

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実装と評価

濱政 光[†] 川崎 慈英[‡] 木崎 一廣[‡] 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

1 はじめに

IoT (Internet of Things) デバイスにおける重要な課題の1つとして、バッテリーがある。バッテリーを利用してIoT デバイスを駆動している限り、いつかは電力が無くなってバッテリーを交換しなければならない。本稿では、IoT デバイスのバッテリー問題を抜本的に解決する手法として電波を用いた無線電力手法である位相制御協調 (CPC: Cooperative Phase Controlled) 電力伝送を提案して実装による評価を行う。

2 電波電力伝送の課題

ネットワーク内のアクセスポイントがセンサノードに対して電波電力伝送を行ったときの課題として1. 電力伝送範囲の問題、2. 定常波問題、3. 供給電力の偏りの問題が存在する。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。フリスの伝達公式から、電波は距離の2乗に反比例して電力を減衰するため、1台のアクセスポイントでは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供給できるが定常波問題が発生する。図1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1では2台のアクセスポイントからの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ノード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ノードBはほとんど電力を得られない。また、センサネットワークにおいては各端末の消費電力に対する供給電力の比は一定であることが望ましく、電力伝送効率の面でもセンサ間の供給電力の偏りは問題となる。

定常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。CSD 電力伝送は、複数のアクセスポイントの位相をそれぞれ異なる一定速度で変化させ続けることで、空間全体に満遍なく電力伝送を行う手法である。図2にCSD 電力伝送を示す。CSD 電力伝送では、各センサ上で弱めあう干渉と強めあう干渉が交互に発生するため、すべてのセンサノードに対して電力を送信することができる。しかしながら、CSD 電力伝送においてもセンサノードの位置による供給電力の偏りの問題が解決できない。アクセスポイントに近いセンサAと比べてアクセスポイントから遠いセンサBの得られる電力は少ない。

3 提案手法: CPC 電力伝送

複数アクセスポイントを用いた無線電力伝送で発生する定常波問題と供給電力の偏りの問題を解決するために、本稿ではCPC 電力伝送を提案する。CPC 電力伝送は、各アクセスポイントの送信電波の位相を制御して各センサノード上で強めあう定常波を意図的に作り出すことで供給電力の偏りの問題を解決する。具体的には、まず、各センサノードに対して集中的に電力伝送できるようなアクセスポイントの位相制御量の組み合わせをセンサノードの数だけ決定する。次に、決定した位相制御量の組み合わせを時分割でスイッチングすることによって、センサノード間の供給電力の偏りを抑制する。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を位相セット Θ と呼ぶ。

図3にCPC 電力伝送のシステムモデルを示す。図3では、空間内には複数のアクセスポイントと複数のセンサノードが存在している。アクセスポイントとセンサノードの位置は固定である。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、共通の周波数の電波を放出する。各アクセスポイントは位相制御器を用いて放出電波の位相を制御する。

センサノード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 (Received Signal Strength Indication) の値をアクセスポイントに送信する。ネットワークコントローラは、センサノードからのRSSIフィードバック情報を用いて位相セットと電力伝送時間を決定して各アクセスポイントを制御する。

すべてのセンサノードの電力需要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 はセンサノード数、 m はアクセスポイント数、 k は位相セット数、 S はセンサノードの集合、 Θ_i は i 番目の位相セットで $\Theta_i = \{\theta_{i1}, \theta_{i2}, \dots, \theta_{im}\}$ 、 T_i は位相セット Θ_i で電力伝送を行う時間、 $W_{ij} = \text{energy}(\Theta_i, j)$ は位相セット Θ_i においてセンサノード j が得られる時間当たりの供給電力量、 C_j はセンサノード j の単位時間当たりの需要電力量、 E_j はセンサノード 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である。

$$\text{minimize} \quad \sum_{i=1}^k T_i \tag{1}$$

$$\text{subject to} \quad E_j = \sum_{i=1}^k W_{ij} T_i, \quad \forall j \in S \tag{2}$$

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

$$E_j > C_j \sum_{i=1}^k T_i \quad \forall j \in S \tag{4}$$

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 n 台のセンサノードが位相セット i で供給される電力量の合計を表している、センサノード 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を表している。式4は各センサノードの供給電力量が消費電力量よりも大きくしなければならないことを表している。 k 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、 k に一定の上限を与えたととしても、すべての組み合わせを全探索した場合、計算量は $O(knp^m)$ となる。

そこでCPC 電力伝送では、各センサノードごとに集中電力伝送を行う位相セットを決定した後で、RSSIに基づいて電力伝送時間を決めることで計算量を削減する。センサノード i における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. 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 $i+1$ は位相制御量を変化させつつセンサノードで測定したRSSI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ずつ増やしながら1, 2を繰り返し実行する

各センサノード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。位相制御器の制御階調を p とすると、 n 台のセンサノードに対して m 台のアクセスポイントでこのような仕組みによって位相セットを求めると計算量は $O(npm)$ となる。

各位相セットの電力伝送時間 T_i は計算時間を削減するために位相セット Θ_i のセンサノード i における供給電力 S_i のみを考慮して決定する。

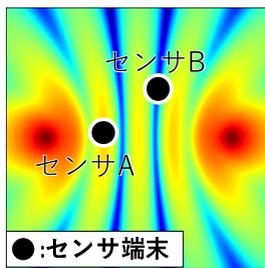


図1: 複数アクセスポイントを用いた電力伝送

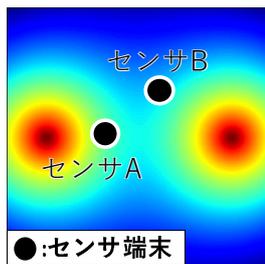


図2: CSD 電力伝送

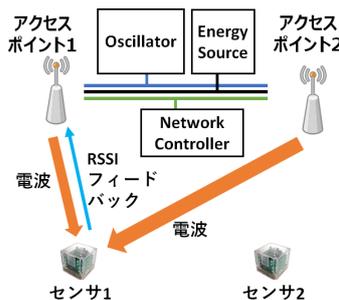


図3: CPC 電力伝送のシステムモデル

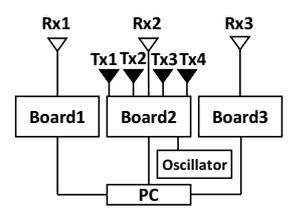


図4: 実装の概要

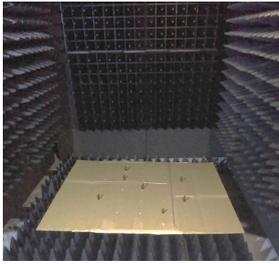


図 5: 実験環境

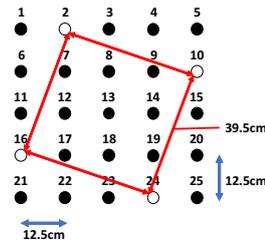


図 6: アンテナ配置図

表 1: LocationA

	Rx1	Rx2	Rx3	T_i
Θ_1	110.9	83.82	6.234	2
Θ_2	73.87	114.1	13.67	2
Θ_3	11.23	69.58	42.32	6
CPC	34.88	62.57	23.43	-
CSD	24.53	53.37	10.17	-

表 2: LocationB

	Rx1	Rx2	Rx3	T_i
Θ_1	92.98	3.354	4.654	2
Θ_2	22.33	117.8	1.086	1
Θ_3	33.13	26.35	21.29	11
CPC	40.52	26.02	14.59	-
CSD	19.50	37.98	4.519	-

具体的には以下の式で T_i を求める。

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

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

4 実装

提案手法の性能を評価するため、実機実装を行ってセンサノードの供給電力を測定した。図 4 に実装の概要を示す。評価では、アクセスポイントとして 4 本の送信アンテナ、センサノードとして 3 本の受信アンテナを用いた。受信アンテナはそれぞれ 3 つの自作のボードに接続されており RSSI を測定した。ボード 2 は 4 本の送信アンテナと 4 つの位相制御器を具備している。各送信アンテナの位相は独立に制御可能である。4 本の送信アンテナは 2.4 GHz の自作の局部発振器を共有している。送信アンテナと受信アンテナとしてどちらも Inventek Systems 社製のモノポールアンテナ (W24-SSMA-M) を用いた。モノポールアンテナのアンテナ利得は 2.15 dBi である。本稿では送信アンテナ i を Tx_i 、受信アンテナ j を Rx_j と記す。

ネットワークコントローラとして 1 台のノート PC を用いる。3 つのボードは PC に接続されており、受信アンテナで測定した RSSI はボードを通して PC に送信される。PC は送信アンテナに対して位相制御量を指定することができる。PC-ボード間は USB ケーブル、ボード-送信アンテナ間とボード-受信アンテナ間とは同軸ケーブルで接続されている。図 5 に実験の様子を示す。外来電波を遮断するシールドテント内で RSSI を測定した。シールドテント内の側壁と床には電波吸収体を設置している。

4.1 提案手法「CPC 電力伝送」の実装

CPC 電力伝送として各受信アンテナに対して位相セットを決めて時分割で電力伝送を行うシステムを実装した。実装したシステムは位相セット・伝送時間決定フェーズと電力伝送フェーズの 2 つのフェーズから成り立つ。位相セット・伝送時間決定フェーズでは各送信アンテナの位相を逐次的に変化させつつ、受信アンテナからの RSSI フィードバックを用いて位相セットと伝送時間を決定する。決定方法は 3 節で述べた通りである。

電力伝送フェーズでは、位相セット・伝送時間決定フェーズで決定した位相セットと伝送時間を用いて電力伝送を行いながら各受信アンテナごとの供給電力を計算する。供給電力の計算は以下の手順で行われる。

1. 各受信アンテナの合計供給電力量を 0 に設定する
2. 送信アンテナは位相セット Θ_i で T_i の間、電力伝送を行う
3. 送信アンテナが電力伝送を行っている間、受信アンテナは RSSI を 0.5 秒ごとに取得する。取得した RSSI を電力に換算して、合計供給電力量に足し合わせる
4. 送信アンテナは Θ_i で電力伝送を終えた後、 Θ_{i+1} の位相セットに切り替えて再び 2. から 4. を実行する
5. すべての位相セットで電力伝送が終了したならば、各受信アンテナの合計供給電力量を合計伝送時間で割って平均供給電力を算出する

本実験において、 T_i は位相セット Θ_i のときの供給電力を足し合わせる回数とした。実際に伝送している時間は $\sum T_i \times 0.5$ 秒である。

4.2 比較手法「CSD 電力伝送」の実装

CSD 電力伝送として送信アンテナの位相制御量を逐次的に変化させつつ電力伝送を行うシステムを実装した。各送信アンテナは自然数 l ステップ ($0 \leq l \leq 255$) で逐次的に位相を変化させて電波を放出する。例えば Tx_1 の位相ステップ l を 32 としたとき、 Tx_1 から放出される無変調波の位相制御量は $0, 32, \dots, 224$ と逐次的に変化する。このとき、位相制御の階調値 p は $\lfloor \frac{256}{32} \rfloor$ である。今回の実験では測定時間の都合上、すべての送信アンテナについて $l = 16$ として $(\frac{256}{16})^4$ 通りの RSSI を測定した。CSD 電力伝送における供給電力は受信アンテナごとの RSSI から電力を計算した結果の平均とした。

5 評価

4 節で実装したシステムを用いて提案手法の評価を行った。アクセスポイント、センサノードの配置パターンとして LocationA と LocationB の 2 種類の配置パターンで実験を行った。図 6 に送受信アンテナの配置図を示す。5 × 5 のグリッド上に 4 本の送信アンテナと 3 本の受信アンテナを配置した。LocationA は Rx1 を 13, Rx2 を 7, Rx3 を 23 の位置に、LocationB は Rx1 を 13, Rx2 を 12, Rx3 を 20 の位置に配置した。図の白丸 (2, 10, 16, 24) はそれぞれ送信アンテナ Tx_1, Tx_2, Tx_3, Tx_4 の配置場所を示している。隣接する送信アンテナ間の距離は約 39.5 cm である。隣接するグリッド間の距離は 12.5 cm である。各送信アンテナは 1 mW の無変調波を 4 つの各送信アンテナに分流する。ボード上の位相制御器およびアンテナスイッチの電力ロスは約 -10 dB のため、各送信アンテナは約 25 μ W の無変調波を放出する。提案手法では各配置パターンで 5 回ずつデータを取得して平均を評価した。CSD 電力伝送では、実験時間の関係上 1 回ずつ測定して評価した。

表 1 と表 2 に各配置パターンでの実験結果を示す。表内の数値は各受信アンテナごとの供給電力で、単位は nW である。表の列は各受信アンテナ Rx1, Rx2, Rx3 および位相セット Θ_i の電力伝送時間 T_i を意味する。表の行は提案手法における各位相セット $\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3$ および、提案手法の平均供給電力 (CPC)、CSD 電力伝送の平均供給電力 (CSD) を意味する。

表 1 と表 2 より、以下の 3 つのことがわかる。1 つ目は、提案手法は CSD 電力伝送で十分に電力を得られない受信アンテナに対して電力を供給できていることである。表 1 において、CSD 電力伝送で最も低かった Rx3 の供給電力は提案手法で 130.5 % 増加している。表 2 においても、CSD 電力伝送で最も低かった Rx3 の供給電力は提案手法で 222.8 % 増加している。これは得られる電力が少ない受信アンテナに多くの電力伝送時間を割り当てたことによる効果だと考えられる。

2 つ目は、アンテナの配置に関わらず CSD 電力伝送よりも提案手法の方が受信アンテナ間の供給電力の偏りが小さいことである。表 1 では、提案手法を用いたときの各受信アンテナの供給電力の分散は 270.0 であるのに対して、CSD 電力伝送では 322.7 で約 16 % 改善している。表 2 では、提案手法を用いたときの各受信アンテナの供給電力の分散は 112.5 であるのに対して、CSD 電力伝送では 187.3 で約 40 % 改善している。これは位相セットの伝送時間を各受信アンテナの最大供給電力の逆数比で求めた効果であると考えられる。

3 つ目は、受信アンテナの配置パターンによって提案手法の性能が変化するという点である。表 1 において、提案手法の供給電力は CSD 電力伝送に比べて Rx1 で 42.2 % 増加、Rx2 で 17.2 % 増加、Rx3 は 130.5 % 増加している。表 2 において、提案手法の供給電力は CSD 電力伝送に比べて Rx1 で 107.7 % 増加、Rx2 は 31.5 % 減少、Rx3 で 222.8 % 増加している。表 1 において、すべての受信アンテナで供給電力が増加した要因としては、Rx1, Rx2 が自身への集中電力伝送以外で十分な電力を得られたこと、Rx3 が十分な大きさの電力を全体の 60 % の時間で伝送されていたからだと考えられる。表 2 において、Rx2 で供給電力が減少した要因としては、 Θ_3 において CSD 電力伝送よりも 30 % 低い電力が全体の 79 % の時間で伝送されていたからだと考えられる。

6 おわりに

本稿では複数アクセスポイントの位相を制御して電波電力伝送を行ったときの供給電力効率の改善とそれぞれのセンサノードにおける供給電力の偏りの改善を実験で検証した。現在、実機によるさらなる評価を進めている。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 (JP16H01718, 18H03231)、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, et al., “Experiments validating the effectiveness of multipoint wireless energy transmission with carrier shift diversity,” IEICE transactions on Communications, vol. 97, no.9, pp.1928-1937, 2014.