

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

川崎 慈英[†] 小林 真^{†‡} 木崎 一廣[†] 猿渡 俊介[†] 渡辺 尚[†]
[†] 大阪大学大学院情報科学研究科 [‡] 日本学術振興会特別研究員 DC

1 はじめに

電波電力伝送は屋内や機器内のセンサ端末への電力供給手法に適した無線電力伝送手法である。距離減衰の影響を受けやすく供給可能電力量が小さいものの、季節や時間に関わらず安定した電力供給が可能であることや、電力供給源としてアクセスポイントの活用が可能であるといった利点がある。本稿ではアクセスポイントが意図的に電波を放出することで、空間内に配置されたセンサ端末へ電力供給を行うことを考える。

電波電力伝送において、単一アクセスポイントを用いた場合はカバレージ問題が発生して、複数アクセスポイントを用いた場合は定在波問題が発生する。図1, 図2にそれぞれ単一アクセスポイント, 複数アクセスポイントを用いた電力伝送の例を示す。単一アクセスポイントを用いた電力伝送では、距離減衰の影響でセンサ端末全体をカバーできない可能性がある。複数アクセスポイントを用いた電力伝送では、複数の電波が干渉を起こして強め合う定在波と弱め合う定在波が生まれる。弱め合う定在波上に設置されたセンサ端末は十分な電力を得ることができない。

定在波問題を解決するために、文献 [1] では CSD (Carrier Shift Diversity) 電力伝送が提案されている。図3に CSD 電力伝送の例を示す。CSD 電力伝送は、各アクセスポイントが放出する電波の位相を異なる速度で変化させ続けることによって、空間内にまんべんなく電力伝送を行う手法である。電波の位相が変化し続けた場合、ある地点で弱め合う干渉と強め合う干渉が交互に起こるため、単位時間あたりのセンサ端末の供給電力量は平均化される。CSD 電力伝送では、弱め合う定在波上にあったセンサ端末の供給電力量は増加するが、強め合う定在波上にあったセンサ端末の供給電力量は減少する。

本稿では、各アクセスポイントの位相制御器を個別に制御してセンサ端末上で強め合う定在波を作ること、電力伝送効率を高める位相制御協調電力伝送を提案する。図4, 図5に位相制御協調電力伝送の例を示す。位相制御協調電力伝送では、各アクセスポイントの位相を制御することで強め合う定在波が発生する場所を変化させる。複数の位相セットを時分割で切り替えることで、全てのセンサ端末に効率的に電力伝送を行うことができる。計算機シミュレーションを用いた評価において、位相制御協調電力伝送が CSD 電力伝送に比べて、センサ端末の送信可能割合を最大 35%、公平性を最大 10%改善することを確認した。

2 システムモデル

図6に本稿で提案する電力伝送のシステムモデルを示す。ネットワーク内には複数のアクセスポイントと複数のセンサ端末が存在する。センサ端末とアクセスポイントの位置は固定である。アクセスポイント同士はバックホールで電源・ネットワークコントローラと相互接続して情報を共有できる。アクセスポイントは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。各アクセスポイントは全二重通信可能な自己干渉除去機能を具備して、電力信号を送信しながらセンサ端末からの信号を受信することが可能である。自己干渉除去機能で用いられる位相制御器を流用して、放出電波の位相をアクセスポイントごとに制御する。本稿では各アクセスポイントの位相制御量の組み合わせパターンを位相セットと呼称する。各アクセスポイントは複数の位相セットを時分割で切り替えて電力伝送を行う。

ネットワーク内のセンサ端末は backscatter モジュール [2], energy harvest モジュール, data decoder モジュールを具備する。センサ端末の構成を図7に示す。backscatter モジュールはアクセスポイントが放出した電波を反射・吸収することでデータ送信を行う。backscatter 通

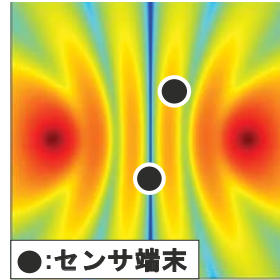


図 4: 位相制御協調電力伝送 $\Theta_1 = \{ \frac{2\pi}{3}, \frac{5\pi}{3} \}$, 時間 T_1

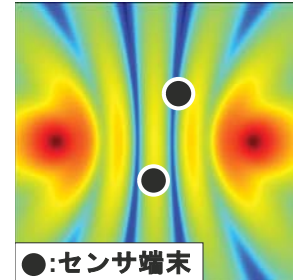


図 5: 位相制御協調電力伝送 $\Theta_2 = \{ 0, 0 \}$, 時間 T_2

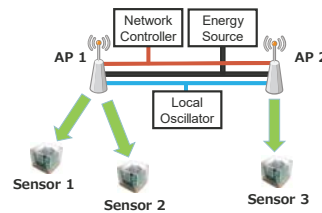


図 6: システムモデル

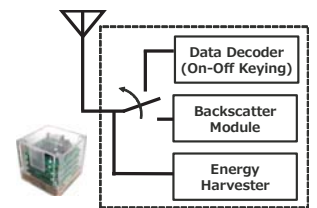


図 7: センサノードの構成

信では搬送波としてアクセスポイントの放出した電波を用いるため、通常の無線通信と比べてほとんど電力を消費しない。energy harvest モジュールはアクセスポイントが放出した電波からレクテナを介して得た電力をキャパシタに蓄電する。data decoder モジュールは、アクセスポイントから送信されたデータを on-off keying を用いてデコードする。センサ端末は RSSI (Received Signal Strength Indication) を測定するモジュールを具備して自身の受信電波強度を評価する。各センサ端末は一定間隔でセンシングを行って得られたセンサデータを backscatter 通信を用いてアクセスポイントに送信する。

提案するシステムでは、各アクセスポイントと各センサ端末はネットワークコントローラによって集中制御される。ネットワークコントローラは各センサ端末の消費電力、現在の位相セットにおける各センサ端末の RSSI を電力伝送の制御に用いる。アクセスポイントは一定間隔で各センサ端末に対して制御フレームをブロードキャストする。センサ端末は制御フレームを用いて時刻同期を行って制御フレームで指定された動作を実行する。各アクセスポイントの位相決定には、センサ端末からの RSSI フィードバックを用いる。制御フレームから RSSI フィードバック命令を受けたセンサ端末は backscatter 通信を用いて RSSI データの高速フィードバックを行う。backscatter 通信を用いることでセンサ端末は電力をほとんど消費せずにフィードバックを行う。

3 提案手法: 位相制御協調電力伝送

2 節におけるシステムモデルにおいて、効率的な電力伝送手法を求めると問題は、位相セット組み合わせ問題と電力伝送時間割り当て問題の 2 つの最適化問題が組み合わさったものとして考えることができる。位相

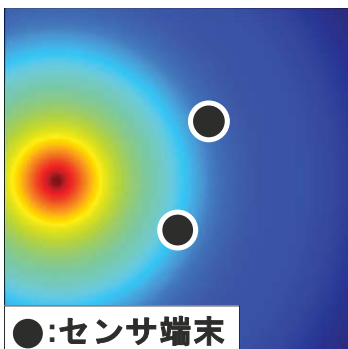


図 1: 単一 AP 電力伝送

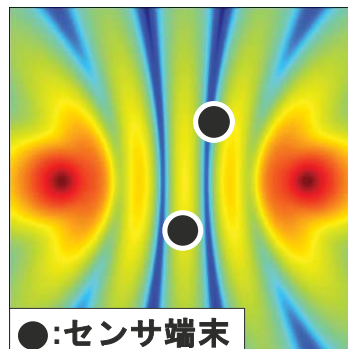


図 2: 複数 AP 電力伝送

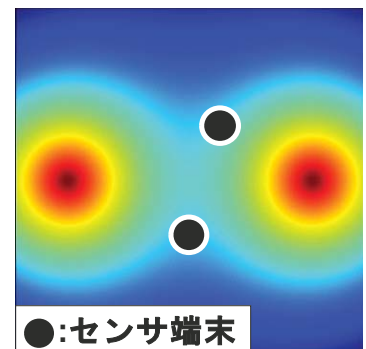


図 3: CSD 電力伝送

セット組み合わせ問題は、センサ端末に対して効率的に電力伝送できる n 組の位相セット $\Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_n$ を求める問題である。位相制御を用いた電力伝送を行う場合、各センサ端末が得られる供給電力の時間平均は、各アクセスポイントの位相の組み合わせで一意に決まる。位相セット i において m 個のアクセスポイントの位相が $\Theta_i = \theta_{i1}, \theta_{i2}, \dots, \theta_{im}$ である時のセンサ端末 j の供給電力量を $E_{ij} = \text{Energy}(\Theta_i)$ で表す。デジタル位相制御器の制御階調を p とすると、 n 個のセンサ端末に対して m 個のアクセスポイントで電力伝送するための k 個の位相セットを求めるために必要な RSSI フィードバック量は $O(knp^m)$ となる。一般的な p の値としては 128 や 256 が用いられるため、全探索で最適な位相セットを求めるのは現実的ではない。

電力伝送時間割り当て問題は複数の位相セットが存在した場合に、各位相セットの最適な電力伝送時間を決定する問題である。電力伝送時間割り当て問題は以下の割り当て問題として記述できる。 T_i は位相セット i で電力伝送を行う時間、 C_j はセンサ端末 j の消費電力である。

minimize

$$\sum_{i=1}^n T_i \quad (1)$$

subject to

$$E_j > C_j, \quad \forall j \quad (2)$$

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

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

式 1 は目的関数である。制約式 2, 3, 4 を満たす電力伝送時間割り当ての中で、合計電力伝送時間が最も小さいものを最も効率の良い電力伝送としている。式 2 は各センサ端末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す制約式である。式 3 は各センサ端末の供給電力量を表す制約式である。各センサ端末の供給電力量は、各位相セットの伝送時間と時間あたりの供給電力量の積で表される。式 4 は各センサ端末の時間あたりの供給電力量を表す制約式である。

位相制御協調電力伝送では、位相セット組み合わせ問題、電力伝送時間割り当て問題の 2 つの最適化問題をヒューリスティックな解を求めることで、計算時間を削減する。具体的には、各センサ端末に対して最適な位相セットを決定した後に、センサ端末の供給電力量を基に電力伝送時間割り当てを行う。

センサ端末 i に対する位相セットを求める方法は以下のようになる。

- (1) アクセスポイント $1 \dots i$ は決定された位相セットで電力伝送する
- (2) アクセスポイント $i+1$ は位相を変化させつつセンサ端末からのフィードバックを用いて最適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 づつ増やしながらか (1), (2) を繰り返し実行する

n 個の各センサ端末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。この時、センサ端末 i は位相セット Θ_i の時に供給電力量が最大となる。デジタル位相制御器の制御階調を p とすると、 n 個のセンサ端末に対して m 個のアクセスポイントで電力伝送する場合の最適な位相セットを求める計算量は $O(npm)$ となる。

電力伝送時間割り当て問題については、位相セット Θ_i の時のセンサ端末 i の供給電力量のみを考慮することで、計算量を削減する。具体的には、各位相セットの電力伝送時間 T_i は以下の式で表される。

$$T_i = \frac{S_i}{\sum_{j=1}^n S_{ij}}, \quad \forall i \quad (5)$$

各位相セットの電力伝送時間をセンサ端末が得られる電力の逆数比にすることで、全てのセンサ端末に対して均衡に電力伝送を行うことができる。

4 評価

計算機シミュレーションを用いて提案手法の評価を行った。センサ端末は 1 秒ごとにセンシングを行ってセンサデータをアクセスポイントに対して送信する。センサ端末に十分な電力がない場合、センサデータはアクセスポイントに送信されずに破棄される。アクセスポイントの数は 5 とし、アクセスポイント同士は有線によって理想的に相互に接続されているものとする。空間内のセンサ端末設置数が各手法の評価にどのような影響を与えるかを評価するために、設置するセンサ端末数が 10 の場合と 100 の場合についてそれぞれ評価を行った。アクセスポイントとセンサ端末の設置位置はランダムとした。各アクセスポイントは 2.4 GHz の電波を同じ出力で放出して、放出された電力は距離の 2 乗に反比例して減衰とした。センサ端末の駆動電力は単位時間あたり 60 J、キャパシタ容量は 312 J とした。キャパシタ容量を超えて供給された電力は無駄になる。

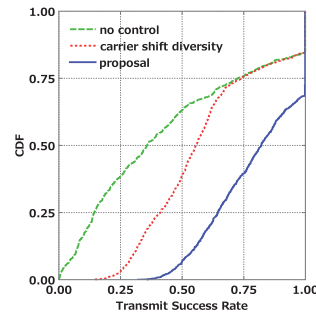


図 8: 端末数 10 の送信可能割合

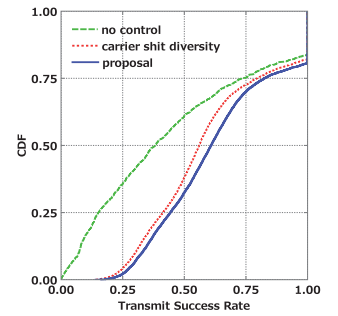


図 9: 端末数 100 の送信可能割合

提案手法を相対的に評価することを目的として、制御なし電力伝送 (no control), CSD 電力伝送 (carrier shift diversity)[1], 位相制御協調電力伝送 (proposal) の 3 つの手法を比較した。シミュレーションにおける評価指標としてセンサ端末の送信可能割合を定めた。送信可能割合とはセンサ端末がセンシングデータ送信する際に実際に送信できた割合である。センサ端末が十分な電力を供給できない場合、電力不足でデータ送信することが出来ないため送信可能割合は小さくなる。

図 8, 図 9 に送信可能割合の累積分布グラフを示す。横軸が送信可能割合、縦軸がセンサ端末の累積割合である。図 8, 図 9 から 3 つのことが分かる。1 つ目は提案手法が比較手法と比べてセンサ端末の送信可能割合を改善していることである。センサ端末の設置数に関わらず、提案手法は比較手法よりも送信可能割合が高い。図 8 において、送信可能割合が 1 であるセンサ端末の割合は、提案手法では全体の約 80%, 制御なし電力伝送, CSD 電力伝送では約 30% である。センサ端末設置数が 10 である場合、送信可能割合の平均は提案手法が約 80%, 制御なし電力伝送が約 44%, CSD 電力伝送が約 59% である。これは位相制御によって電力伝送効率が悪化しているからだと考えられる。

2 つ目は空間内のセンサ端末全体に公平に電力伝送ができていないことである。各手法の公平性を客観的に評価するために、Jain's Fairness Index を用いてセンサ端末の公平度を算出した。以下に Jain's Fairness Index の導出式を示す。ただし、 x_i はセンサ端末 i の送信可能割合、 n はセンサ端末の設置数である。

$$\text{Jain's Fairness Index} = \frac{(\sum_{i=1}^n x_i)^2}{n \sum_{i=1}^n x_i^2}$$

Jain's Fairness Index は、 $\frac{1}{n}$ から 1 の値をとり、1 の時に最も公平性が高くなる。各種法の Jain's Fairness Index は提案手法が 0.95, CSD 電力伝送が 0.86, 制御なし電力伝送は 0.63 となった。提案手法は制御なし電力伝送とくらべて約 50%, CSD 電力伝送と比べて約 10% 公平性を改善している。これは、RSSI を基に各センサ端末の供給電力が均等になるように電力伝送時間を割り当てた効果であると考えられる。

3 つ目は空間内のセンサ端末数の設置数が増えると、提案手法の送信可能割合が CSD 電力伝送に近づくことである。CSD 電力伝送は空間内にまんべんなく電力伝送を行うため、センサ端末設置数が増えても変わらない送信可能割合はほとんど変わらない。一方、提案手法はセンサ端末に対して集中的に電力伝送を行うため、空間内のセンサ端末設置数が増えると各センサ端末に対して集中電力伝送を行う時間が短くなり送信可能割合が低くなる。

5 おわりに

本稿では複数アクセスポイントを用いた電力伝送について、位相制御器を用いてセンサ端末上で強め合う定在波を生み出す位相制御式協調電力伝送を提案した。現在、実環境での検証を進めている。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 (JP16H01718, JP17J02859, JP17KT0042, JP16K16044), NTT アクセスサービスシステム研究所の支援の下で行った。

参考文献

- [1] D. Maehara, G. K. Tran, K. Sakaguchi, K. Araki, and M. Furukawa, "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.
- [2] B. Kellogg, V. Talla, S. Gollakota, and J. R. Smith, "Passive wi-fi: Bringing low power to wi-fi transmissions," in *Proceedings of 16th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation (NSDI'16)*, vol. 16, pp. 151–164, 2016.