

電波を用いた位相制御協調電力伝送における位相最適化技術の初期的評価

林 健太郎[†] 濱政 光[‡] 川崎 慈英[‡] 木崎 一廣[‡]
 田中 勇氣^{‡†} 藤橋 卓也[‡] 猿渡 俊介[‡] 渡辺 尚[‡]
[†]大阪大学工学部 [‡]大阪大学大学院情報科学研究科 ^{‡†}パナソニック株式会社

1 はじめに

あらゆるモノがネットワークに接続される世界の実現に向けた課題の1つとして、センサ端末に対する電力供給が挙げられる。筆者らは、多数のアクセスポイントから電波を用いて電力を伝送することを目指している。電波による無線電力伝送の実現に向けて、本稿では、位相制御量最適化手法として Greedy 法、山登り法、中点山登り法を提案する。

2 電波電力伝送の課題

センサ端末に対してネットワーク内の複数アクセスポイントが電波電力伝送をするときの課題として電力伝送範囲の問題、定常波問題、供給電力の公平性問題の3つが挙げられる。

アクセスポイントが1台のとき、電波の距離減衰の影響によって電力伝送範囲の問題が発生する。図1に単一のアクセスポイントを用いた電波電力伝送を示す。電波強度は距離の2乗に反比例するため、1台のアクセスポイントでは電波電力伝送可能な範囲に限られる。

複数のアクセスポイントを用いることで1台のアクセスポイントよりも広範囲に電力を供給できるが、定常波問題が発生する。図2に複数アクセスポイントを用いた電波電力伝送を示す。図2では、2台のアクセスポイントから放射された電波の重ね合わせによって定常波が発生している。強めあう定常波の上にあるセンサ端末Aは十分な電力を得られるが、弱めあう定常波の上にあるセンサ端末Bはほとんど電力を得られない。また、センサ端末間の供給電力の偏りも問題となる。

3 位相制御協調電力伝送

複数アクセスポイントを用いた電波電力伝送で発生する定常波問題と供給電力の公平性問題を解決するために、本研究は位相制御協調電力伝送 [1, 2] を提案する。位相制御協調電力伝送は、各アクセスポイントが放射する電波の位相を個別に制御し、給電対象となる各センサ端末上で強め合う定常波を意図的に作り出す手法である。

図3に位相制御協調電力伝送のシステムモデルを示す。空間内に複数のアクセスポイントと複数のセンサ端末が存在している。各アクセスポイントは、お互いバックホールで同一の位相制御器と電源、ネットワークコントローラに接続され、共通の局部発振器を用いて同じ周波数の電波を放出する。位相制御器を用いて、各アクセスポイントが放射する電波の位相を制御する。センサ端末は、アクセスポイントの電波の重ね合わせによって得られた RSSI 値をアクセスポイントにフィードバックする。ネットワークコントローラは、センサ端末から受信した RSSI フィードバック情報を用いて各アクセスポイントの位相制御量を決定する。

本稿では、各アクセスポイントへの位相制御量の組み合わせを位相セット $\Theta = \{\theta_1, \dots, \theta_m\}$ とする。ここで、アクセスポイントの台数は n 、センサ端末の台数は m とし、アクセスポイント i に対する位相制御量は θ_i とする。位相制御協調電力伝送では、センサ端末から受信する RSSI フィードバックを元に、センサ端末 j に最大の電力を供給する最適位相セット Θ_j を、 $j = 1$ から m まで決定する。各アクセスポイントは、各センサ端末に対する最適位相セット $\Theta_1, \dots, \Theta_m$ を時分割で切り替えながら電力伝送することで、全てのセンサ端末に公平に給電を行う。

3.1 位相最適化

センサ端末 j から受信する RSSI フィードバックを最大とする位相セット Θ_j を見つける最も単純な方法は、すべての位相制御量の組み合わせを探索する方法である。しかしながら、位相制御器の制御階調が p であるとき、全探索から必要な最適位相セットを全て決定するために要する RSSI フィードバック回数は $\mathcal{O}(mp^n)$ となる。すなわち、電波電力伝送を行うアクセスポイントの台数にしたがって、要求される RSSI フィードバック回数は爆発的に増加する。

位相制御協調電力伝送では、以下の手順に沿ってアクセスポイントごとに最適な位相制御量を順次決定することで、より少ない RSSI フィー

ドバック回数でセンサ端末 j に対する最適位相セット Θ_j を決定する。

1. アクセスポイント $1, \dots, i-1$ は、決定済みの位相セット $\Theta_j = \{\theta_1, \dots, \theta_{i-1}\}$ で電力伝送する。なお、 $\theta_1 = 0$ とし、 i の初期値は2とする。
2. 位相制御器はアクセスポイント i に対する位相制御量を変化させつつ、センサ端末 j から受信した RSSI フィードバックを元に、アクセスポイント i に対する最適位相制御量 θ_i を決定する。
3. i の値を2から n まで1ずつ増やしなが、手順1と手順2を繰り返して実行する。

手順2において、センサ端末 j に対するアクセスポイント i の最適位相制御量 θ_i を少ない RSSI フィードバック回数で決定する手法として、本稿では Greedy 法、山登り法、中点山登り法をそれぞれ提案する。

Greedy 法 Greedy 法は、アクセスポイント i について p 段階の位相制御量を全探索して、センサ端末 j から最大の RSSI フィードバックが得られた位相制御量を、アクセスポイント i に対する最適位相制御量 θ_i とするものである。Greedy 法では必要な位相セットを全て決定するために、常に $m(n-1)p$ 回の RSSI フィードバックが必要となる。

山登り法 山登り法は、アクセスポイント i について p 段階の位相制御量を順次探索して、RSSI フィードバックが極大値に達した時点の位相制御量をアクセスポイント i に対する最適位相制御量 θ_i とし、探索を終了するアルゴリズムである。山登り法で必要な位相セットを全て決定するために必要となる RSSI フィードバック回数は、最悪の場合で $m(n-1)p/2$ 回となり、Greedy 法より少ない回数で決定できる。

山登り法では、まずアクセスポイント i に対する初期位相制御量を0に設定して、センサ端末 j から初期値となる RSSI フィードバックを受信する。次に、RSSI フィードバックが早く極大値に達するには、アクセスポイント i の位相を進めるべきか遅くするべきかを決定するために、位相制御器の制御階調にしたがって1段階だけアクセスポイント i の位相を進行・遅延させて、それぞれの位相制御量に対するセンサ端末 j からの RSSI フィードバックを受信する。ネットワークコントローラは RSSI フィードバックの初期値と、位相を進行・遅延させたときの RSSI フィードバックをそれぞれ比較し、RSSI フィードバックが大きくなった方向を位相制御方向として決定する。位相制御器は決定した位相制御方向に、制御階調にしたがって1段階ずつ位相制御量を変化させ続けながら、各位相制御量に対してセンサ端末 j から RSSI フィードバックを逐次受信する。直前の RSSI フィードバックから最新の RSSI フィードバックが減少に転じたところ、すなわち RSSI フィードバックが極大値に達したときの位相制御量を θ_i として決定する。

中点山登り法 中点山登り法は、アクセスポイント i に対する p 段階の位相制御量を二分探索して、RSSI フィードバックが極大値に達した位相制御量をアクセスポイント i に対する最適位相制御量 θ_i とするものである。すべての最適位相セットを決定するために必要となる RSSI フィードバック回数は $m(n-1)\log_2 p$ まで小さくなる。

中点山登り法では、以下の手順にしたがい、RSSI フィードバック関数の極大点を最適位相制御量とする。なお、関数 $y = \mathcal{F}(\theta_i)$ はアクセスポイント i に対する位相制御量 θ_i を入力としてセンサ端末 j から受信する RSSI フィードバックを出力とする。

1. 初期位相制御量として $\theta_{\text{left}} = 0$ 、 $\theta_{\text{right}} = 2\pi(p-1)/p$ を設定する。また、位相制御量の間中値を θ_{middle} とする。

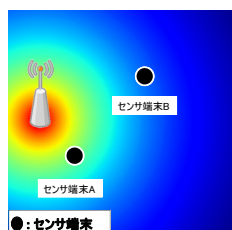


図1: 単一アクセスポイントによる電波電力伝送

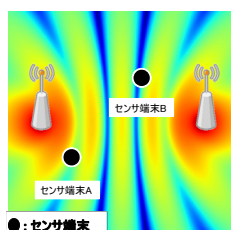


図2: 複数アクセスポイントによる電波電力伝送

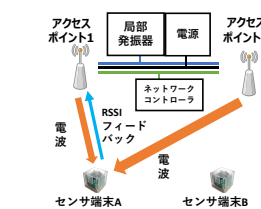


図3: 位相制御協調電力伝送のシステムモデル

2. 各位相制御量に対して RSSI フィードバック $y_{\text{left}} = \mathcal{F}(\theta_{\text{left}})$ と $y_{\text{right}} = \mathcal{F}(\theta_{\text{right}})$ を比較する。
3. $y_{\text{left}} > y_{\text{right}}$ ならば θ_{right} を θ_{middle} に代入する。一方で、 $y_{\text{left}} < y_{\text{right}}$ ならば θ_{left} を θ_{middle} に代入する。
4. 手順 2, 3 を繰り返して、 θ_{right} と θ_{left} の差が位相制御階調 1 つ分 ($= 2\pi/p$) になったとき、位相制御量 θ_{left} をアクセスポイント i の最適位相制御量 θ_i とする。

3.2 電力伝送時間最適化

各センサ端末に対する位相セットを決定したあと、各位相セットを用いて電力伝送する時間を決定する。より具体的には、位相セット Θ_j を用いて電波電力伝送する時間 T_j を、位相セット Θ_j によるセンサ端末 j に対する供給電力のみから以下のように決定する。

$$T_j = \frac{\sum_{k=1}^m \text{Energy}(\Theta_k, k)}{\text{Energy}(\Theta_j, j)}, \quad \forall j \in \mathcal{S}. \quad (1)$$

ここで、 T_j は位相セット Θ_j を用いて電力伝送する時間比、 $\text{Energy}(\Theta_j, j)$ は位相セット Θ_j によってセンサ端末 j が得られる単位時間あたりの電力、 \mathcal{S} はセンサ端末の集合である。各位相セットによる電波電力伝送時間を各センサ端末が得られる電力の逆数比にすることで、すべてのセンサ端末に対して公平に電力を供給できる。

4 性能評価

位相制御協調電力伝送における各位相最適化手法がもたらす効果を検証するため、計算機シミュレーションから性能評価を行った。比較対象として、Greedy 法、山登り法、中点山登り法の 3 手法に加え、供給電力の参考として全てのアクセスポイントに対して位相制御最適化を用いない手法を用意した。

本評価では、アクセスポイントを 8 台、センサ端末を 1 台とした。センサ端末における RSSI は、アクセスポイント i に対する位相制御量が θ_i であるとき、以下の式でモデル化できる。なお、本シミュレーションでは電波伝搬モデルとして自由空間モデルを想定する。また、位相制御階調 p は 64 とする。

$$y_{\text{RSSI}} = \left| \sum_{i=1}^n A_i e^{j(\phi_i + \theta_i)} \right| \quad (2)$$

ここで、 A_i はセンサ端末上でのアクセスポイント i から放射された電波の振幅、 ϕ_i が位相制御を行わない場合における位相である。

本シミュレーションでは、センサ端末が各アクセスポイントにフィードバックする RSSI に、雑音が生じる場合を考えた。雑音の大きさは、信号対雑音比 (SNR: Signal Noise-to-Ratio) で定めるものとした。SNR の大きさは、0~30 dB、雑音が生じない場合 ($= \infty$) の 31 パターンとした。より具体的には、RSSI フィードバックに対する SNR を x dB とした場合、センサ端末がフィードバックする RSSI に対して、次式のように雑音が加わった RSSI フィードバックを、各アクセスポイントが受信するものとした。

$$y_{\text{Noised_RSSI}} = y_{\text{RSSI}} \cdot (1 + n) \quad (3)$$

ここで雑音 n は平均 0、分散 $10^{-x/10}$ の正規分布、すなわち、 $n \sim \mathcal{N}(0, 10^{-x/10})$ にしたがうものとする。各位相最適化手法の雑音耐性を検証するため、センサ端末上での振幅 A_i 、位相 ϕ_i を変えながら、各 SNR 値に対して 1000 回ずつ位相最適化を行った。ここで、振幅 A_i および位相 ϕ_i を変えることは、アクセスポイントの位置およびセンサ端末の位置を変えることを意味する。

図 4 に、RSSI フィードバックに雑音が含まれない場合において、各比較手法が位相制御最適化に要する RSSI フィードバック回数と供給電力量を示す。横軸はセンサ端末からのフィードバック回数、縦軸は対応するフィードバック回数時点の最適位相セットを用いて供給できる電力と、全アクセスポイントに対する最適な位相制御量のもとで供給できる最大の供給電力量との平均比率である。まず位相最適化を行わない場合、平均比率は約 0.31 となった。一方で位相最適化手法を利用した場合、RSSI フィードバック回数の増加とともに平均比率が増加していくこと、やがて約 1.0 を達成できることがわかる。より具体的には、RSSI フィードバックに雑音が含まれない場合、全アクセスポイントに対する

位相制御最適化に要した RSSI フィードバックの平均回数は Greedy 法が 448 回、山登り法が 129 回、中点山登り法が 56 回となった。

図 5 および図 6 に、RSSI フィードバックに雑音が含まれる場合において、各比較手法を用いて位相制御最適化が進む様子を示す。図 5 における SNR は 10 dB、図 6 における SNR は 0 dB とした。

図 5 および図 6 の結果より、2 つのことがわかる。1 つ目は、センサ端末からフィードバックされた RSSI 値に雑音が生じた場合においても、中点山登り法は短いフィードバック回数で高い給電効率を達成していることである。より具体的には、中点山登り法は Greedy 法と比較して約 7.5 倍の速度で位相制御量の最適化を行えることを明らかにした。

2 つ目は、センサ端末からフィードバックされた RSSI 値に雑音が生じた場合、山登り法は給電効率が大きく低下することである。山登り法は RSSI が極大値に達したと判断した時点で最適化を終了するアルゴリズムであるが、雑音がある場合、極大値を誤認し最適化を早期に終了してしまうためと考えられる。具体的には、フィードバックに加わる雑音が RSSI 値を小さくする方向に発生した場合、直前にフィードバックされた RSSI 値を極大値と判断する。あるいは、フィードバックに加わる雑音が RSSI 値を大きくする方向に発生した場合、次の探索で前回の RSSI が極大値であったと判断する可能性がある。

図 7 および図 8 に、RSSI フィードバックに含まれる雑音の大きさが、各位相最適化手法における給電効率にもたらす影響を評価した。図 7 には、センサ端末から 50 回 RSSI フィードバックを受信したとき、図 8 には位相最適化アルゴリズムを終了したときの給電効率を示す。横軸はセンサ端末からの RSSI フィードバックに含まれる雑音の大きさ、縦軸は位相セットを用いて供給できる電力と、全アクセスポイントに対する最適な位相制御量のもとで供給できる電力量との比率の平均である。

評価結果より 2 つのことが分がる。1 つ目は、中点山登り法が RSSI フィードバックに含まれる雑音に対して耐性を持つことである。中点山登り法は、センサ端末から n 回目の RSSI フィードバックを受信すると $2\pi/n$ 離れた 2 つの位相制御量に対応する RSSI フィードバック y_{left} 、 y_{right} 間で比較をして極大点を探索する。 n が小さいときは y_{left} と y_{right} との差が大きくなることが多く、RSSI フィードバックに含まれる雑音の大きさが小さいとき、その影響は差の中に吸収される。 n が大きいときは y_{left} と y_{right} との差が小さくなるが、既に極大点に十分近づいているため、RSSI フィードバックに含まれる雑音が最終的な供給電力量に与える影響は少なくなると考えられる。

2 つ目は、山登り法は他の位相最適化手法と比較して、RSSI フィードバックに含まれる雑音の影響を強く受けることである。中点山登り法は RSSI フィードバックに含まれる雑音の影響が弱くなるにつれて給電効率が向上している一方で、山登り法は SNR が 10 dB まで改善した場合であっても、雑音が 0 dB と同程度の給電効率を維持している。山登り法は、 $2\pi/p$ だけ離れた隣り合う 2 つの位相制御量のもとでの RSSI フィードバック値の比較を続けて極大値を探索するが、2 つの RSSI フィードバック値の差が小さいため、小さな雑音に過敏である。山登り法が雑音に強くなるために、アルゴリズムを終了する前に、センサ端末から複数回 RSSI フィードバックを受信して大きな雑音による影響を軽減する方法が考えられるが、必要となる RSSI フィードバック回数は増加する。

5 おわりに

本稿では、位相制御協調電力伝送における位相制御最適化手法として Greedy 法、山登り法、中点山登り法を提案した。現在、実機実装による実証実験の準備を進めている。

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] 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. 情報処理学会全国大会, pp. 1-2, 2018.
- [2] 林健太郎, 濱政光, 川崎慈英, 木崎一廣, 藤橋卓也, 猿渡俊介, 渡辺尚. 室内環境における複数アクセスポイントを用いた電波による位相制御協調電力伝送の評価. 電子情報通信学会ソサイエティ大会, pp. 1-1, 2019.

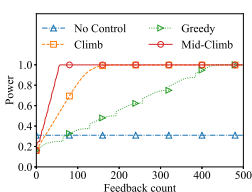


図 4: フィードバック回数に対するセンサ端末への給電効率 (SNR = ∞)

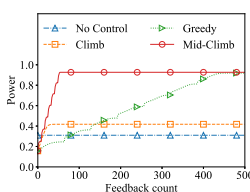


図 5: フィードバック回数に対するセンサ端末への給電効率 (SNR = 10 dB)

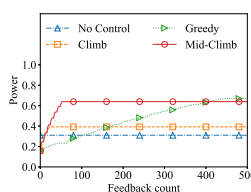


図 6: フィードバック回数に対するセンサ端末への給電効率 (SNR = 0 dB)

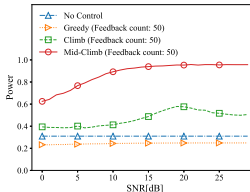


図 7: 雑音の大きさに対するセンサ端末への給電効率 (フィードバック: 50 回目)

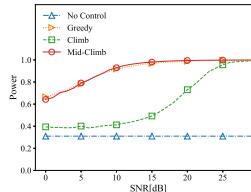


図 8: 雑音の大きさに対するセンサ端末への給電効率 (位相最適化終了後)