

ウェイクアップ受信機を用いた省電力無線通信技術についての研究

代表研究者

湯 素華

電気通信大学大学院 情報理工学研究科 助教

1 はじめに

近年、通信のトラフィックをセルラー網からオフロードするために、スマホ等の移動端末による無線 LAN 経由のトラフィックが急増しつつある。無線 LAN において、各端末は、共通のチャンネルを共有しながらアクセスポイント (AP) と通信を行う。同時送信による送信衝突を回避するために、各端末はチャンネルを持続的に観測する (通常キャリアセンスと呼ぶ) [1]が、このキャリアセンスに、高消費電力の無線 LAN モジュールが用いられるため、多量の電力が消費される。

本研究では、低消費電力のウェイクアップ受信機 (WuR) と無線 LAN モジュールを緊密に統合し、無線 LAN モジュールの代わりに、ウェイクアップ受信機を用いてキャリアセンスを行い、送信が始まる直前に無線 LAN モジュールを起動させる。ただし、ハードウェアの制約で、無線 LAN モジュールは起動する際遅延が発生するため、それにより誤起動が発生し、省電力効果が低下する。本研究では、無線 LAN モジュールの誤起動問題への対策を提案し、シミュレーションにより無線 LAN モジュールの動作時間を大幅に削減できることを示す。

2 WuR と無線 LAN モジュールを統合するフレームワーク

センサノードの省電力化のために、WuR に関する研究は多く行われている [2]。WuR の消費電力を低く抑えるために、ウェイクアップ信号は、通常、単純なオン・オフ・キーイング (OOK) 変調によって送信される。無線 LAN のウェイクアップ制御では、導入コストを削減するために、無線 LAN モジュールを使ってウェイクアップ信号を送信する方式も提案されている。WuR は無線 LAN の信号を復号できないが、下記のいずれの方法でこの問題が解決できる。(i) 無線 LAN 信号のフレーム長 (物理的送信時間) を変調する [3][4]。(ii) ウェイクアップ制御のために無線 LAN 信号のプリアンプルのシンボルレートを下げる [5]。(iii) OOK 信号の送信を模倣できるように、無線 LAN モジュールを再設計する [6]。いずれの方法では、同じチャンネルが WuR と無線 LAN モジュールによって共有され、本研究でもこのポリシーを採用する。以下では、(i) フレーム長変調を例とするが、提案方法は、(ii) および (iii) にも適用できる。

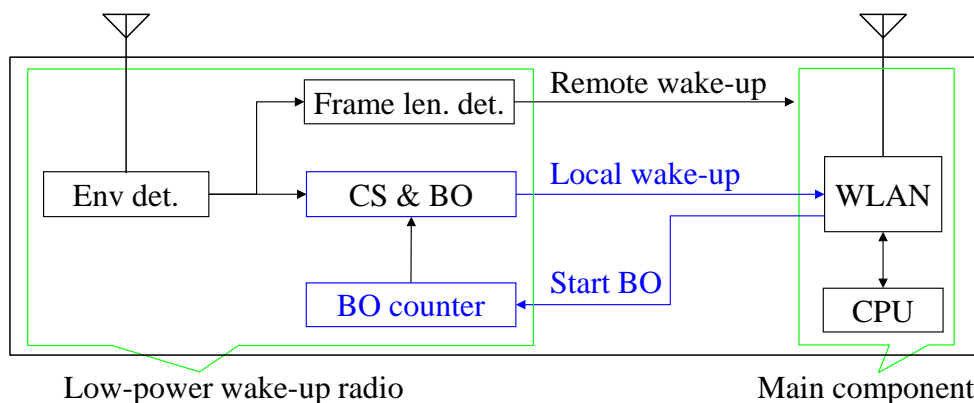


図 1 端末モデル。各端末は、CPU や無線 LAN モジュールのほかに、リモートウェイクアップ、キャリアセンス、およびローカルウェイクアップ用の低電力ウェイクアップ受信機が搭載される。

図 1 に端末モデルを示す。各端末は、無線 LAN モジュールと同じチャンネルで動作する低消費電力の WuR が搭載される。WuR は下記の 2 つのモードがある。(i) (AP から) 遠隔ウェイクアップ制御モード。ウェイクアップ ID は、無線 LAN 信号のフレーム長 (物理的送信時間) を変化させて送信され、包絡線検波およびフレーム長検出によって受信される。WuR 以外の部分をスリープさせ、それらを WuR が AP からのウェイクアップ要

求に応じて起動させるモードであり、端末がダウンリンク受信待ちの長期間のアイドル状態に適用できる。

(ii) ローカルウェイクアップ制御。無線 LAN モジュールのみスリープさせ、WuR は、受信信号の包絡線をキャリアセンス閾値 (CS_{th}) と比較することにより、チャンネルが送信のために使用できるタイミングで無線 LAN モジュールを起動させるモードであり、アップリンク送信などの短期間のアイドル状態に適用できる。以前既に(i)に対する研究を行ったため、以下では、主に(ii) ローカルウェイクアップ制御に焦点を当てる。また、WuR がキャリアセンス閾値 (CS_{th}) レベルの無線 LAN 信号の包絡線を検出できるものとする。

無線 LAN では、各無線 LAN モジュールはパケットを送信しようとする際チャンネルがビジーであれば、チャンネルが再びアイドルになるまで待機する。送信が終る瞬間では、複数の無線 LAN モジュールが同時にチャンネルアイドルを検出するため、これは衝突率が最も高いタイミングである。衝突を回避するために、各無線 LAN モジュールは、コンテンションウィンドウ (CW) に基づいてバックオフカウンタにランダム初期値を設定し、スロットごとにキャリアセンスを行い、どの端末が送信するかを決定する。各無線 LAN モジュールは、スロットの開始時にチャンネルがアイドルであるかどうかをチェックする。アイドルであれば、バックオフカウンタは 1 だけ減少し、バックオフカウンタが 0 になると、受信から送信に切り替わり、次のスロットで送信を開始する。

WuR は、無線 LAN モジュールのキャリアセンス機能を模倣する。WuR のキャリアセンス機能は、同端末の無線 LAN モジュールがバックオフカウンタを設定することにより、開始される。その後、無線 LAN モジュールはスリープに移る。その代わりに、WuR は、受信信号に対して包絡線検波を行い、スロットごとに包絡線を CS_{th} と比較する。チャンネルがアイドルであれば、バックオフカウンタを 1 だけ減少し、そうでなければ、バックオフカウンタを変更しないままにする。バックオフカウンタが 0 に達すると、WuR は同端末の無線 LAN モジュールを起動させる。ウェイクアップ遅延がない場合、無線 LAN モジュールは直ちにウェイクアップし、次のスロットで送信を開始する。ここで、無線 LAN モジュールは、CW 管理（例えば、送信失敗の場合、CW を倍増し、送信成功の場合、CW を最小値にリセットする）とバックオフカウンタの（現在の CW に基づいて）初期化を行う。

3 ウェイクアップ遅延の影響とその解決策

WuR からのウェイクアップ指示を受けると、無線 LAN モジュールはスリープ状態からアウェイク状態に遷移するが、ハードウェアの制約で、クロックおよびキャリア周波数が安定するまで送信を開始できない。以下では、ウェイクアップ遅延の影響について説明し、シンプルで効果的な解決策を提案する。

3-1 ウェイクアップ遅延の影響

IEEE802.11[1]では、DIFS (Distributed coordination function IFS) より短いスペースをチャンネルビジー、DIFS 以上のチャンネルスペースをチャンネルアイドルと見なす。パケットの送信は、通常、イニシエータ (送信端末) とレスポнда (受信端末) との間で交換される一連の連続したフレームを含む。通信中の 2 つの端末は、チャンネルが他の端末により占有されないように、フレーム間スペースを DIFS より短く保つことが必要である。

リモートウェイクアップ制御では[2][5][7][8]、送信端末がすでにチャンネルを占有しており、受信端末を起動させて通信を完了させる。ウェイクアップ遅延により受信端末は直ちに応答することはできないが、送信端末はいくつかの方法でチャンネルを保持することができる。例えば、センサネットワークにおいては、送信端末は長いプリアンブル (B-MAC [9]) を送信する、又は短いプリアンブル (X-MAC[10]) を周期的に繰り返す。無線 LAN において、ダウンリンクのウェイクアップが同様にできる。

しかし、アップリンクでは、それは全く異なる。各端末は、イニシエータとして送信する前に、チャンネルを獲得しなければならない。ここで、各端末の WuR はキャリアセンスを行い、チャンネルがアイドルになり送信できる直前に、無線 LAN モジュールなどを起動させる。チャンネルを獲得した無線 LAN モジュールは、ウェイクアップ遅延のために直ちに送信できない。競合に勝った端末がその無線 LAN モジュールを起動させるウェイクアップ期間に、チャンネルをアイドルとして検出している他の WuR は、バックオフカウンタを減少し続けている。そして、複数の WuR のバックオフカウンタはウェイクアップ期間に 0 になる可能性がある。一番目の端末を除いて、他の端末は実際に誤って起動される。無線 LAN モジュールは、送信する前にもう一度キャリアセンスを行い、チャンネルビジーを検出して同時送信を回避できるが、誤起動はローカルウェイクアッ

ブ制御の省電力効果を低下させてしまう。

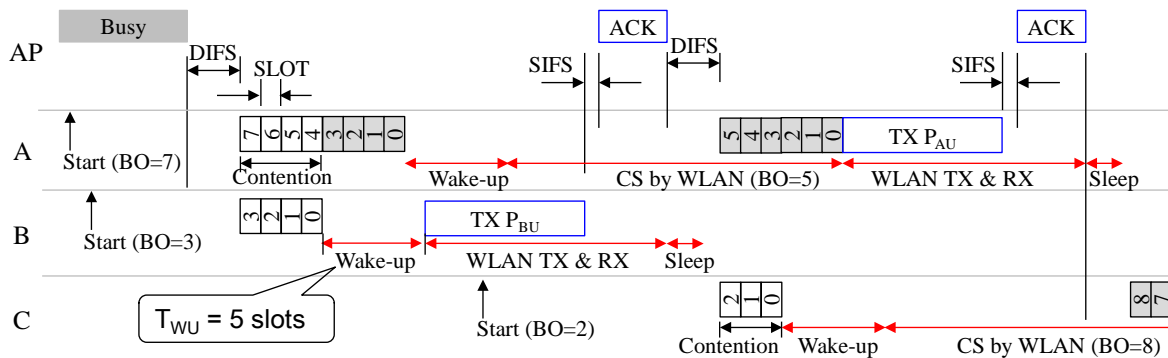


図 2 AP と 3 つの端末 A、B、C からなる無線 LAN のアップリンクにおいて、ウェイクアップ遅延の影響を受ける例 ($T_{WU} = 5$)。

図 2 はウェイクアップ遅延が $T_{WU} = 5$ スロットの例を示す。端末 A と B はパケットを AP に送信しようとするが、チャンネルはビジーである。端末 A はバックオフカウンタを 7 に、端末 B はバックオフカウンタを 3 に設定した。チャンネルがアイドルになった後の DIFS、A および B の WuR がチャンネルを競い合う。B のバックオフカウンタは先に 0 になり、端末 B の無線 LAN モジュールは起動され、データフレーム P_{BU} を AP に送信し、AP から ACK フレームを受信する。端末 B のウェイクアップ期間中、チャンネルはアイドルなままなので、A の WuR はそのバックオフカウンタを減少し続け、端末 B が送信を開始する前にそれも 0 に達してしまう。端末 A に送信前にキャリアセンスを再実行させることにより、同時送信を回避できるが、その無線 LAN モジュールは起動されてしまう。次に、端末 C は、フレーム P_{CU} を AP に送信しようとする。その WuR のバックオフカウンタを 2 に設定した。端末 A の無線 LAN モジュールは、バックオフカウンタに相対的に大きな値 5 を設定したが、起きたままでウェイクアップ遅延がないため、先に送信を開始し、端末 C は後で誤って起動される。すなわち、WuR および無線 LAN モジュールを介したハイブリッドバックオフメカニズムは、より多くの誤起動につながる。

3-2 ウェイクアップ遅延への対策

WuR はビジー信号[11]を送信してチャンネルを占有すれば、この問題を回避できるが、WuR の消費電力を低減するためには、同期検波の代わりに包絡線検波が使用される。すなわち、WuR は、安定したキャリアを維持せず、すぐにビジー信号を送信することもできない。

この問題は 2 つの側面から解決する。(i) 誤起動が発生した場合のキャリアセンス機構の回復方法、および (ii) 誤起動率の低減方法。

(i) に関しては、各 WuR はウェイクアップ期間中にバックオフカウンタ (C_{B0}) を凍結することを模倣する。WuR の C_{B0} は、チャンネルがアイドルである限り、0 に達しても、マイナスのほうへ連続的にカウントダウンし、チャンネルが実際にビジーになると減少を停止する。チャンネルが再びビジーになるタイミングで、 C_{B0} が $-T_{WU}$ より大きい場合、ウェイクアップ期間に入るタイミングで C_{B0} が 0 より大きく、 C_{B0} が T_{WU} の分を誤って減少した。したがって、WuR は、 C_{B0} を $C_{B0} + T_{WU}$ にリセットする。これは、ウェイクアップ期間に入るときの C_{B0} の値である。WuR は、 C_{B0} が 0 になったときに無線 LAN モジュールを起動させる。無線 LAN モジュールが誤起動してチャンネルがビジーであることを検出すると、再びスリープに移る。

例えば、図 3 では、端末 A、B、C は図 2 と同じタイミングで送信しようとする。端末 B は、先にチャンネルを獲得する。A のバックオフカウンタは、B のバックオフカウンタが 0 になる際、4 まで減少した。WuR A は、そのバックオフカウンタを減少し続け、0 になる時点で無線 LAN モジュールを起動させ、さらに、B の送信開始によるチャンネルビジーを検知するまで、そのバックオフカウンタを -1 まで減少させる。したがって、WuR A は、バックオフカウンタを $-1 + T_{WU} = 4$ にリセットし、ウェイクアップ遅延の影響を除去する。その無線 LAN モジュールは再びスリープする。端末 B の送信が終了後、WuR A および C はチャンネルを競い合う。WuR A は、バックオフカウンタを 4 から減少させ、再びその無線 LAN モジュールを誤って起動させてしまう。端末 A からの送信は、C の後に行われることになる。端末 A は、他の端末が送信している間に待機しなければならない

いが、消費電力の高い無線 LAN モジュールは迅速にスリープ状態に移るため、消費電力が抑えられる。

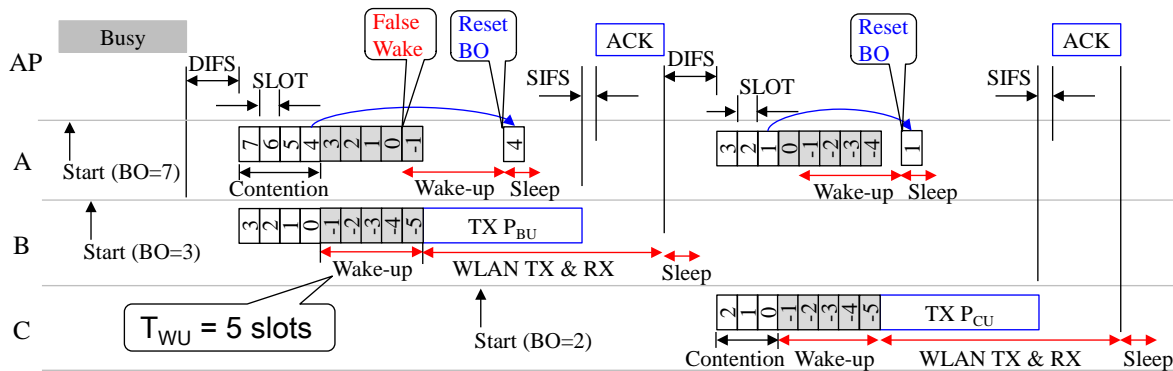


図 3 ウェイクアップ遅延への対策。ウェイクアップ期間中に誤起動の端末は直ちにスリープ状態に移り、そのバックオフカウンタはウェイクアップ期間の開始時の値にリセットされる ($T_{WU} = 5$)。

(ii) は以下のように説明する。WuR は、ウェイクアップ期間に入るタイミングで、 C_{BO} が 0 より大きく T_{WU} よりも小さい場合、無線 LAN モジュールを誤って起動させる。大きな CW を使用してバックオフカウンタの初期値の差を大きくすることで、誤起動率を低減できるが、より多くのアイドルスロットが生じる。今後、誤起動（エネルギー消費）とアイドルチャネル（スペクトル効率）との間のトレードオフを取るように CW を調整する方法について検討し続ける。

3-3 実装に関する議論

WuR の基本要件は低消費電力である。したがって、WuR は通常、包絡線検波やフレーム長検出（または OOK 検出）など、単純なタスクしか処理しない。提案方法では、(i) WuR が無線 LAN チャンネルのアイドルスロットを正しくカウントし、(ii) 起動された無線 LAN モジュールは、その WuR の期待されるタイミングで信号を送信し、チャンネルを占有することを実現するために、WuR と無線 LAN モジュールは十分に同期されることが必要である。この意味では、2 つの部分を緊密に統合する必要があり、これは、ハードウェア技術の進歩により可能である。

概念上、WuR と無線 LAN モジュールはそれぞれ独立部分であるが、[5] と同様に、無線 LAN モジュールの回路の一部を再利用して WuR の機能を実現することも可能である。それにより、ハードウェアのコスト削減と、WuR と無線 LAN モジュールの緊密な統合が容易になると考えられる。

4 シミュレーション評価

シミュレーションにより提案方式を評価する。(i) WuR なしの従来の CSMA 方式、(ii) キャリアセンスに WuR を使用するがウェイクアップ遅延を解決しない WuR-CS 方式、(iii) WuR-CS に基づき、誤起動の無線 LAN モジュールをスリープさせ、ウェイクアップ期間にバックオフカウンタ凍結メカニズムを模倣する WuR-BOF 方式、(iv) WuR と競合のないスキームを統合する WuR-CF 方式、の四つの方式を比較し、提案方式 WuR-BOF の有効性を確認する。公平に比較するために、CSMA では、無線 LAN モジュールは、送信（または再送信）パケットがある場合にのみ起動される。それ以外の場合は、スリープ状態に移る。衝突のない WuR-CF は、スループットの上限と、無線 LAN モジュールのデューティ比の下限を示す。

表 1 シミュレーションのパラメータ

PHY	IEEE 802.11a
MAC	CSMA, $T_{SLOT}=9\mu s$, $T_{SIFS}=16\mu s$, $T_{DIFS}=34\mu s$
パケット	$L=2,000$ bytes (パケット連結あり)
データレート	信号対雑音比から算出
コンテンションウィンドウ	$CW_{min}=15$, $CW_{max}=1023$
遅延	起動: $22 \times T_{SLOT}$, スリープ: $2 \times T_{SLOT}$
消費電力	無線 LAN モジュール: 受信・アイドル 1W, 送信 1W

パケットレベルのシミュレーションは Matlab 環境で実装され、すべての結果は 50 回実行結果の平均値である。主なシミュレーションパラメータを表 1 に示す。

複数のノードが競い合って同じ AP へ送信する無線 LAN のアップリンクシナリオを使用する。パケットあたりの（無線 LAN モジュールの）デューティタイム（動作時間）、端末あたりのデューティ比（動作時間の割合）を主な評価指標とする。

まず、端末数を 10 に固定した飽和シナリオで、ウェイクアップ遅延を変化させて性能評価を行う。図 4 と図 5 はそれぞれ、パケットあたりのデューティタイムと端末あたりのデューティ比を示す。飽和状態の場合、CSMA では、各無線 LAN モジュールは、ほとんど常にスリープモードに入ることなく起きている。したがって、CSMA のデューティタイムはウェイクアップ遅延と無関係に一定である。WuR-CS では、誤起動の影響で、無線 LAN モジュールの動作時間は、ウェイクアップ遅延 T_{wu} の増加に伴い急増し、一定値に近づく。 T_{wu} が小さい場合、WuR-BOF および WuR-CF は、WuR-CS よりパケットあたりの動作時間がはるかに短い。WuR-CF では、10 端末がほぼ等しくチャンネルを共有するため、端末あたりのデューティ比は 0.1 に近い。 T_{wu} が 10 以下の場合、WuR-BOF では端末あたりのデューティ比が 0.2 以下である。

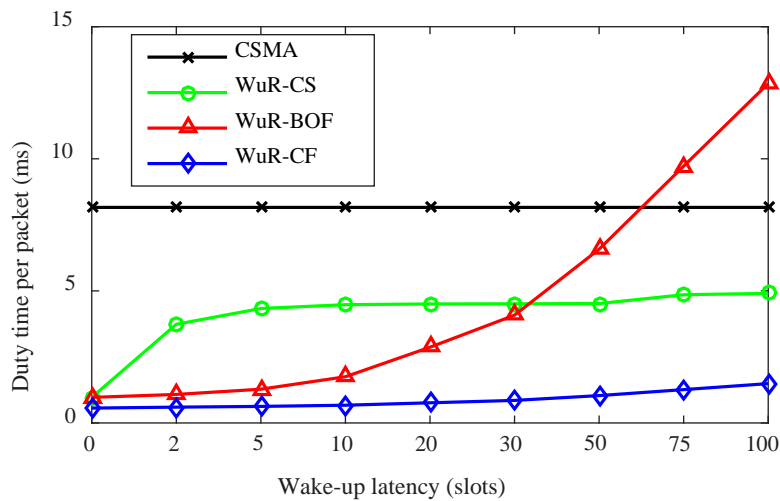


図 4 無線 LAN モジュールのパケットあたりのデューティタイム。

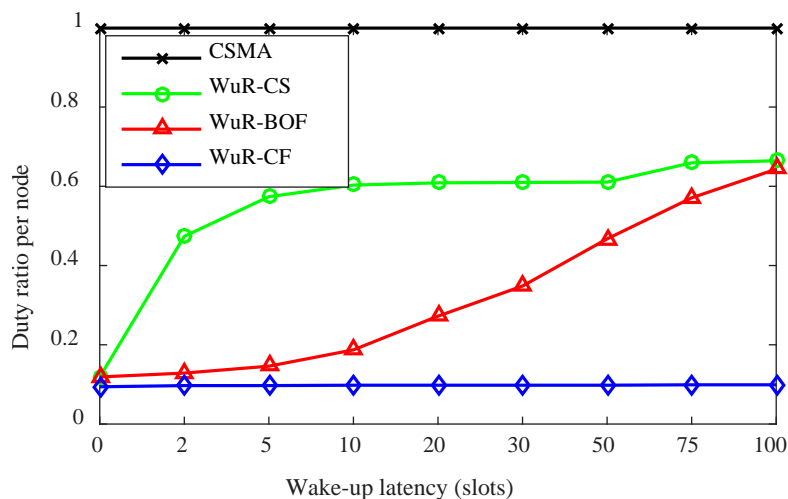


図 5 無線 LAN モジュールの端末あたりのデューティ比。

ウェイクアップ遅延は実際のデバイスに依存し、主に高周波クロックによって決められる。[5]によれば、クロックレート 1 と 1/4 の切り替えには $139 \mu s$ かかり、MAX7032 では、周波数が所定のキャリアの 50kHz 以内に落ち着くまで約 $200 \mu s$ かかり、これは $T_{wu} = 22$ スロットに対応する。このウェイクアップ遅延では、WuR-BOF は WuR-CS よりパケットあたりのデューティタイムおよび端末あたりのデューティ比がはるかに小さ

いことが確認できる。

図 6 と図 7 は、ウェイクアップ遅延が $T_{w} = 22$ スロットに固定され、端末数を変化させる際の、パケットあたりのデューティタイムと端末あたりのデューティ比を示す。ウェイクアップ遅延が固定であるため、端末数とともに誤起動の回数は（ほぼ直線的に）増加し、パケットあたりのデューティタイムも増える。端末あたりのデューティ比は、端末の数が増えるにつれて減少するが、傾向が異なる。端末数が 40 の場合、端末あたりのデューティ比は、WuR-CF では端末数の逆数である 2.5% に近く、WuR-BOF では 20% に近く、WuR-CS では 50% を超えてしまう。WuR-CF と WuR-BOF との間の大きなギャップは、今後の更なる改良余地を示している。

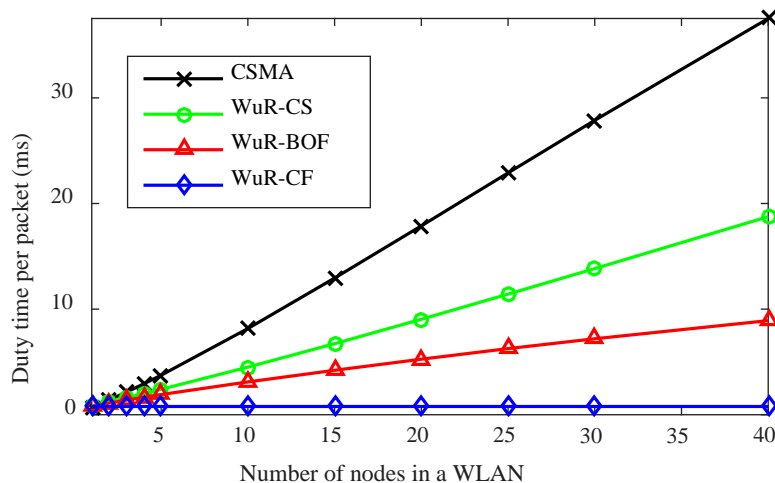


図 6 無線 LAN モジュールのパケットあたりのデューティタイム。

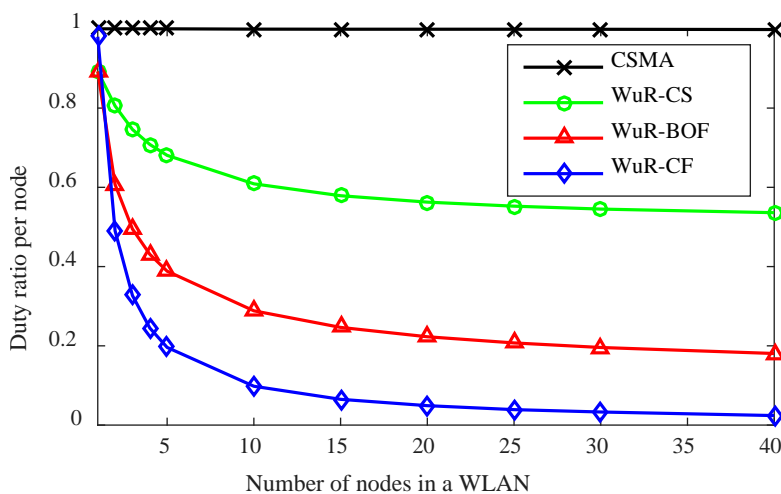


図 7 無線 LAN モジュールの端末あたりのデューティ比。

上記の結果に基づき、短いアイドル時間でのウェイクアップ制御は、ウェイクアップ遅延が短い場合のみ有効であることがわかる。ウェイクアップ遅延がパケット送信時間に比べて相対的に大きい場合、パケットあたりのスリープ/ウェイクアップオーバーヘッドは大きいため、ウェイクアップ制御効果が低下する。フレーム連結[15]を導入することにより、パケットあたりのオーバーヘッドを低減させることが可能である。

5 まとめ

本研究では、低消費電力の WuR と高消費電力の無線 LAN モジュールを緊密に統合し、WuR をキャリアセンスとローカルウェイクアップ制御に使用することで、無線 LAN の制御とデータ送信を分離する方法について検討した。しかしながら、この方針は、無線 LAN モジュールのウェイクアップ遅延が無視できない場合誤起

動問題を招く。そこで、ウェイクアップ遅延の影響を分析し、誤起動された無線 LAN モジュールのバックオフカウンタを、ウェイクアップ期間に凍結されたかのように、リセットする単純で効果的なソリューションを提案した。このように、キャリアセンスは WuR により実現され、誤起動された無線 LAN モジュールは、ウェイクアップ遅延が小さいときにスリープ状態に移ることができる。シミュレーション評価により提案方式の有効性を確認した。また、提案方式を改善する余地があり、今後、誤起動率を減らすよう、コンテンツウィンドウの調整方法について検討し続ける。

【参考文献】

- [1] Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specification, IEEE Std. 802.11, 2012.
- [2] I. Demirkol, C. Ersoy, and E. Onur, “Wake-up receivers for wireless sensor networks: Benefits and challenges,” IEEE Wireless Commun. Mag., vol. 16, no. 4, pp. 88–96, 2009.
- [3] K. Chebroly and A. Dhekne, “Esense: Communication through energy sensing,” in Proc. ACM MobiCom’09, 2009, pp. 85–96.
- [4] Y. Kondo, H. Yomo, S. Tang, M. Iwai, T. Tanaka, H. Tsutsui, and S. Obana, “Energy-efficient WLAN with on-demand AP wake-up using IEEE 802.11 frame length modulation,” Computer Communications, vol. 35, no. 14, pp. 1725–1735, 2012.
- [5] X. Zhang and K. G. Shin, “E-MiLi: Energy-minimizing idle listening in wireless networks,” IEEE Trans. Mobile Comput., vol. 11, no. 9, pp. 1441–1454, Sep. 2012.
- [6] M. Park, S. Azizi, R. Stacey, and J. Liu, “Low-power wake-up receiver (LP-WUR) for 802.11,” IEEE, Tech. Rep. doc.:IEEE 802.11-15/1307r1, Nov. 2015.
- [7] S. Tang, H. Yomo, and Y. Takeuchi, “Optimization of frame length modulation-based wake-up control for green WLANs,” IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 64, no. 2, pp. 768–780, 2015.
- [8] J. Oller, I. Demirkol, J. Casademont, J. Paradells, G. Gamm, and L. Reindl, “Has time come to switch from duty-cycled MAC protocols to wake-up radio for wireless sensor networks?” IEEE/ACM Trans. Netw., vol. 24, no. 2, pp. 674–687, Apr 2016.
- [9] J. Polastre, J. Hill, and D. Culler, “Versatile low power media access for wireless sensor networks,” in Proceedings of the 2Nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems, ser. SenSys ’04, 2004, pp. 95–107.
- [10] M. Buettner, G. V. Yee, E. Anderson, and R. Han, “X-MAC: A short preamble MAC protocol for duty-cycled wireless sensor networks,” in Proceedings of the 4th International Conference on Embedded Networked Sensor Systems, ser. SenSys ’06, 2006, pp. 307–320.
- [11] F. Tobagi and L. Kleinrock, “Packet switching in radio channels: Part ii—the hidden terminal problem in carrier sense multiple-access and the busy-tone solution,” IEEE Trans. Commun., vol. 23, no. 12, pp. 1417–1433, Dec 1975.
- [12] F. R. Dogar, P. Steenkiste, and K. Papagiannaki, “Catnap: Exploiting high bandwidth wireless interfaces to save energy for mobile devices,” in Proc. ACM MobiSys’10, 2010, pp. 107–122.

〈発表資料〉

題名	掲載誌・学会名等	発表年月
Energy and spectrum efficient wireless LAN by tightly integrating low-power wake-up radio	Proc. IEEE PIMRC’16	2016/9
Tight integration of wake-up radio in wireless LANs and the impact of wake-up latency	Proc. IEEE Globecom 2016	2016/12