

供給電力の公平性を考慮した 複数デバイス同時電波電力伝送手法の検討

大平 峻平¹ 林 健太郎¹ 田中 勇氣² 藤橋 卓也¹ 猿渡 俊介¹ 渡辺 尚¹

概要：

あらゆるモノをネットワークに接続するワイヤレスセンサネットワークに適した電力供給手段として、電波を用いた無線電力伝送が注目を集めている。これまでに我々は、複数の送電アンテナを広く分散配置し、各送電アンテナが放射する電波に適切な位相制御を与えることで、給電対象の位置に強め合う干渉を意図的に作り出し、電力供給を効率化する分散協調型の電波電力伝送の開発に取り組んできた。給電対象である IoT デバイスが複数ある場合は、各 IoT デバイスへの電力供給を公平にするために各送電アンテナに施す位相制御量の組み合わせ（位相セット）を時分割で切り替える必要がある。本稿では、分散協調型の電波電力伝送において、各 IoT デバイスの消費電力が大きく異なる場合にも、各 IoT デバイスの消費電力を十分に満たすだけの電力を公平に供給するための新たな位相セット時間割り当て手法を提案する。提案手法は、各 IoT デバイスの消費電力に応じて割り当て時間を決定する問題を線形計画問題として定式化し、数値最適化ソルバを用いて解を求める点が特徴である。計算機シミュレーションによる評価から、既存の時間割り当て手法と比較して、各 IoT デバイスの消費電力を考慮した電力供給の公平性を向上できることを確認した。

1. はじめに

あらゆるモノをネットワークに接続するワイヤレスセンサネットワーク技術は、IoT (Internet of Things) には欠かせない技術である。既に私たちの身の回りのあらゆるモノにはセンサが具備されており、複数の IoT デバイスで構成されたワイヤレスセンサネットワーク技術によって多数のデータが収集されている。総務省が発表した令和 3 年度版の情報通信白書によると、世界の IoT デバイスの数は年々増加しており、2023 年には 340 億台を越えることが見込まれている [1]。

今後さらなる普及が予測されるワイヤレスセンサネットワーク技術は、多数の IoT デバイスに対する電力供給の課題を抱えている。現在駆動している多くの IoT デバイスは電池により駆動するものが一般的であるが、1 次電池を用いた場合、定期的な電池交換が必要でありメンテナンスコストが大きい点が問題となる。太陽光や風力のエネルギーを利用する環境発電も、悪天候のときや夜間に発電できず、電力の安定供給が見込めないという課題がある。

本稿では、ワイヤレスセンサネットワークに適した電力供給手段として、電波を用いた無線電力伝送に着目す

る。電波による無線電力伝送は、送信部から放射される電波をレクテナ (Rectenna : Rectifying Antenna) を用いて直流電力に変換する技術である。特徴として、数 m 程度までの長距離に電力伝送が可能である点と、電力伝送に変調波を用いることでデータ通信が同時に可能である点が挙げられる [2-5]。無線通信と給電を同時に行う技術は Simultaneous Wireless Information and Power Transfer (SWIPT) と呼ばれ、今後の IoT 時代を支える重要な技術になると考えている。

一方で電波電力伝送では、電波の空間伝搬損失に起因する伝送効率の問題を克服する必要がある。自由空間では電波の強度は距離の 2 乗に反比例して減衰することから、1 台の送電アンテナでは限られた範囲にしか十分な電力を供給できない。広範囲に十分な電力を供給するためには送信電力を大きくする必要があるが、1 台のアンテナが放射できる電波の強度は、電波法によって制限される [6]。また、過度な電波が生体や他のデバイスに悪影響を与える可能性も指摘されている [7]。

1 台の送電アンテナから放出する電力を低減しつつ、より大きな電力を各 IoT デバイスに供給する電波電力伝送手法として、分散協調型の電波電力伝送が存在する。分散協調型の電波電力伝送では、複数の送電アンテナを分散配置するとともに、各アンテナに適切な位相制御を行うことで、

¹ 大阪大学大学院情報科学研究科

² 株式会社パナソニックシステムネットワークス開発研究所

デバイスの位置に強め合う干渉を作り出す。文献 [8–13] は、デバイスによる受信電力フィードバックをもとに、デバイスに最大の電力を供給できる最適な位相を求める電力伝送手法を提案している。しかしながらこれらの手法では、1台のデバイスに対する電波電力伝送しか検討されていない。

複数の IoT デバイスに対する電力伝送手法として、文献 [14] は位相制御協調電力伝送 (PC-CPT: Phase-Controlled Cooperative Power Transfer) を提案した。PC-CPT では、上記の単一の IoT デバイスへの電波電力伝送手法を用いて、各 IoT デバイスに対する最適な位相セットをそれぞれ独立に算出する。次に、得られた各最適位相を時分割で切り替えながら電力伝送を行うことで、各 IoT デバイスの電力需要を満たす。このとき、各 IoT デバイスへの供給電力の情報をもとにヒューリスティックな時間割り当てを行うことで、各デバイスに均等に電力を割り当てる点が特徴である。しかしながら、本手法は電力を均等に割り当てることを目的としているため、例えば消費電力が大きく異なる IoT デバイスが混在しているような場合にも、それぞれに均等な電力を供給してしまう。したがって、供給電力が不足する IoT デバイスや、逆に過剰であったりする IoT デバイスが発生する可能性がある。

このような背景から、本稿では PC-CPT を各 IoT デバイスの消費電力を考慮するように拡張する。提案手法では、各 IoT デバイスの消費電力に応じて割り当て時間を決定する問題を線形計画問題として定式化する。定式化した線形計画問題を数値最適化ソルバを用いて解き、得られた解をもとに割り当て時間を決定する。

本論文の構成は、以下の通りである。2 節では、分散協調型の電波電力伝送のシステムと課題について述べる。3 節では、提案手法について述べる。4 節では、提案手法の性能を計算機シミュレーションによって評価する。5 節では、本稿の関連研究について述べる。最後に、6 節でまとめとする。

2. 分散協調型の電波電力伝送のシステムと課題

2.1 システムモデル

図 1 に、本稿で想定する分散協調型電波電力伝送システムを示す。本システムでは、複数の送電アンテナが複数の IoT デバイスに対して電波を用いた無線電力伝送を行う。それぞれの送電アンテナはコントローラに接続されており、局部発振器を共有することで同一周波数の電波を放射する。コントローラは、位相制御器を用いて各送電アンテナが放射する電波の位相を独立に制御する。すべての送電アンテナの位相の組み合わせ $\Theta = \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m$ を位相セットと呼ぶ。 m は送電アンテナの数である。各 IoT デバイスは、受信電力を観測し、別周波数の信号を用いてコン

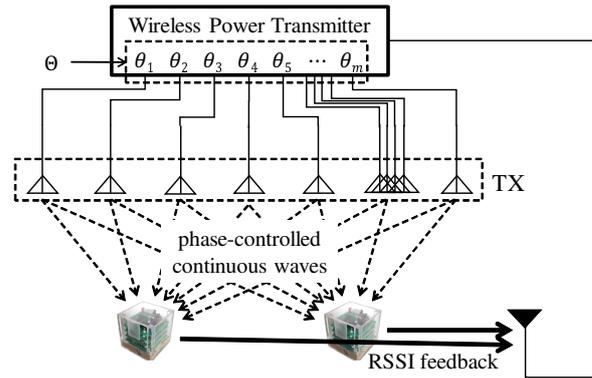


図 1: 分散協調型の電波電力伝送システム

トローラにフィードバックすることができる。コントローラは、IoT デバイスからの受信電力フィードバックを元に、電力伝送に用いる位相セットを決定する。

2.2 問題設定

すべての IoT デバイスの消費電力を満たす最適な電力伝送の位相セットと電力伝送時間は、以下の組み合わせ最適化問題を解くことで得られる。ただし、 n は IoT デバイス数、 m は送電アンテナ数、 p は位相セット数、 \mathcal{S} は IoT デバイスの集合、 Θ_i は i 番目の位相セットで、各送電アンテナについての位相制御量の集合を $\Theta_i = \{\theta_{i1}, \theta_{i2}, \dots, \theta_{im}\}$ と表す。 T_i は位相セット Θ_i で電力伝送を行う時間、 E_j は IoT デバイス j がすべての位相セットを適用後に最終的に得た供給電力量、 $W_{ij} = \text{energy}(\Theta_i, j)$ は位相セット Θ_i において IoT デバイス j が得られる時間当たりの供給電力量、 C_j は IoT デバイス j の単位時間当たりの消費電力量である。

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

$$\text{subject to} \quad E_j = \sum_{i=1}^p W_{ij} T_i, \quad \forall j \in \mathcal{S} \quad (2)$$

$$W_{ij} = \text{energy}(\Theta_i, j) \quad (3)$$

$$E_j > C_j \sum_{i=1}^p T_i \quad \forall j \in \mathcal{S} \quad (4)$$

式 1 は式 2、式 3、式 4 を満たして、電力伝送時間が最小となるものを最も効率の良い電力伝送とすることを表している。式 2 は IoT デバイス j が位相セット Θ_i で供給される電力量の合計を表していて、IoT デバイス j について供給される電力と伝送時間の積の総和で決定される。式 3 は各位相セットにおける時間当たりの供給電力量を表している。式 4 は各 IoT デバイスの供給電力量が消費電力量よりも大きくなければならないことを表している。 p は任意の自然数で上限がないため、上記の組み合わせ最適化問題を総当たりで解くのは困難である。また、 p に一定の上限を

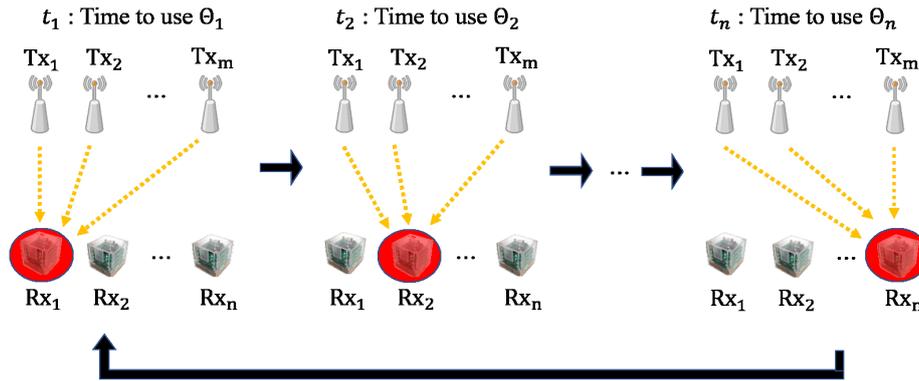


図 2: PC-CPT

与えたとしても、位相制御器の解像度 r においてすべての組み合わせを全探索した場合、計算量は $O(pnr^m)$ となる。

2.3 PC-CPT

2.2 節の問題をヒューリスティックに解く方法として、位相制御協調電力伝送 (PC-CPT: Phase-Controlled Cooperative Power Transfer) [14] が存在する。図 2 に、PC-CPT の略図を示す。PC-CPT では、図 2 に示すように、IoT デバイスごとに集中電力伝送を行う位相セットを独立に求めたあと、使用する位相セットを時分割する。IoT デバイス i における最適位相セットは、次の方法によって計算量を減らして決定する。

1. 送電アンテナ $1 \dots i$ は決定された位相セットで電力伝送する
2. 送電アンテナ $i + 1$ は位相制御量を変化させつつ IoT デバイスで測定した RSSI を用いて受信電力が最大となる位相セットを全探索で決定する
3. i の値を 1 から m まで 1 ずつ増やしながらか、1, 2 を繰り返して実行する

このとき、基準となる送電アンテナ 1 の初期位相制御量は任意である。各 IoT デバイスについてそれぞれ位相セットを求めて、 n 個の位相セットを決定する。位相制御器の解像度を r とすると、 n 台の IoT デバイスに対して m 台の送電アンテナで位相セットを求める計算量は $O(nrm)$ となる。次に、各位相セットに割り当てる時間を決める。PC-CPT では、各位相セットの電力伝送時間 T_j は、計算時間を削減するために、位相セット Θ_j において IoT デバイス j が得られる時間当たりの供給電力量 W_{jj} のみを考慮して決定する。具体的には以下の式で T_j を求める。

$$T_j = \frac{\sum_{j=1}^n W_{jj}}{W_{jj}}, \quad \forall j \in \mathbb{S} \quad (5)$$

各位相セットの電力伝送時間を IoT デバイスが得られる電力の逆数比で計算することで、すべての IoT デバイスに対して均等に電力伝送を行うことができる。しかしながら PC-CPT では、IoT デバイスごとに消費電力が大きく異なる

場合にも、それぞれに均等に電力を供給してしまう。したがって、供給電力が不足する IoT デバイスや、逆に過剰であったりする IoT デバイスが発生する可能性がある。

3. 提案手法: 線形計画問題による時間割り当ての最適化

3.1 概要

本節では、すべての IoT デバイスの消費電力を満たすだけの電力を公平に供給するための新たな手法を提案する。まず、PC-CPT と同様の手法を用いて IoT デバイスごとに集中電力伝送を行うための位相セットを推定する。ただし、位相セットの推定には 2.3 節に記した従来の PC-CPT と同様の手法を用いる。次に、すべての IoT デバイスにおいて供給電力が消費電力を超えるように各位相セットに割り当てる時間を求める問題を線形計画問題として定式化し、数理最適化ソルバを用いて解く。

3.2 時間割り当ての最適化

IoT デバイスの消費電力が既知である場合

はじめに、給電対象となる IoT デバイスの消費電力が既知である場合を想定する。消費電力が既知である場合としては、工場内や機器内ネットワークなど、給電対象があらかじめ決まっているような環境を想定している。

提案手法では、すべての IoT デバイスの消費電力を満たすだけの電力を公平に供給するために、各 IoT デバイスのための最適位相セットを使用する時間を適切に割り当てる問題を以下の線形計画問題として定式化する。

$$\text{maximize} \quad r \quad (6)$$

$$\text{subject to} \quad \sum_{i=1}^n T_i = 1 \quad (7)$$

$$T_i \geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

$$E_j = \sum_{i=1}^n W_{ij} T_i \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

$$\frac{E_j}{C_j} \geq r \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

ここで、 n は IoT デバイス数、 T_i は位相セット θ_i で電力伝送を行う時間、 W_{ij} は位相セット θ_i で電力伝送を行うときに IoT デバイス j が得られる単位時間当たりの供給電力量、 E_j は IoT デバイス j が得られる単位時間当たりの供給電力量、 C_j は IoT デバイス j の単位時間当たりの消費電力量、 r は各 IoT デバイスの消費電力量に対する供給電力量の割合の最小値である。また、位相セットは集中電力伝送の対象である IoT デバイスの数と同じ n セット求めているとする。式 6 は、式 7、式 8、式 9、式 10 を満たして、各 IoT デバイスの消費電力量に対する供給電力量の割合の最小値を最大化することを表している。式 7 は各位相セットにおける電力伝送時間の和が 1 であることを表している。式 8 は位相セット θ_i における電力伝送時間が 0 以上であることを表している。式 9 は IoT デバイス j が得られる単位時間当たりの供給電力量 E_j が W_{ij} と T_i の積で求められることを表している。式 10 は全 IoT デバイスの消費電力量に対する供給電力量の割合の最小値が r であることを表している。

IoT デバイスの消費電力が未知である場合

オフィスなど常に IoT デバイスが入り出すような環境では各デバイスの消費電力を常に把握することが難しい。したがって、式 10 を定義することができない。そこで、各 IoT デバイスに対する供給電力を平等かつ最大化することを目的として定式化する。より具体的には、各位相セットを使用する時間を適切に割り当てる問題を以下の数理最適化問題として定式化する。

$$\text{maximize} \quad r \quad (11)$$

$$\text{subject to} \quad \sum_{i=1}^n T_i = 1 \quad (12)$$

$$T_i \geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (13)$$

$$E_j = \sum_{i=1}^n W_{ij} T_i \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (14)$$

$$E_j \geq r \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (15)$$

ここで、 r は全 IoT デバイスの供給電力量の最小値である。式 11 は式 12、式 13、式 14、式 15 を満たして、全 IoT デバイスの消費電力量に対する供給電力量の割合を最大化することを表している。また、式 12、式 13、式 14 はそれぞれ

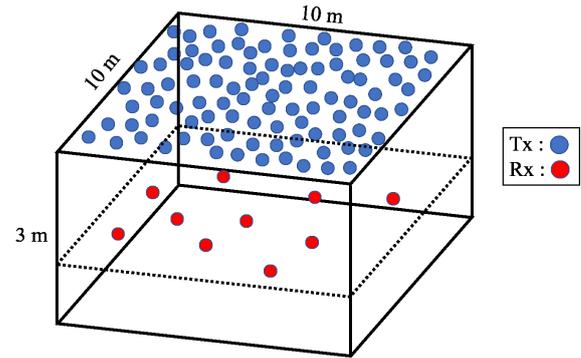


図 3: 評価環境

式 7、式 8、式 9 と同義である。式 15 は全 IoT デバイスの供給電力量の最小値が r であることを表している。各 IoT デバイスの消費電力が既知である場合は、各 IoT デバイスの消費電力に対する供給電力の割合の最小値を最大化することを目的関数としていたのに対し、消費電力が未知の場合は、各 IoT デバイスに対する供給電力の最小値を最大化することを目的関数とする。

3.3 数理最適化ソルバの利用

提案手法では、3.2 節で定式化したの線形計画問題の解を数理最適化ソルバを利用して求める。数理最適化ソルバとしては、Python ライブラリの PuLP などを無料で利用することができる。IoT デバイスの消費電力が既知である場合は、3.2 節の式 6 を目的関数、式 7、式 8、式 9、式 10 を制約条件としてソルバに入力して各位相セットを使用する時間の最適な組み合わせ $T_{\text{opt}} = \{T_1, T_2, \dots, T_n\}$ を出力する。IoT デバイスの消費電力が未知である場合は、3.2 節の式 11 を目的関数、式 12、式 13、式 14、式 15 を制約条件としてソルバに入力して $T_{\text{opt}} = \{T_1, T_2, \dots, T_n\}$ を出力する。

4. 評価

4.1 評価環境

本節では、計算機シミュレーションを用いて提案手法の性能評価を行う。図 3 に、本シミュレーションにおいて想定した環境を示す。送電アンテナの台数は 100 台とし、部屋の天井にランダムに配置した。給電対象である IoT デバイスの台数は 10 台とし、床から高さ 1m の位置にランダムに配置した。各送電アンテナの送信電力を 1 W、送信周波数を 920 MHz とし、電力利得は経路損失のみでモデル化されていると仮定した。信号は直接波のみを考え、反射波や回折波は存在しないものと仮定した。数理最適化ソルバとして、Python ライブラリの PuLP を使用した。試行回数は 1000 回とし、各試行において送電アンテナ未及び IoT デバイスの位置を変更した。

各 IoT デバイスに対する供給電力の公平性を評価するた

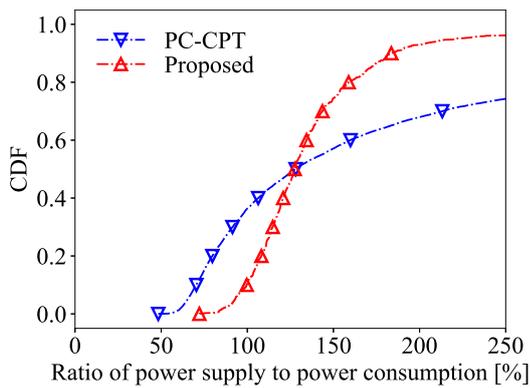


図 4: 消費電力に対する供給電力の割合から得られた累積分布

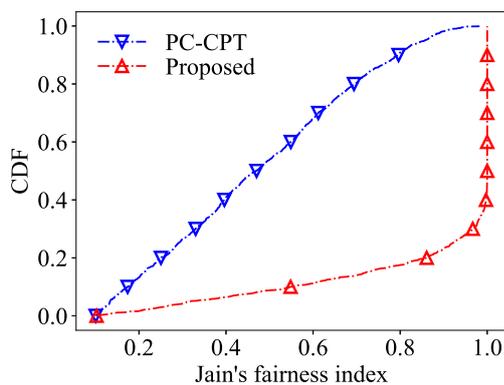


図 5: 消費電力に対する供給電力の割合の Jain's fairness index から得られた累積分布

めの指標として、文献 [15] で提案されている Jain's fairness index を用いた。Jain's fairness index J は、次の式で表される。

$$J(x) = \frac{(\sum_{m=1}^M x_m)^2}{M \sum_{m=1}^M x_m^2} \quad (16)$$

J は 0 から 1 の範囲の実数値をとり、1 に近いほど全体の分布が公平であることを意味する。

評価においては、以下の 2 つを比較手法とした。ただし、どちらの手法においても、時間割り当て手法のみの性能評価を行うために、各 IoT デバイスに対する最適な位相セットはあらかじめ算出されているものとする。

- (1) PC-CPT: 文献 [14] で提案されている方法。位相セット Θ_j を用いたときに受信電力 W_{jj} が大きい場合ほど割り当てる時間を小さくする方法。
- (2) Proposed: 3 節で提案した、位相セットに割り当てる時間を数理最適化により求める方法。

4.2 消費電力が既知である場合

各 IoT デバイスの消費電力が既知である場合の評価として、各試行において IoT デバイスの消費電力を 0 から 50 mW の間で乱数的に変化させた。図 4 は、比較手法が達成する消費電力に対する供給電力の割合から得られた累積

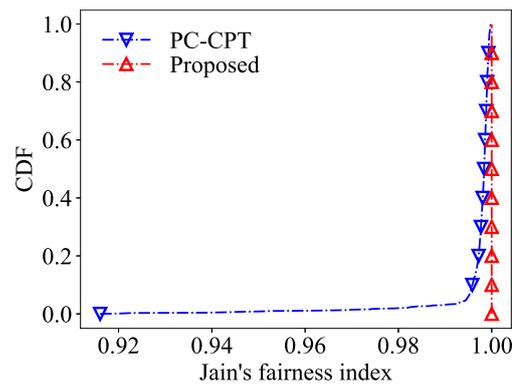


図 6: 供給電力の Jain's fairness index から得られた累積分布

分布を示す。図 4 から、以下の 2 点が確認できる。1 つ目は、proposed が PC-CPT よりも、消費電力以上の電力を供給できている IoT デバイスの割合が大きいことである。消費電力以上の電力が供給できているのは、PC-CPT で約 65%、proposed で約 90% である。2 つ目は、proposed を用いても送電アンテナや IoT デバイスの位置、各 IoT デバイスの消費電力などの環境次第では、物理的要因により供給電力が消費電力を下回ることである。

図 5 に、比較手法が達成する消費電力に対する供給電力の割合の Jain's fairness index から得られた累積分布を示す。具体的には、各試行ごとに 10 台ある IoT デバイスの消費電力に対する供給電力の割合の公平性を式 16 に従って算出した累積分布を示す。図 5 から、以下の 2 点が確認できる。1 つ目は、proposed は PC-CPT と比較して公平性が高いことである。proposed は約 63.4% の確率で Jain's fairness index 0.95 以上を達成できている。2 つ目は、PC-CPT では位相セットの時間割り当てに各 IoT デバイスの消費電力が全く考慮されていないため、消費電力に対する供給電力の割合の公平性が低いことである。

4.3 消費電力が未知である場合

図 6 は、比較手法が達成する供給電力の Jain's fairness index の累積分布を示す。具体的には、各試行ごとに 10 台ある IoT デバイスに対する供給電力の Jain's fairness index を式 16 に従って算出した累積分布を示す。図 6 から以下の 2 点が確認できる。1 つ目は、proposed を用いると全ての IoT デバイスに平等に電力を供給できることである。2 つ目は、PC-CPT が単純な計算によって位相セットの割り当て時間を求めているのにもかかわらず、中央値で約 0.998、平均値で約 0.997 という高い精度を達成していることである。

5. 関連研究

本節では PC-CPT を前提として、IoT デバイスごとに集中電力伝送を行うための最適な位相セットを推定する方法

について紹介する。

1つ目は、2,3節でも述べた送電アンテナの最適な位相を1台ずつ貪欲法によって推定する手法である。給電効率や雑音耐性に優れているが、最適な位相セットの算出に必要なフィードバック回数が多いため、位相セットの推定速度は遅いという特徴がある。

2つ目は、貪欲法と同様に逐次的に位相を変化させ、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手法である [16]。探索を途中で終了する分、貪欲法よりも位相セットの推定速度は速いという特徴がある。

3つ目は、二分探索的に位相セットを推定する手法である [9,10]。1つ目や2つ目の手法では、位相制御器の解像度を r とすると、 n 台のIoTデバイスに対して m 台の送電アンテナで位相セットを求める計算量が $O(nrm)$ であるのに対し、二分探索的に位相セットを推定する手法では計算量を $O(nm \log r)$ にすることができるという特徴がある。

4つ目は、様々な位相のもとで受信電力を測定し、LM(Levenberg-Marquardt)法 [17] を用いて非線形関数への曲線回帰をすることによって、全ての送電アンテナの最適位相を同時に推定する手法である [18]。位相セットの推定速度は速く、雑音耐性と給電効率にも優れているという特徴がある。

5つ目は、1台の送電アンテナの位相を台形にスイープさせ、時間差を利用することによって最適位相を推定する手法である [19]。他の手法ではRSSI情報をIoTデバイスから直接フィードバックするのに対し、本手法ではbackscatterを用いてIoTデバイスに届く電波のRSSI情報を反射することによってフィードバックを行う。連続的なRSSIのフィードバック情報が得られるため、供給電力が最も大きくなる時の位相制御量を算出することができる。

6. おわりに

本稿では、各IoTデバイスの消費電力に応じて公平に電力を供給するためにPC-CPTにおける位相セットの時間割り当て問題を数理最適化問題として定式化し、ソルバを用いて求める手法を提案して、コンピューターシミュレーションから消費電力に対する供給電力の割合とその公平性の観点から評価した。送信アンテナ100本、IoTデバイス10台を想定したシミュレーションの結果、提案手法は、既存手法と比較して消費電力以上の電力を供給することができるIoTデバイスの数を約25%向上させることができた。また、公平性の観点では、約63.4%の確率でJain's fairness index 0.95以上を達成できた。

謝辞

本研究はJSPS科研費(JP19H01101, JP19K11923), JSTさきがけ(JPMJPR2032), パナソニック株式会社の支援の下で行った。

参考文献

- [1] 総務省, “令和3年度版情報通信白書,” <https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/r03/html/nd105220.html>, 2021, (2021/12/13参照).
- [2] H. Kassab, and J. Louveaux, “Simultaneous Wireless Information and Power Transfer using Rectangular Pulse and CP-OFDM,” IEEE International Conference on Communications (IEEE ICC'19), pp.1–6, May 2019.
- [3] D.K.P. Asiedu, S. Mahama, S.W. Jeon, and K. jae Lees, “Joint Optimization of Multiple-Relay Amplify-and-Forward Systems Based on Simultaneous Wireless Information and Power Transfer,” IEEE International Conference on Communications (IEEE ICC'18), pp.1–6, May 2018.
- [4] T.D.P. Perera, D.N.K. Jayakody, K.S. Shree, S. Chatzinotas, and J. Li, “Simultaneous Wireless Information and Power Transfer (SWIPT): Recent Advances and Future Challenges,” IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol.20, no.1, pp.264–302, December 2017.
- [5] L.R. Varshney, “Transporting Information and Energy Simultaneously,” IEEE International Symposium on Information Theory (IEEE ISIT'08), pp.1612–1616, July 2008.
- [6] 総務省, “無線設備規則,” November 1950.
- [7] S. Engels, N.L. Schneider, N. Lefeldt, C. Maira Hein, M. Zapka, A. Michalik, D. Elbers, A. Kittel, P. Hore, and H. Mouritsen, “Anthropogenic electromagnetic noise disrupts magnetic compass orientation in a migratory bird,” Nature, vol.509, no.7500, pp.353–356, 2014.
- [8] S. Shen, J. Kim, C. Song, and B. Clerckx, “Wireless Power Transfer With Distributed Antennas: System Design, Prototype, and Experiments,” IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol.68, no.11, pp.10868–10878, November 2020.
- [9] L. Seunghyun, and Z. Rui, “Distributed Wireless Power Transfer With Energy Feedback,” IEEE Transactions on Signal Processing, vol.65, no.7, pp.1685–1699, December 2017.
- [10] L. Seunghyun, and Z. Rui, “Distributed Energy Beamforming with One-Bit Feedback,” IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (IEEE WCNCW'16), pp.398–403, April 2016.
- [11] C.K. Won, G. Lorenz, R.P. Aditya, A.A. Abdul, and K.D. In, “Wireless-powered Sensor Networks: How to Realize,” IEEE Transactions on Wireless Communications, vol.16, no.1, pp.221–234, October 2016.
- [12] X. Jie, and R. Zhang, “Energy Beamforming with One-bit Feedback,” IEEE Transactions on Signal Processing, vol.62, no.20, pp.5370–5381, October 2016.
- [13] M. Raghuraman, H. Joao, M. Upamanyu, and B. Gwen, “Distributed Transmit Beamforming Using Feedback Control,” IEEE Transactions on Information Theory, vol.56, no.1, pp.411–426, December 2009.
- [14] J. Kawasaki, H. Hamase, K. Kizaki, S. Saruwatari, and T. Watanabe, “Phase-controlled Cooperative Wireless Power Transfer for Backscatter IoT Devices,” IEEE International Conference on Communications (IEEE ICC'20), pp.1–6, February 2020.
- [15] R. K.Jain, D.M. W.Chiu, W. R.Hawe, et al., “A quantitative measure of fairness and discrimination,” Eastern Research Laboratory, Digital Equipment Corporation, Hudson, MA, 1984.
- [16] 濱政光, 川崎慈英, 田中勇氣, 木崎一廣, 猿渡俊介, 渡辺

- 尚, “バッテリーレスセンサネットワークを実現する電波電力伝送手法の検討,” 情報通信学会論文誌, vol.62, no.4, pp.1099–1112, April 2021.
- [17] D.W. Marquardt, “An Algorithm for Least-squares Estimation of Nonlinear Parameters,” Journal of the society for Industrial and Applied Mathematics, vol.11, no.2, pp.431 – 441, June 1963.
- [18] 林健太郎, 濱政光, 田中勇氣, 木崎一廣, 猿渡俊介, 渡辺尚, “分散協調型の電波電力伝送における位相最適化アルゴリズム,” 情報通信学会論文誌, vol.63, no.1, pp.1-10, January 2022.
- [19] 田中勇氣, 金井一輝, 柳場亮祐, 佐藤浩, 池田拓磨, 谷博之, 梶原正一, 小柳芳雄, 篠原真毅, “ボックスキャタリングを用いた分散協調型マイクロ波無線電力伝送システムの GNU Radio による実装,” 情報通信学会論文誌 B, vol.103, no.11, pp.559–570, November 2020.