

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

猿渡 俊介^{1,a)} 小寺 志保^{1,b)} 成末 義哲^{2,c)} 川原 圭博^{2,d)} 渡辺 尚^{3,e)}

概要: 真の意味でありとあらゆるモノをネットワークに接続するためには、センサネットワークをバッテリーの制約から開放する必要がある。このような観点から、筆者らは電力伝送とデータ伝送を融合したセンサネットワークの実現を目指している。本稿では、無線電力伝送と無線全二重通信方式を組み合わせた場合に発生するメディアアクセス制御の問題を解決する方式について述べる。具体的には、分散方式と集中方式合わせて4つのメディアアクセス制御方式を提案して、それらの有効性と適用領域を議論する。さらに、提案手法を機器内のセンサネットワークに適用することを見据えて実際に送ることのできる電力量を実機を用いて検証する。検証では、電波暗室と機器内センサネットワークテストベッドの2箇所においてソフトウェア無線機とレクテナによる実測で得られた結果を示す。

1. はじめに

電力メータ、ガスメータ、サッカーボール、腕時計、歯ブラシ、吸入器、心拍センサ、火災報知器、スポーツシューズなど、多様なデバイスがネットワークに接続され始めている。「ありとあらゆるモノ」がネットワークに繋がって今まで取得することができなかった情報が収集・共有されることで、個人が抱える問題や社会が抱える問題を解決できるようになる。例えば、スポーツ用品に組み込まれたセンサによって個人の運動能力向上や健康に対するモチベーションの維持に貢献するサービスが提供されている。スマートメータではデマンドレスポンスなどのより巨視的な観点でのエネルギー生産・利用の効率化が実現されている。

このような「ありとあらゆるモノ」をネットワークに接続する機能の中核にあるのがセンサネットワーク技術である。センサネットワーク技術によってセンシング機能、計算機能、無線通信機能が1つに統合されたことで、実空間に存在する情報を高精度に取得することができるようになった。

しかしながら、センサネットワークには大きな課題が残されている。電源である。現在のセンサネットワークは一次電池や二次電池によって駆動している。一次電池を用いた場合にはバッテリー交換の問題が発生する。二次電池を用いる場合では、

利用シーンの中に二次電池に電力を供給する手続きを組み込まなければならないことや、二次電池自体の劣化の問題が発生する。電源の問題を解決しなければ、真の意味で「ありとあらゆるモノ」をネットワークに接続することはできない。

バッテリーを用いずにセンサネットワークを駆動する方法として、筆者らは電波による無線電力伝送と無線全二重通信方式を組み合わせた無線ネットワークの実現に取り組んでいる。また、実用化に向けた第一歩として、機器内のセンサネットワークを対象としている。機器内のセンサネットワークにおける無線電力伝送の詳細は2節で述べる。

無線電力伝送と無線全二重通信方式を組み合わせた場合、電力信号がデータ通信と同じ周波数帯で送信されることで、通常のセンサネットワークで用いられているキャリアセンスを用いたCSMA/CAが動作しないといった問題が発生する。無線電力伝送と無線全二重通信方式を組み合わせた際のメディアアクセス制御層の課題の詳細は3節で述べる。

上記のメディアアクセス制御層の課題を解決する方法として、本稿では分散制御と集中制御の方式をそれぞれ提案する。具体的には、分散制御方式として、FD-SWIPT MAC (Full-Duplex Simultaneous Wireless Information and Power Transfer Medium Access Control), P-CSMA/CA (Power CSMA/CA), ACKを使用しない繰返し送信, 集中制御方式としてFD-SWIPT TDMAを提案する。FD-SWIPT MACでは、無線全二重通信を利用することでキャリアセンスをせずに衝突回避する仕組みを提供する。各メディアアクセス制御方式の詳細は4節で述べる。

提案する4つのメディアアクセス制御方式を計算機シミュレーションによって評価した結果、分散制御方式の中ではFD-

¹ 静岡大学大学院情報学研究科
² 東京大学大学院情報理工学系研究科
³ 大阪大学大学院情報科学研究科
a) saru@inf.shizuoka.ac.jp
b) koder@aurum.cs.shizuoka.ac.jp
c) narusue@akg.t.u-tokyo.ac.jp
d) kawahara@akg.t.u-tokyo.ac.jp
e) watanabe@inf.shizuoka.ac.jp

SWIPT MAC が最も高い性能を達成することが分かった。また、集中制御方式である FD-SWIPT TDMA と分散制御方式である FD-SWIPT MAC を比較した場合、センサデータの発生間隔が短い場合には FD-SWIPT MAC の性能が、センサデータの発生間隔が長い場合には FD-SWIPT TDMA の性能が高いことも分かった。評価に先立って行った予備実験の詳細を 5 節で、評価の詳細は 6 節で述べる。

7 節において本研究に関する無線全二重通信方式、無線電力伝送の研究に関してレビューした後に、最後に 8 節でまとめとする。

2. 無線電力伝送による機器内センサネットワーク

センサネットワークが抱える電源の問題を抜本的に解決する方法として、電波によって電力を送信する方法が考えられる。具体的には、アクセスポイントが意図的にセンサノードに電力を供給するために電波を放出することを想定している。既にテレビ塔からの電波や電子レンジの漏れ電波によってセンサが駆動できることが確認されている [1, 2].

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す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、送ることができる電力が小さいことである。電波は減衰が大きいため、一般的なアクセスポイントが放出できる送信電力では 1 メートル程度の距離であってもほとんど電力を送ることができない。2 つ目は、電力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フィックが増大する傾向にある。このような状況下で電力を送るためにも電波を利用すると電波資源をさらに逼迫してしまう。

このような電波による電力伝送における問題に対して、筆者らは、機器内のセンサネットワークを対象を絞った上で、無線全二重通信方式を用いたデータと電力同時伝送技術を実現することを目指している [3]。自動車、飛行機、電車、自動販売機、プリンタ、ATM などの機器は内部に多量のセンサを具備しており、デザイン性やメンテナンス性の観点からワイヤレスで電力とデータを送信したいという要求が大きい。例えば、自動車では、高級車で 30~40 kg、軽自動車でも 10 kg のハーネスが使用されており、燃費の観点からもワイヤレス化が期待されている [4].

図 1 に筆者らが想定している最終ゴールを示す。図 1 では、データはアクセスポイントとセンサノードで双方向に、電力はアクセスポイントからセンサノードへと一方向に送信される。車や自動販売機などの機器内のセンサネットワークを対象とすることで、伝送距離をある程度限定することができる上に、電波が機器内に閉じ込められやすくなるので電力伝送効率が向上する。

さらに、アクセスポイントは、電波資源の有効活用のために、電力伝送信号を送信しながら自身の電力伝送信号をキャンセル可能な自己干渉除去機能を具備する。無線電力伝送 [5] と干渉除去技術 [6, 7] を利用することで同一周波数帯においてデータと電力を同時伝送する周波数を共同利用することができる。ア

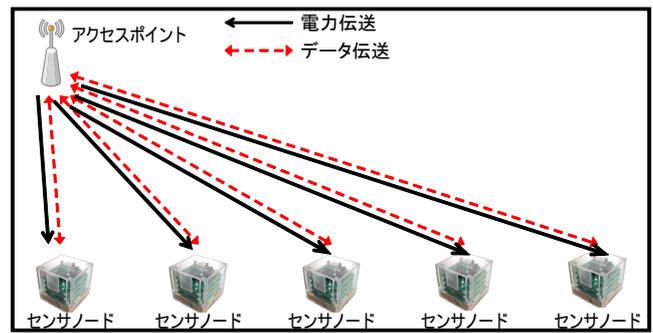


図 1 最終ゴール

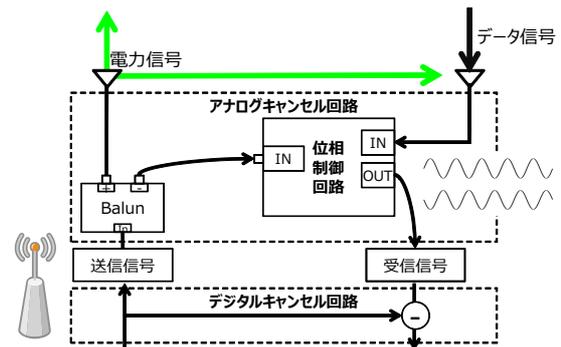


図 2 アクセスポイントの構成

アクセスポイントが電力伝送信号を送信しながらセンサノードからのデータを受信できるようになることで、1 つの周波数帯で電力伝送とデータ通信が同時に実現できる。

図 2 に無線全二重通信によるデータと電力同時伝送に対応したアクセスポイントの構成図を示す。アクセスポイントでは、アナログキャンセル回路とデジタルキャンセル回路を組み合わせることによって自己干渉信号をキャンセルする。まず、位相制御回路によって自身が送信した信号と逆位相の信号を受信信号と足し合わせる。次に、デジタル回路でさらに干渉除去を行う。文献 [3] では、機器内のセンサネットワークにおいて無線全二重通信を実現するのに十分なキャンセルが実装可能であることが示されている。

3. メディアアクセス制御層における課題

2 節に示したようなアクセスポイントが全二重通信の機能を具備していたり、アクセスポイントがセンサノードに対して電力を伝送する環境では、既存のメディアアクセス制御方式は前提条件が異なるので使用することが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をするため、電波の送信を検知した場合には送信を抑制する。アクセスポイントが電力を送信している場合、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のフレームを受信できるにも関わらず、センサノードが通信を抑制してしまうという状況が発生する。

図 3 に、無線全二重通信を前提としたデータと電力同時伝送環境に通常の CSMA/CA を適用した場合の問題点を示す。通常の CSMA/CA では、フレームが発生すると他のノードとの

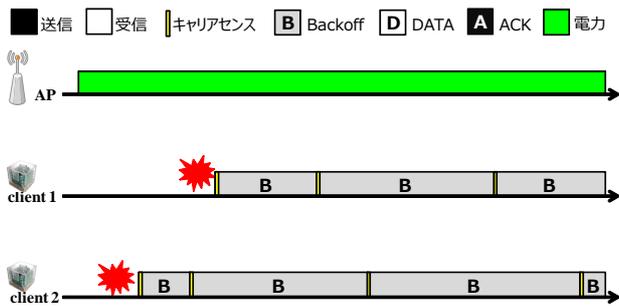


図 3 問題点

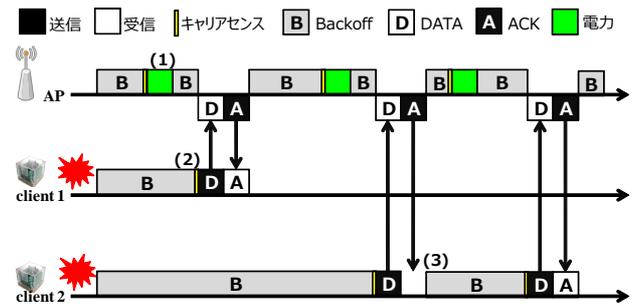


図 5 CSMA/CA による電力伝送 (P-CSMA/CA)

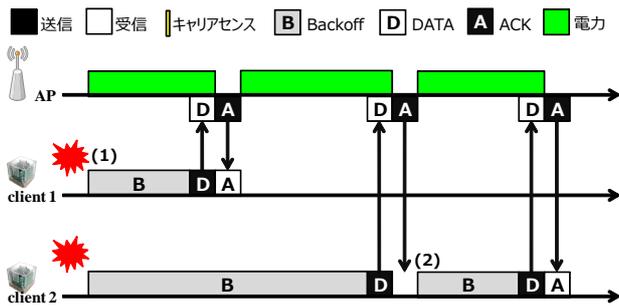


図 4 FD-SWIPT MAC

衝突を避けるためにランダム時間バックオフする。バックオフ時間が経過すると、キャリアセンスして他のノードが通信していないか確認する。他のノードが通信していない場合にはフレームの送信を開始する。他のノードの通信を検出した場合には再度ランダム時間バックオフする。このようなメディアアクセス制御方式を無線全二重通信を前提としたデータと電力電力同時伝送環境に適用すると、アクセスポイントが常に電力信号を送信していることで、キャリアセンスしても他のノードが通信していると判断してしまうため、センサノードはいつまで経っても自身のフレームを送信することができないという問題が発生する。

4. メディアアクセス制御方式

3 節で述べたように、無線全二重通信を用いたデータと電力同時伝送環境では既存のメディアアクセス制御方式は使用できないため、分散制御方式と集中制御方式を合わせて 4 つのメディアアクセス制御方式を設計した。

分散制御方式としては、FD-SWIPT MAC, P-CSMA/CA, ACK を用いない繰り返し送信方式の 3 つを設計した。分散制御方式では、各センサノードが自律的に動作するため、センサノード数の追加・削除や環境の変化にも柔軟に対応できる。

集中制御方式としては、FD-SWIPT TDMA の 1 つを設計した。集中制御方式ではアクセスポイントが全てのセンサノードを管理するため、電力の利用効率が分散制御方式よりも高いと予想される。一方で、時刻同期のオーバーヘッドの存在することや、センサデータの発生間隔の変更や、センサノード数の追加・削除に柔軟に対応できないといった問題が発生する。

4.1 FD-SWIPT MAC

FD-SWIPT MAC では、キャリアセンスを行わずに、アクセスポイントとセンサノードが連携することで衝突回避を実現する。図 4 に SWIPT-MAC の動作を示す。FD-SWIPT MAC では、センサノードでフレームが発生すると通常の CSMA/CA と同様にランダム時間バックオフする (図 4-1)。電力消費を抑えることを目的として、バックオフ中は無線モジュールをオフにする。ランダム時間経過した後の動作が通常の CSMA/CA とは異なる。FD-SWIPT MAC では、キャリアセンスしてもアクセスポイントが電力信号を送信していることにより常にキャリアを検出してしまうため、キャリアセンスせずにパケットを送信する。アクセスポイントは無線全二重通信方式による自己干渉除去によってフレームを受信できる。フレームを受信したアクセスポイントは電力信号の送信を停止してセンサノードへと ACK を返す。もしセンサノードが自身が送信したフレームの ACK をアクセスポイントから受信できなかった場合には、再びランダム時間バックオフしてフレームを再送する (図 4-2)。

4.2 P-CSMA/CA

P-CSMA/CA は、電力信号をフレームと見なして、データフレームと電力フレームがアクセス権を競う通信方式である。FD-SWIPT MAC と異なり、P-CSMA/CA は無線全二重通信を前提としていない。図 5 に P-CSMA/CA の動作を示す。アクセスポイントでは、通常の CSMA/CA と同様にランダム時間バックオフした後にキャリアセンスして、他のノードが通信していなかった場合には電力フレームを送信する。アクセスポイントは電力フレームの送信が終了しても ACK の受信は行わない (図 5-1)。電力フレームを送り終わると同時に、次の電力信号を送信するためのコンテンションを開始する。

センサノードでは、センサデータが発生するとアクセスポイントと同様にランダム時間バックオフした後にキャリアセンスして、アクセスポイントや他のセンサノードが通信していなかった場合にはデータフレームを送信する (図 5-2)。センサノードによるデータフレームの送信では、アクセスポイントの電力の送信と異なり、ACK を待ち受けて再送制御を行う (図 5-3)。この時の再送制御方式は通常の CSMA/CA と同様である。

4.3 ACK を使用しない繰り返し送信

FD-SWIPT MAC や CSMA/CA による電力伝送ではアク

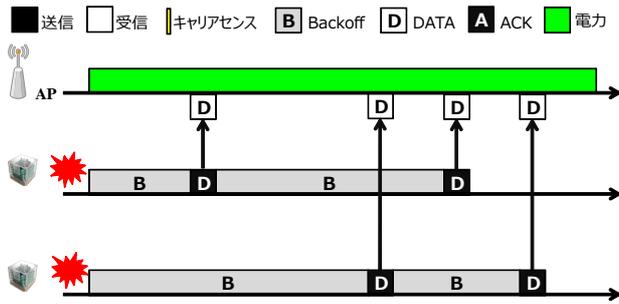


図 6 ACK を使用しない繰り返し送信方式

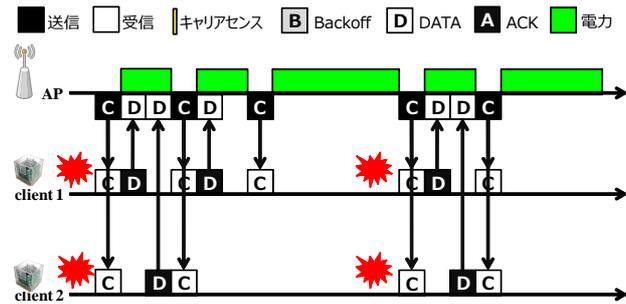


図 7 SWIPT-TDMA

セスポイントからセンサノードに ACK を返すためにアクセスポイントが一時的に電力伝送を止めている。電力伝送を止めることでアクセスポイントからセンサノードに到達確認を通知することができるものの、センサノードが得られる電力も少なくなる。もし ACK を送ることを前提としないならば、アクセスポイントは電力を伝送し続けることができる。このような観点から、ACK を用いることの効果を検証するための比較対象として、ACK を使用しない繰り返し送信方式を設計した。

図 6 に繰り返し送信方式の動作を示す。繰り返し送信方式では、センサノードは、フレームが発生するとアクセスポイントに届いたかどうかに関わらず一定回数(図 6 では 2 回)

- ランダム時間バックオフ
- データフレームの送信

を繰り返す。この時、キャリアセンスは行わない。到達確認を行わないので無駄なフレームを送信する可能性が増えるものの、送信回路のみで受信回路を持たない無線モジュールにも実装できるというメリットがある。

4.4 FD-SWIPT TDMA

前述の FD-SWIPT MAC, CSMA/CA による電力伝送, ACK を用いない繰り返し送信は全て分散制御型的方式であった。環境の変化に弱いという特徴があるものの、一般的に無線通信では集中制御型の方が通信効率が良い。

分散制御型との比較を目的として、集中制御型的方式である FD-SWIPTTDMA を設計した。FD-SWIPT TDMA では、全てのセンサノードはアクセスポイントと制御フレームを用いて同期されており、センシング間隔や自分がどのスロットで送信すべきかの情報もあらかじめ与えられているという前提で動作する。FD-SWIPT MAC と異なり、全てのセンサノードが

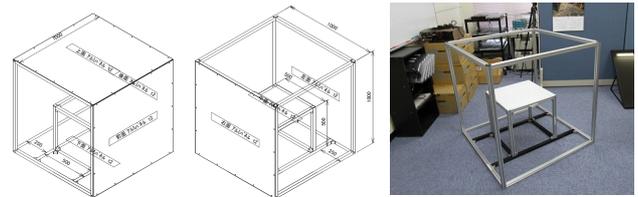


図 8 機器内センサネットワークテストベッド

自分がデータを送信できるタイミングが分かるので分散制御型よりも電力効率が高いと考えられる。一方で、制御フレームのタイミングやスロット数が固定的に与えられるため、クライアントの追加などのシステムの変更や他のシステムからの干渉には弱いと考えられる。また、制御フレームによる同期のオーバーヘッドも生じる。

図 7 に FD-SWIPT TDMA の動作例を示す。アクセスポイントは定期的に電力信号の送信を停止して制御フレーム(図 7 中の C)を送信する。各センサノードは制御フレームに合わせて同期を取り、制御フレームが来るタイミングでウェイクして制御フレームを受け取れる状態になる。制御フレームにはどのセンサノードが送信すべきかの情報が含まれている。制御フレームによって送信を指定されたセンサノードは、自身が送信できるスロットに来るとウェイクしてアクセスポイントに対してデータフレームを送信する。この時、ACK は受け取らない。センサノードは次の制御フレームの送信のタイミングでもウェイクして制御フレームを受け取る。制御フレームは ACK の役割も担っており、制御フレームに自身の送信が指定されていなかった場合にはデータの再送は行わずにスリープ状態に移す。全てのセンサノードからセンサデータを受け取るとアクセスポイントは次のセンシング間隔まで電力信号を送信し続ける。

4.5 下り通信への対応

これらのメディアアクセス制御方式はセンサネットワークに適用することを想定しているため、上り通信のみについて述べた。下り通信も必要な場合には、センサノードの上り通信が定期的に通信している特性を利用する。

例えば、アクセスポイントからセンサノードへの ACK フレームの中に、アクセスポイントがセンサノードに送るべきパケットを持っているという情報を含めることで、センサノードがフレームを受信するためにウェイクする期間を延長するといった拡張が考えられる。

5. 予備実験

4 節で示したメディアアクセス制御方式の評価に先立ち、電波暗室と機器内センサネットワークテストベッドにおいて無線電力伝送においてどの程度の電力を送ることができるかの検証を行った。図 8 にテストベッドを示す。30 mm×30 mm のアルミ構造部材 20 本を TG ジョイントによって接続し、1 m×1 m×1 m の正六面体を実装した。正六面体の上下左右前後の 6 面すべてに厚さ 2 mm のアルミパネルをトラスネジで貼り付け、金属に遮蔽した環境を構築した。設計はアルミ構造材の製

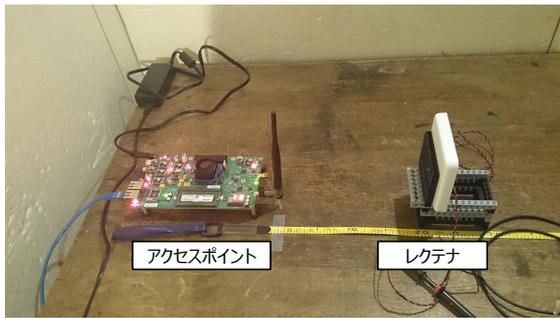


図 9 実験環境

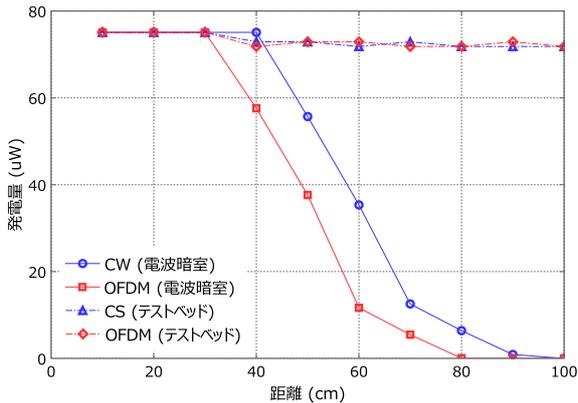


図 10 アクセスポイントとセンサノードの距離に対する発電量

造・販売会社である SUS 株式会社が開発した Unit Design 7.0 を用いて筆者らが独自に行った。

図 9 に実験環境を示す。アクセスポイントとレクテナの距離を変えながらレクテナにおける発電量を計測した。アクセスポイントには Mango Communications 社の WARPv3 を用いた。アンテナとしては 2.40 GHz 帯~2.48 GHz 帯に対応した 3 dBi の VERT2450 を用いた。WARPv3 をスペクトラムアナライザに直接接続して送信電力を計算したところ、17.3 dBm であった。すなわち、アンテナを接続したアクセスポイントの送信電力は 20.3 dBm である。アクセスポイントからは CW (Continuous Wave) と帯域幅が 20 MHz の OFDM 信号を送信した。レクテナとしては、受信帯域が 2.45 GHz±50 MHz、最大出力電圧が 2.7 V±0.1 V である日本電業工作の 2.4 GHz 帯域レクテナ電源を用いた。

図 10 に実験結果を示す。横軸がアクセスポイントとレクテナの距離 [cm]、縦軸が発電量 [μW] である。図 10 より、テストベッドでの発電量の方が電波暗室での発電量よりも大きいことである。アクセスポイントとレクテナの距離が 1 m の地点では電波暗室での発電量は 0 なのに対して、テストベッドでの発電量は 10 cm の地点の発電量である約 75 μW と大きな違いがない。テストベッドは金属に遮蔽された空間であるため、電力伝送効率が高くなっているからだと考えられる。

6. 評価

4 節で示した

- FD-SWIPT MAC

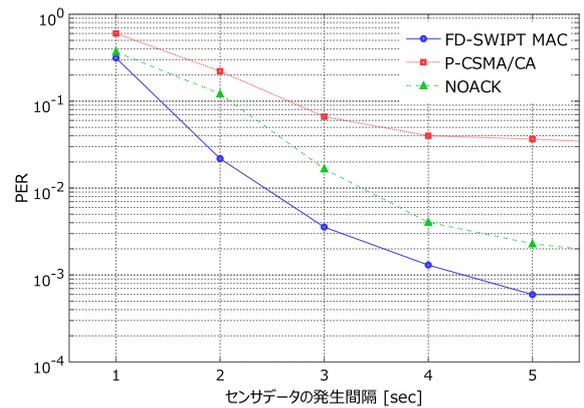


図 11 分散制御方式のメディアアクセス制御方式の比較

- P-CSMA/CA
- ACK を用いない繰り返し送信 (No ACK)
- SWIPT-TDMA

の 4 つのメディアアクセス制御方式を 6 節で得た実験値を用いて計算機シミュレーションによって評価した。

6.1 分散制御方式のメディアアクセス制御方式の比較

まず、センサノードが 100 台、各センサノードにおける発電量が 75.0 μW の時に各センサノードにおけるセンサデータの発生間隔 [秒] を変えた場合のフレームエラー率を評価した。具体的には、各センサノードにおいて単位時間当たりのセンサデータの生起確率がポアソン分布であり、ポアソン分布における $\frac{1}{\lambda}$ をセンサデータの発生間隔とした。また、フレームエラーは、衝突が発生した場合と、センサデータ発生時にパケットを送信するためのエネルギーが足りなかった場合に発生するものとした。各メディアアクセス制御方式の再送回数や繰り返し送信回数は 5 回に統一した。各センサノードにおける消費電力は MICAz や TelosB で用いられている Texas Instruments 社の CC2420 を参考に送信状態 57.4 mW、受信状態 65.0 mW、スリープ状態 0 mW とした。

図 11 に評価結果を示す。横軸がセンサデータの発生間隔、縦軸がフレームエラー率である。図 11 より、FD-SWIPT MAC が最も高い性能を達成していることが分かる。FD-SWIPT MAC は、P-CSMA/CA と比べて約 $\frac{1}{61}$ 、繰り返し送信方式 (NO-ACK) と比べて約 $\frac{1}{3.8}$ のフレームエラー率を実現している。P-CSMA/CA と比較して FD-SWIPT MAC のフレームエラー率が低いのは、無線全二重通信方式を用いたことによって電力伝送効率とフレームの衝突率の両方が改善したからだと考えられる。また、P-CSMA/CA では、電力信号が常にデータ信号とチャネルアクセスを争うことになり、結果として一定の確率でデータ信号が負けることによってフレームエラー率が決まることも分かった。繰り返し送信方式と比較して FD-SWIPT MAC のフレームエラー率が低いのは、ACK を用いることでフレームの送信回数を抑えることでセンサノードの電力消費が抑えられ、かつ衝突率が下がっているからだと考えられる。

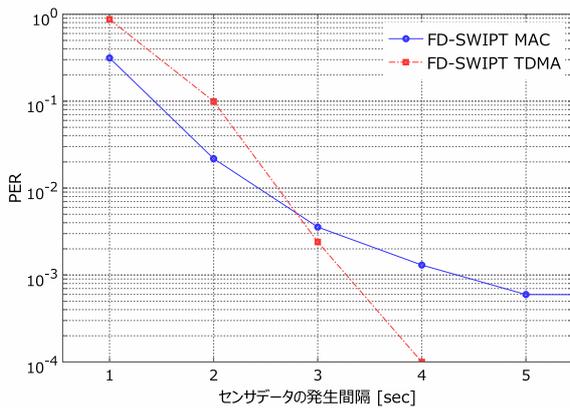


図 12 分散制御方式と集中制御方式の比較

6.2 分散制御方式と集中制御方式の比較

分散制御方式において最も性能が高かったのは FD-SWIPT MAC であった。無線全二重通信を用いたデータと電力同時伝送環境において、分散制御方式と集中制御方式の特性の違いを確認するために FD-SWIPT MAC と FD-SWIPT TDMA の比較を行った。シミュレーションのパラメータは 6.1 節の評価とトラヒックモデル以外は同じである。

ただし、集中制御方式では、センサデータの発生はポアソン分布ではなく、一定間隔で発生する条件で評価しているので分散制御方式の方が若干不利な条件であることに注意されたい。分散制御方式では衝突回避の効果を検証するためにポアソン分布で評価しているが、集中制御方式では衝突は発生しないことから一定間隔でセンサデータが発生すると仮定した。

図 12 に FD-SWIPT MAC と FD-SWIPT TDMA の評価結果を示す。横軸がセンサデータの発生間隔、縦軸がフレームエラー率である。図 12 より、次の 2 つのことが分かる。

1 つ目は、センサデータの送信間隔が短い場合には FD-SWIPT MAC の方が FD-SWIPT TDMA よりも性能が高いことである。これは、FD-SWIPT MAC の方が FD-SWIPT TDMA よりも 1 回のサイクルで消費するエネルギーが低いことに起因すると考えられる。FD-SWIPT MAC では、各センサノードが 1 回のサイクルにセンサデータの送信と ACK の受信の 2 回のタイミングでしかエネルギーを使わない。FD-SWIPT TDMA では、制御フレームの受信、センサデータの送信、制御フレームの受信の 3 つのタイミングでエネルギーを消費する。

2 つ目は、センサデータの送信間隔が長い場合には、FD-SWIPT TDMA の方が FD-SWIPT MAC よりも性能が高いことである。これは、エネルギーが十分にある領域では、FD-SWIPT TDMA では衝突が全く発生しないのに対して、FD-SWIPT CSMA ではポアソン分布であるがゆえにタイミングによっては衝突が発生するからだと考えられる。

7. 関連研究

本研究の関連研究として、電力と情報同時伝送の理論面の研究、無線電力伝送技術、無線全二重通信技術、センサネットワークのメディアアクセス制御方式が挙げられる。

7.1 理論面からのアプローチ

無線ネットワークの分野では、理論的な側面からデータ伝送と電力伝送を融合する試みが進められている。具体的には、1 対多の通信 [8–11]、中継ノードを用いた 3 ノードでの通信 [12–16]、受信機の構成に関する研究がなされている [17]。例えば本稿と同じ無線全二重通信を前提としている文献 [11] では、アクセスポイントが電力伝送を行いながらデータを受信できる条件において、多数のクライアントの総合スループットが最大化できる最適な時間割り当てを解析によって算出している。

これらの研究は、データと電力同時伝送において理想的なデバイス为前提とした理論的境界を示す試みである。それに対して本研究は、オフザシェルフのデバイスを用いて現状の技術における可能性と課題を模索する試みであると位置付けられる。

7.2 無線電力伝送技術

無線電力伝送という観点では、磁気を用いたものと電波を用いたものに大別できる。磁気を用いたものでは、電磁誘導を元にした Sony 社の Felica [18] など、既に数多く製品として利用されている。磁気を用いた方式では、近接したデバイスに対して効率的に電力を伝送できるものの、離れた距離にあるデバイスに対しては電力を伝送することは出来ないという欠点がある。

それに対して電磁気の共鳴現象を利用して電力伝送距離を長距離化する試みが進められている。2007 年に米国の MIT ではコイルやコンデンサが共鳴・結合することを利用して 1 メートル程度離れた距離でも効率的に電力を供給できる電磁界共鳴方式が提案されている [19]。また、無線電力伝送をマルチホップすることでさらなる伝送距離の長距離化に向けた試みがなされている [20]。

電波を用いた電力伝送としては、RFID (Radio Frequency Identifier) が既に様々な分野において実用化されている。電波で得られる電力は現状では微弱であるものの、磁気を用いたものに比べて数メートルと伝送距離を長くできる。インテルでは、RFID をさらに一歩進めて ID だけでなくセンサデータも読み取ることのできる WISP (Wireless Identification and Sensing Platform) の研究が進められている [21]。既に展開している無線 LAN から送信される電波に相乗りする形で通信することで電力なしで 2.1 m の距離を 1 kbps で通信する WiFi Backscatter の研究も進められている [22]。

文献 [23,24] では、ホーンアンテナによる電力伝送と、通常の IEEE 802.11 によるデータ通信を組み合わせた場合に生じる現象を実機を用いて検証している。これらの研究では、データ伝送と電力伝送は時分割あるいは周波数分割でチャネルを共有することを前提としている。

文献 [1,2] では、環境中の電波からエネルギーを取得するエナジーハーベスト技術を実現している。実際に東京タワーから放出される電波で LED を点灯させたり [1]、電子レンジの漏れ電波を利用して温度計を動作させたりすることに成功している [2]。

本研究では、既にデータ伝送に用いられている電波に対して、電力伝送の機能を付け加えるとの観点から電波を用いること

を想定している。電波を用いている技術の中では、センサネットワークと融合するという観点で WISP とコンセプトが近い。WISP は RFID と同じ仕組みで電波が到達したタイミングでセンサを駆動するのに対して、本研究ではアクセスポイントから送信される電力を蓄積してセンサと無線通信を駆動するのに十分な電力を蓄積してから送信するため想定環境が異なる。

7.3 無線全二重通信技術

無線全二重通信 [25–27] の研究では、混入した自身の送信電波が非常に大きいことから、AGC や ADC の性能を超えた干渉除去として、デジタル信号だけでなくアナログ信号に対しても干渉除去を行っている。文献 [27] では、アナログ信号とデジタル信号に対する干渉除去を専用の送受信機に実装することで、最大 110 dB もの高い干渉除去性能を達成している。データ通信を対象とした無線全二重通信は 2 つのノードが送信するタイミングを揃える必要があるため、メディアアクセス制御も無線全二重通信に対応した方式を用いる必要がある [26]。

干渉除去技術という観点では、干渉除去技術の同時通信の特性を用いて通信品質を改善するための研究がなされている。衝突した 2 つのデータ信号を受信側で分離する研究 [6, 7, 28, 29] では、2 つのデータ信号の電力差を利用して干渉除去を行う。衝突した信号をそのまま復号することによって弱いデータ信号をノイズとして強いデータ信号を復号したのち、受信側で再度複製した強いデータ信号を衝突した信号から減算することで干渉除去を実現して弱い信号を復号する。この一連の信号除去は、AGC (auto gain control) や ADC (analog to digital converter) 後のデジタル信号に対して行っている。

これらの既存の研究はデータ伝送のみを対象として干渉除去技術を用いている。それに対して、本研究では干渉除去技術を用いてデータと電力の同時伝送を目指している。さらに、機器内のセンサネットワークの用途を対象としているので想定しているトラヒックパターンも異なり、結果としてメディアアクセス制御方式のデザインも異なっている。

7.4 無線センサネットワークのメディアアクセス制御方式

無線センサネットワークでは、S-MAC [30] に始まり、B-MAC [31], X-MAC [32], RI-MAC [33], A-MAC [34], Contiki MAC [35] や、既に標準化された IEEE 802.15.4 [36] などのメディアアクセス制御方式が存在する。IEEE 802.15.4 は既に実装されており、B-MAC, X-MAC, Contiki MAC はそれぞれ IEEE 802.15.4 に対応した無線モジュールであれば容易に実装することができる。これらのメディアアクセス制御方式は基本的には CSMA/CA を基盤としているため、3 節で述べたように無線全二重通信を用いたデータと電力同時伝送のネットワークには用いることができない。

8. おわりに

本稿では、無線全二重通信を用いたデータと電力同時伝送技術を用いたセンサネットワークのメディアアクセス制御方式について述べた。分散制御型と集中制御型のメディアアクセス制

御方式をそれぞれ実験値を元に行った計算機シミュレーションによって評価した。分散制御型のメディアアクセス制御方式の中では、電力伝送を一時的に止めて ACK による到達確認を行う FD-SWIPT MAC が最も高い性能を達成した。分散制御型と集中制御型を比べた場合、エネルギーに余裕のある状況では集中制御型、エネルギーに余裕のない状況では分散制御型の方が高い性能を発揮した。現在、TelosB と Contiki OS を用いた実装を進めている。

9. 謝辞

本研究は総務省・2015 年度戦略的情報通信研究開発推進事業 (SCOPE) の助成を受けて行った。

参考文献

- [1] Nishimoto, H., Kawahara, Y. and Asami, T.: Prototype Implementation of Ambient RF Energy Harvesting Wireless Sensor Networks, *Proceedings of the IEEE Sensors*, pp. 1282–1287 (2010).
- [2] Kawahara, Y., Bian, X., Shigetani, R., Vyas, R., Tentzeris, M. M. and Asami, T.: Power harvesting from microwave oven electromagnetic leakage, *Proceedings of the 15th International Conference on Ubiquitous Computing (UbiComp'13)*, pp. 373–382 (2013).
- [3] Yamazaki, K., Sugiyama, Y., Kawahara, Y., Saruwatari, S. and Watanabe, T.: Preliminary Evaluation of Simultaneous Data and Power Transmission in the Same Frequency Channel, *Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference (IEEE WCNC'14)*, pp. 1237–1242 (2015).
- [4] 伴 弘司, 北沢祥一, 小林 聖: 省資源・省エネに有用なワイヤレスハーネス技術, 電子情報通信学会通信ソサイエティマガジン, No. 25, pp. 25–32 (2013).
- [5] Bieler, T., Perrottet, M., Nguyen, V. and Perriard, Y.: Contactless power and information transmission, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 38, No. 5, pp. 1266–1272 (2002).
- [6] Tse, D. and Viswanath, P.: *Fundamentals of Wireless Communication*, Cambridge University Press (2005).
- [7] Halperin, D., Anderson, T. and Wetherall, D.: Taking the Sting out of Carrier Sense: Interference Cancellation for Wireless LANs, *Proceedings of the 14th ACM Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'08)*, pp. 339–350 (2008).
- [8] Zhang, R. and Ho, C. K.: MIMO Broadcasting for Simultaneous Wireless Information and Power Transfer, *IEEE Wireless Communications*, Vol. 12, No. 5, pp. 1989–2001 (2013).
- [9] Ju, H. and Zhang, R.: Throughput Maximization in Wireless Powered Communication Networks, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 13, No. 1, pp. 418–428 (2014).
- [10] Huang, K. and Larsson, E.: Simultaneous Information and Power Transfer for Broadband Wireless Systems, *IEEE Transactions on Signal Processing*, Vol. 61, No. 23, pp. 5972–5986 (2013).
- [11] Ju, H. and Zhang, R.: Optimal Resource Allocation in Full-Duplex Wireless-Powered Communica-

- tion Network, *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 62, No. 10, pp. 3528–3540 (2014).
- [12] Krikidis, I. and Sasaki, S.: RF Energy Transfer for Cooperative Networks: Data Relaying or Energy Harvesting?, *IEEE Communications Letters*, Vol. 16, No. 11, pp. 1772–1775 (2012).
- [13] Gurakan, B., Ozel, O., Yang, J. and Ulukus, S.: Energy Cooperation in Energy Harvesting Communications, *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 61, No. 12, pp. 4884–4898 (2013).
- [14] Chen, H., Li, Y., Rebelatto, J. L., Filho, B. F. U. and Vucetic, B.: Harvest-Then-Cooperate: Wireless-Powered Cooperative Communications, *IEEE Transactions on Signal Processing*, Vol. 63, No. 7, pp. 1700–1711 (2015).
- [15] Zhou, Z., Peng, M., Zhao, Z. and Li, Y.: Joint Power Splitting and Antenna Selection in Energy Harvesting Relay Channels, *IEEE Signal Processing Letters*, Vol. 22, No. 7, pp. 823–827 (2014).
- [16] Ishibashi, K.: Dynamic Harvest-and-forward: New Cooperative Diversity with RF Energy Harvesting, *6th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP'14)*, pp. 1–5 (2014).
- [17] Zhou, X., Zhang, R. and Ho, C. K.: Wireless Information and Power Transfer: Architecture Design and Rate-Energy Tradeoff, *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 61, No. 11, pp. 4754–4767 (2013).
- [18] Sony Global: FeliCa Web Site, <http://www.sony.net/Products/felica/>.
- [19] Kurs, A., Karalis, A., Moffatt, R., Joannopoulos, J. D., Fisher, P. and Soljacic, M.: Magnetic Resonances Wireless Power Transfer via Strongly Coupled, *Science*, Vol. 317, No. 82, pp. 83–86 (2007).
- [20] Narusue, Y., Kawahara, Y. and Asami, T.: Impedance Matching Method for Any-hop Straight Wireless Power Transmission using Magnetic Resonance, *Proceedings of the IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS'13)*, Austin, Texas, pp. 193–195 (2013).
- [21] Smith, J. R., Sample, A. P., Powledge, P. S., Roy, S. and Mamishev, A.: A wirelessly-powered platform for sensing and computation, *Proceedings of the 8th International Conference on Ubiquitous Computing (UbiComp'06)*, pp. 495–506 (2006).
- [22] Kellogg, B., Parks, A., Gollakota, S., Smith, J. R. and Wetherall, D.: Wi-Fi Backscatter: Internet Connectivity for RF-Powered Devices, *Proceedings of the Annual Conference of the ACM Special Interest Group on Data Communication (SIGCOMM'14)*, pp. 607–618 (2014).
- [23] Yamashita, S., Imoto, N., Ichihara, T., Yamamoto, K., Nishio, T., Morikura, M. and Shinohara, N.: Implementation and Feasibility Study of Co-channel Operation System of Microwave Power Transmissions to IEEE 802.11-based Battery-less Sensors, *IEICE Transactions on Communications*, Vol. E97-B, No. 9, pp. 1843–1852 (2014).
- [24] Imoto, N., Yamashita, S., Ichihara, T., Yamamoto, K., Morikura, M. and Shinohara, N.: Experimental Investigation of Co-channel and Adjacent Channel Operations of Microwave Power and IEEE 802.11g Data Transmissions, *IEICE Transactions on Communications*, Vol. E97-B, No. 9, pp. 1835–1842 (2014).
- [25] Choi, J. I., Jain, M., Srinivasan, K., Levis, P. and Katti, S.: Achieving Single Channel, Full Duplex Wireless Communication, *Proceedings of the 16th ACM Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'10)*, pp. 1–14 (2010).
- [26] Jain, M., Choi, J. I., Kim, T. M., Bharadia, D., Seth, S., Srinivasan, K., Levis, P., Katti, S. and Sinha, P.: Practical, Real-time, Full Duplex Wireless, *Proceedings of the 17th ACM Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'11)*, pp. 301–312 (2011).
- [27] Bharadia, D., McMilin, E. and Katti, S.: Full duplex radios, *Proceedings of the Annual Conference of the ACM Special Interest Group on Data Communication (SIGCOMM'13)*, pp. 375–386 (2013).
- [28] Gollakota, S. and Katabi, D.: ZigZag Decoding: Combating Hidden Terminals in Wireless Networks, *Proceedings of the Annual Conference of the ACM Special Interest Group on Data Communication (SIGCOMM'08)*, pp. 159–170 (2008).
- [29] Gudipati, A. and Katti, S.: AutoMAC: Rateless Wireless Concurrent Medium Access, *Proceedings of the 18th ACM Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'12)*, pp. 257–268 (2012).
- [30] Ye, W., Heidemann, J. and Estrin, D.: An Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks, *Proceedings of the 21st IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM'02)*, pp. 1567–1576 (2002).
- [31] Polastre, J., Hill, J. and Culler, D.: Versatile Low Power Media Access for Wireless Sensor Networks, *Proceedings of the 2nd ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys'04)*, pp. 95–107 (2004).
- [32] Buettner, M., Yee, G. V., Anderson, E. and Han, R.: X-MAC: A Short Preamble MAC Protocol for Duty-Cycled Wireless Sensor Networks, *Proceedings of the 4th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys'06)*, pp. 307–320 (2006).
- [33] Sun, Y., Gurewitz, O. and Johnson, D. B.: RI-MAC: A Receiver-Initiated Asynchronous Duty Cycle MAC Protocol for Dynamic Traffic Loads in Wireless Sensor Networks, *Proceedings of the 6th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys'08)*, pp. 1–14 (2008).
- [34] Dutta, P., Haggerty, S. D., Chen, Y., Liang, C. J. M. and Terzis, A.: Design and Evaluation of a Versatile and Efficient Receiver-initiated Link Layer for Low-power Wireless, *Proceedings of the 8th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys'10)*, pp. 1–14 (2010).
- [35] Dunkels, A.: The ContikiMAC Radio Duty Cycling Protocol, Technical Report T2011:13, SICS (2011).
- [36] Gutierrez, J. A., Naeve, M., Callaway, E., Bourgeois, M., Mitter, V. and Heile, B.: IEEE 802.15.4: A Developing Standard for Low-Power, Low-Cost Wireless Personal Area Networks, *IEEE Network*, Vol. 15, No. 5, pp. 12–19 (2001).