. 2018, No. 1, pp. 235–236 (2018).
- [11] Kellogg, B., Talla, V., Gollakota, S. and Smith, J. R.: Passive Wi-Fi: Bringing Low Power to Wi-Fi Transmissions, *Proceedings of 13th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation (USENIX NSDI'16)*, Vol. 16, pp. 151–164 (2016).
- [12] Huynh, N. V., Hoang, D. T., Lu, X., Niyato, D., Wang, P. and Kim, D. I.: Ambient Backscatter Communications: A Contemporary Survey, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol. 20, No. 4, pp. 2889–2922 (2018).
- [13] Higashino, T., Uchiyama, A., Saruwatari, S., Yamaguchi, H. and Watanabe, T.: Context Recognition of Humans and Objects by Distributed Zero-Energy IoT Devices, *Proceedings of The 39th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems (IEEE ICDCS'19)*, pp. 1–7 (2019).
- [14] Kellogg, B., Parks, A., Gollakota, S., Smith, J. R. and Wetherall, D.: Wi-fi Backscatter: Internet Connectivity for RF-powered Devices, *Proceedings of the 2014 ACM conference on SIGCOMM (ACM SIGCOMM'14)*, pp. 607–618 (2014).
- [15] Kellogg, B., Talla, V. and Gollakota, S.: Bringing Gesture Recognition to All Devices, *Proceedings of 11th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation (USENIX NSDI'14)*, pp. 303–316 (2014).
- [16] Chabalko, M. J., Shahmohammadi, M. and P., S. A.: Quasistatic Cavity Resonance for Ubiquitous Wireless Power Transfer, *PLoS one*, Vol. 12, No. 2 (2017).
- [17] Chabalko, M. J., Shahmohammadi, M. and P., S. A.: Impedance matching method for any-hop straight wireless power transmission using magnetic resonance, *Proceedings of the IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS'13)*, pp. 193–195 (2013).
- [18] 庄木裕樹: ワイヤレス電力伝送 (WPT) 技術の実用化に向けた動向と今後取り組み～制度化、国際協調、標準化の動向と普及に向けた活動～, <http://www.tokugikon.jp/gikonshi/279/279tokusyu2.pdf>.
- [19] Iyer, V., Bayati, E., Nandakumar, R., Majumdar, A. and Gollakota, S.: Charging a Smartphone Across a Room Using Lasers, *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, Vol. 1, No. 4, pp. 143–163 (2018).
- [20] Engels, S., Schneider, N.-L., Lefeldt, N., Maira Hein, C., Zapka, M., Michalik, A., Elbers, D., Kittel, A., Hore, P. and Mouritsen, H.: Anthropogenic electromagnetic noise disrupts magnetic compass orientation in a migratory bird, *Nature*, Vol. 509, No. 7500, pp. 353–356 (2014).
- [21] P Gandhi, O., L Lloyd, M., Salles, A. A. d., Han, Y.-Y., B Herberman, R. and Lee Davis, D.: Exposure Limits: The underestimation of absorbed cell phone radiation, especially in children, *Electromagnetic Biology and Medicine*, Vol. 31, No. 1, pp. 34–51 (2012).
- [22] Nittby, H., Widegren, B., Krogh, M., Grafström, G., Berlin, H., Rehn, G., L Eberhardt, J., Malmgren, L., RR Persson, B. and G Salford, L.: Exposure to radiation from global system for mobile communications at 1,800 MHz significantly changes gene expression in rat hippocampus and cortex, *The Environmentalist*, Vol. 28, No. 4, pp. 458–465 (2008).
- [23] Fan, X., Han, D., Li, S., Sanzari, M., Trappe, W., Zhang, Y., Han, Z. and Howard, R.: Energy-ball: Wireless Power Transfer for Batteryless Internet of Things through Distributed Beamforming, *Proceeding of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, Vol. 2, No. 2, p. 65 (2018).
- [24] オムロン: RFID システム概要, <https://www.fa.omron.co.jp/guide/technicalguide/47/219/index.html>.
- [25] R. Smith, J., P. Sample, A., S. Powledge, P., Roy, S. and Mamishev, A.: A Wirelessly-Powered Platform for Sensing and Computation, *UbiComp 2006: Ubiquitous Computing*, pp. 495–506 (2006).
- [26] Kellogg, B., Parks, A., Shyamnath, G., Smith, J. R. and Wetherall, D.: Wi-Fi Backscatter: Internet Connectivity for RF-Powered Devices, *Proceedings of the Annual Conference of the ACM Special Interest Group on Data Communication (SIGCOMM'14)*, pp. 607–618 (2014).
- [27] McSpadden, J. O. and Mankins, J. C.: Space Solar Power Programs and Microwave Wireless Power Transmission Technology, *IEEE microwave wireless magazine*, Vol. 3, No. 4, pp. 46–57 (2002).
- [28] Sasaki, S., Tanaka, K. and Maki, K.-i.: Microwave Power Transmission Technologies for Solar Power Satellites, *Proceedings of the IEEE*, pp. 1438–1447 (2013).
- [29] Nishimoto, H., Kawahara, Y. and Asami, T.: Prototype Implementation of Ambient RF Energy Harvesting Wireless Sensor Networks, *Proceedings of the IEEE Sensors*, pp. 1282–1287 (2010).
- [30] Kawahara, Y., Bian, X., Shigeta, R., Vyas, R., Tentzeris, M. M. and Asami, T.: Power Harvesting from Microwave Oven Electromagnetic Leakage, *Proceedings of the 15th International Conference on Ubiquitous Computing (UbiComp'13)*, pp. 373–382 (2013).