

複数アクセスポイントを用いた無線全二重データ電力同時伝送方式における
スケジューリング手法の検討

川崎 慈英[†] 小林 真[‡] 猿渡 俊介[‡] 渡辺 尚[‡]
[†]大阪大学基礎工学部 [‡]大阪大学大学院情報科学研究科

1 はじめに

筆者らは無線全二重通信を利用してデータと電力の同時伝送を行うことで、電源の制約を根本的に解決した無線センサネットワークの確立を目指している。本稿では、複数のアクセスポイントが協調してデータと電力の同時伝送を行う場合に、センサノードがどのアクセスポイントと通信を行うかのスケジューリング方式について述べる。具体的には、センサノードが得ることができる電力を増やして電力不足による送受信の失敗を減らすことを目的として、不足電力を考慮した最速優先割り当てアルゴリズム (PFPA: Power aware Forest First Algorithm) を提案する。

2 無線電力伝送による無線センサネットワーク

無線センサネットワークが抱える電源の問題を根本的に解決する方法としてアクセスポイントが電波によってセンサノードに電力を供給する方法が考えられる。電波による電力供給については、例えば、テレビ塔からの電波によってセンサノードが駆動できることが報告されている [1]。アクセスポイントが意図的に放出する電波によってセンサノードを駆動させることを考えた場合、次の2つの問題が発生する。1つ目は電力信号の距離減衰である。電波は距離によって減衰するため、距離が離れると伝送できる電力が小さくなってしまふ。2つ目は電波資源の枯渇問題である。現在の無線ネットワークはますますトラヒックが増大する傾向にあるため、電力を送るために電波を利用すると電波資源をさらに逼迫してしまふ。

これらの問題に対して、筆者らは無線電力伝送を行う対象を機器内のセンサネットワークに絞った上で、無線全二重通信方式を用いたデータと電力の同時伝送技術を実現することを目指している。自動車、飛行機、自動販売機、プリンタ、ATMなどの機器は内部に大量のセンサを具備していることから、デザイン性やメンテナンス性の観点から無線でデータと電力を送信したいという要求が大きい。

図1に筆者らが想定している無線センサネットワークを示す。図1ではデータ信号はアクセスポイントとセンサノードで双方向に、電力信号はアクセスポイントからセンサノードへと送信される。センサノードからアクセスポイントへはセンサ値が、アクセスポイントからセンサノードへは制御フレームが主なデータ信号である。機器内のセンサネットワークでは距離減衰による伝送電力の急激な減少を抑えることができる。自動車や自動販売機などの機器内が金属で囲われた環境では、伝送距離がある程度限定される上に、電波が閉じ込められるからである。電波資源の枯渇の問題に関しては、無線全二重通信方式を用いる。自己干渉除去技術を用いることで、アクセスポイントが電力信号を送信しながらセンサノードから同じ周波数帯で送られてきたデータ信号を受信することが可能となる [2]。

アクセスポイントがセンサノードに電力を伝送する環境では、既存のメディアアクセス方式は前提条件が異なるので使用できないという問題が発生する。例えば通常のCSMA/CAではキャリアセンスによって電力信号を検出したセンサノードはデータ信号の送信を抑制する。キャリアセンスを用いて場合では、アクセスポイントが無線全二重の仕組みによってセンサノードからデータ信号を受信できるにも関わらず、センサノードがデータ信号の送信をしないという問題が発生する。このようなキャリアセンスベースのMACプロトコルに対して、文献 [3] ではキャリアセンスを用いずに制御フレームの交換と無線全二重通信のON/OFFを使い分ける方式を提案している。

3 複数のアクセスポイントの設置における課題

2節に示したような電波で電力伝送するネットワークでは、設置するアクセスポイントの数を増やすことで伝送電力を増やすことができる。アクセスポイントの数が増えるとアクセスポイントとセンサノードの距

離の平均が小さくなるので、電波の距離減衰の影響を抑えることができる。また、複数のアクセスポイントで電力信号を送信することで、より多くの電力を伝送することができる。

しかしながら、複数のアクセスポイントが存在する環境下では電波干渉の問題が発生する。図2、図3に、複数アクセスポイントを用いた場合に生じる2つの干渉を示す。図2では、アクセスポイント1がセンサノードに対して制御フレームを送信している。この時、アクセスポイント2が電力信号を送信すると制御フレームと電力信号との間で干渉が発生するため、センサノードがアクセスポイント1からの制御フレームを正しく受信できない可能性がある。図3では、アクセスポイント1はセンサノードに対して電力信号を送信しつつ、無線全二重通信の仕組みを用いてセンサノードからセンサ値を受信している。この時、アクセスポイント2が電力信号を送信すると、センサノードからのセンサ値とアクセスポイント2からの電力信号との間で干渉が発生するため、アクセスポイント1はセンサノードからセンサ値を正しく受信することができない。

アクセスポイント間の電波干渉の解決策として、センサノードとアクセスポイントのデータ信号や電力信号の送受信を集中制御することで干渉を抑える方法が考えられる。この集中制御型ネットワークでは複数のアクセスポイントは有線ネットワークを介して制御情報を共有する。通信スケジューリングはいずれかのアクセスポイントが実行する。スケジューリングの制御情報は他のアクセスポイントには有線で、センサノードには定期的に送信される制御フレームで共有される。スケジューリングを行うアクセスポイントは周辺のアクセスポイントやセンサノードの位置、センサノードのセンシング間隔、単位時間あたりの消費電力量、送受信に必要な電力量などの情報を既知の情報としてスケジューリングに使用する。

集中制御型ネットワークにおいてアクセスポイントは次の2つのタイミングでのみ電力信号を送信する。1つ目は、ネットワーク内でデータ信号の送受信が行われていない場合である。図4に全アクセスポイントによる電力信号の同時伝送を示す。ネットワークにおいてアクセスポイントもセンサノードもデータ信号の送信を行っていない状況では、全てのアクセスポイントが一斉に電力信号を送信する。2つ目は、ネットワーク内でデータ信号の送受信が行われている場合である。図5にデータ信号の送受信が行われている状況における電力伝送を示す。前述した干渉除去機能を用いて、データ信号を受信中のアクセスポイントのみが電力信号を送信する。

各センサノードが得ることができる電力量はアクセスポイントへの距離と、アクセスポイントが電力信号を送信する時間によって異なる。電力信号は距離によって減衰するので、アクセスポイントから離れたセンサノードが電力信号を受信しても得ることができる電力量は少ない。アクセスポイントが電力信号を送信する時間は通信スケジューリングによってそれぞれ異なる。電力信号を送信する時間の短いアクセスポイント近傍のセンサノードが得ることができる電力量は少ない。各センサノードに対して適切なアクセスポイントへの通信割り当てを行うことで、各センサノードが受け取ることができる電力量を調整することができる。

センサノードに対するアクセスポイントの割り当て方法として、最近傍割り当てが考えられる。最近傍割り当てとは、各センサノードが自身の最近傍のアクセスポイントと通信を行う方式である。しかしながら、最近傍割り当てではセンサノード間の供給電力量に大きな偏りが生まれて、あるセンサノードが全く通信できないという状況が起こりうる。例えば、アクセスポイントAの近傍に多くのセンサノードが、アクセスポイントAから離れたアクセスポイントBの近傍には少数のセンサノードが設置されているとする。最近傍割り当てでは、アクセスポイントAは多くのセンサノードと通信して長時間電力信号を送信する。その結果、

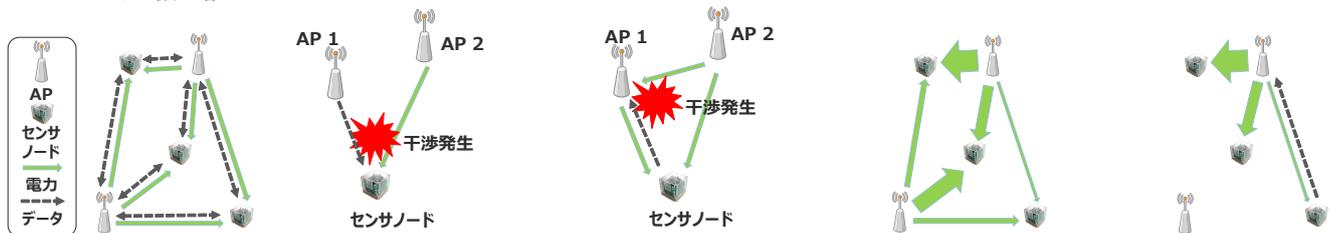


図1: 想定するネットワーク

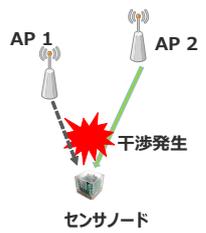


図2: 電力信号と制御フレームの干渉

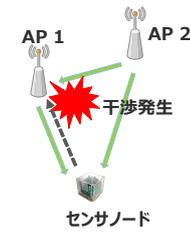


図3: 電力信号とセンサ値の干渉

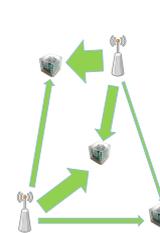


図4: 全 AP による電力伝送

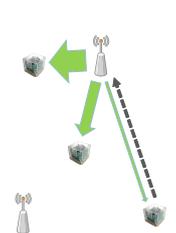


図5: 通信中の電力伝送

Algorithm 1 PFFA

```

1:  $C \leftarrow \phi$ 
2:  $T \leftarrow S$ 
3: while  $|T| \neq 0$  do
4:    $x \leftarrow \text{getForestNode}(T)$ 
5:   if  $\text{variance}(\mathbb{E}_{\text{all}}) < \alpha$  then
6:      $y \leftarrow \{j \in A \mid \min[\sum_{i \in S} e_i(C + (x, j))]\}$ 
7:   else
8:      $y \leftarrow \{j \in A \mid \min[\text{diff}(j)]\}$ 
9:   end if
10:   $C \leftarrow C + (x, y)$ 
11:   $T \leftarrow T - x$ 
12: end while

```

アクセスポイント A 近傍のセンサノードは多くの電力を得ることができる。一方で、アクセスポイント B の近傍には少数のセンサノードしか存在していないため、アクセスポイント B の通信時間は短い。その結果、アクセスポイント B 近傍のセンサノードが得ることができる電力量は小さく、電力不足に陥る可能性が高くなる。

4 提案手法

2 節 3 節での議論を元に、センサノード間の不足電力量の偏りを一定以下に抑えつつ、ネットワーク全体の不足電力量の最小化を図る割り当て方式である PFFA (Power-aware Forest First Algorithm) の設計を行った。PFFA は、センサノードの不足電力量を既知の情報から推定して、センサノード間の不足電力量の均衡度合に応じてアクセスポイントの割り当て方法を変更する。

Algorithm1 に PFFA のアルゴリズムを示す。A はネットワーク内すべてのアクセスポイントの集合、S はネットワーク内すべてのセンサノードの集合、 $C = \{(i, j) \mid i \in S, j \in A\}$ はセンサノード i に対してアクセスポイント j の通信が割り当てられていることを表す集合、T は割り当て待ちのセンサノードを表す集合である。getForestNode(T) は T に含まれるセンサノードの中から最近傍のアクセスポイントとの距離が最大のセンサノードを取得する関数、 $e_i(C)$ はアクセスポイントとセンサノードの割り当てが C である場合のセンサノード i の不足電力量を表す関数、 $\text{variance}(\mathbb{E}_{\text{all}}(C))$ は各センサノードの不足電力量の均衡度合を表す関数である。 $\text{variance}(\mathbb{E}_{\text{all}}(C))$ の引数は全てのセンサノードの不足電力量の集合 $\mathbb{E}_{\text{all}}(C) = \{e_1(C), e_2(C) \dots e_{|S|}(C)\}$ である。diff(j) は集合 C に対して、センサノード x に対するアクセスポイント j の通信割り当て (x, j) を追加した場合におけるセンサノード間の不足電力量の最大最小差を取得する関数である。diff(j) は以下の式で表される。

$$\text{diff}(j) = \max[\mathbb{E}_{\text{all}}(C + (x, j))] - \min[\mathbb{E}_{\text{all}}(C + (x, j))]$$

x は getForestNode(T) で取得されるセンサノードを格納する一時変数、 y はセンサノード x に割り当てられるアクセスポイントを格納する一時変数である。

PFFA ではネットワーク内で最近傍のアクセスポイントとの距離が最も大きいセンサノード、すなわち、どのアクセスポイントからも遠いセンサノードから逐次的に割り当てを行う。具体的にはまず **Algorithm1** の 2 行目で、割り当て待ちのセンサノードを表す集合 T を、全センサノードを表す集合 S で初期化した後、アルゴリズムの 4 行目で getForestNode(T) から最近傍のアクセスポイントとの距離が最大のセンサノードを選択、アクセスポイントを割り当てる。その後、選択したセンサノードを集合 T から取り除く。割り当て処理は集合 T の要素がなくなるまで繰り返される。

割り当ての際、各センサノードの単位時間あたりの不足電力量を推定して、センサノード間の不足電力量の均衡度合に応じてアクセスポイントの割り当て方法を変更する。具体的には **Algorithm1** の 5-9 行目で示される。各センサノードの単位時間あたりの不足電力量は周囲のセンサノードの既知の情報とアクセスポイントの通信割り当てから推定する。センサノード i の単位時間あたりの不足電力量を表す関数 $e_i(C)$ は、単位時間あたりの消費電力量を表す定数 r_i と単位時間あたりの供給電力量を表す関数 $\text{supply}_i(C)$ を用いて以下の式で表される。

$$e_i(C) = r_i - \text{supply}_i(C)$$

単位時間あたりの消費電力量を表す定数 r_i は既知の情報である。supply _{i} (C) はセンサノード i から各アクセスポイントへの距離と各アクセスポイントの通信スケジューリングから供給電力量を推定する。センサノード i からアクセスポイント j までの距離を d_{ij} 、アクセスポイントから距離 d のセンサノードが単位時間あたりに電力信号から得ることができる電力を表す関数を $f(d)$ 、単位時間の中でアクセスポイント j が電力信号の送信を行う時間を関数 $g_j(C)$ とすると、単位時間あたりの供給電力量 supply _{i} (C) は以下の式で表される。

$$\text{supply}_i(C) = \sum_{j \in A} f(d_{ij})g_j(C)$$

推定した不足電力量を用いて、センサノード間の不足電力量の均衡度合を求める。均衡度合は関数 $\text{variance}(\mathbb{E}_{\text{all}}(C))$ を用いて算出する。

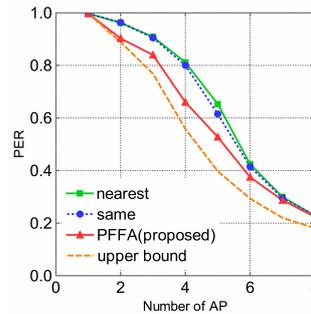


図 6: 各手法の比較

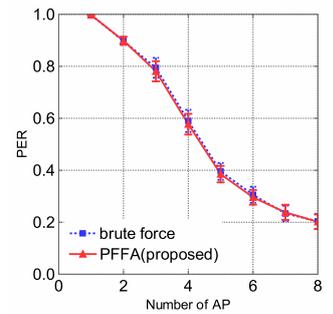


図 7: 提案手法と全探索の比較

$\text{variance}(\mathbb{E}_{\text{all}}(C))$ は以下の式で表される。

$$\text{variance}(\mathbb{E}_{\text{all}}(C)) = \frac{\max(\mathbb{E}_{\text{all}}(C)) - \min(\mathbb{E}_{\text{all}}(C))}{|\text{average}(\mathbb{E}_{\text{all}}(C))|}$$

$\text{variance}(\mathbb{E}_{\text{all}}(C))$ は値が小さいほどセンサノード間の不足電力量の偏りが小さいことを意味する。variance($\mathbb{E}_{\text{all}}(C)$) の値が閾値 α 未満の場合、センサノード間に不足電力量の偏りが無いとして、不足電力の総和が最小になるように割り当てられるアクセスポイントを決定する。一方、variance($\mathbb{E}_{\text{all}}(C)$) の値が閾値 α 以上ならば、センサノード間に不足電力量の偏りがあるとして、センサノード間の不足電力量の差が最小になるように割り当てられるアクセスポイントを決定する。決定したアクセスポイント **Algorithm1** の 10 行目に示すように割り当てる。

5 評価

提案手法の有効性を確認するために計算機シミュレーションによってアクセスポイントの数に対するバケットエラー率 (PER) を評価した。提案手法の有効性を相対的に評価することを目的として、最近傍割り当て (nearest)、同数割り当て (same)、提案手法である PFFA 割り当ての 3 つのアプローチを比較した。最近傍割り当ては、それぞれのセンサノードが最も近いアクセスポイントに対して通信を行う割り当て方式である。同数割り当てはそれぞれのアクセスポイントに同数のセンサノードをランダムに割り当てる方式である。想定しているネットワークの性能の上界を示すことを目的として、電力信号とデータ信号の周波数帯を分けて常に電力信号を送信し続けた場合の PER も測定して比較を行った。図 6 における上界は upper bound に相当する。PFFA における不足電力量の均衡度合の閾値 α は異なる値でシミュレーションを行って、もっともよい結果だった閾値 $\alpha = 1$ を使用した。

図 6 にアクセスポイントの数を変更した時の各手法の PER を示す。縦軸が PER、横軸がアクセスポイントの数である。PER では、電力不足による送受信の失敗もバケットエラーとして扱っている。提案手法は最近傍割り当てや同数割り当てと比べ、PER を低く抑えることに成功している。アクセスポイントの数が 4 の時はもっとも効果が大きく、PER を約 15% 改善している。最近傍割り当ては、同数割り当てとほとんど変わらない結果となった。

PFFA は逐次的にセンサノードの割り当てを行うため、最適な割り当て方法ではない。このような観点から、各ノードの不足電力量の差が一定以下かつネットワーク全体の不足電力量を最小化するアクセスポイントの割り当てを総当たりで探索する方法と、PFFA との比較を行った。全探索は計算量が大きいため、図 6 の評価環境より小さいポロジで評価を行った。

図 7 に PFFA と全探索を比較した結果を示す。図 7 から、提案手法が全探索手法と同程度の PER を達成する事が分かる。シミュレーションでは電力不足以外の要因でのバケットエラーを一定の確率で起こるようにしているため、シミュレーションに誤差があるものの、PFFA は全探索と同等の性能を達成することが分かった。計算量の観点では PFFA の方が優位である。ノードの数を N 、アクセスポイントの数を M として計算量を比較すると総当たりでの割り当てが $\mathcal{O}(M^N)$ なのに対して、PFFA での割り当ては $\mathcal{O}(MN)$ である。

6 おわりに

本稿では複数アクセスポイントでの無線全二重通信によるデータと電力の同時伝送について、センサノードのアクセスポイント割り当て方法として PFFA 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 の助成を受けたものである。

参考文献 [1] H Nishimoto, et al. Prototype implementation of ambient RF energy harvesting wireless sensor networks. *IEEE Sensors*, pp. 1282–1287, November 2010. [2] K Yamazaki, et al. Preliminary evaluation of simultaneous data and power transmission in the same frequency channel. *IEEE WCNC '14*, pp. 1237–1242, April 2014. [3] 猿渡ほか. 無線全二重通信によるデータと電力同時伝送のためのメディアアクセス制御方式. 情報処理学会研究報告, Vol. 2015-CDS-14, No. 7, pp. 1–8, 2015.