

推薦論文

無線LANインタフェースを用いた 低消費電力遠隔起動の実現

石原 丈士^{1,a)} 古川 剛志¹ 坂本 岳文¹ 小倉 浩嗣¹
鎌形 映二¹ 大山 裕一郎¹ 村上 貴臣¹

受付日 2012年6月11日, 採録日 2012年11月2日

概要: 超低消費電力で無線信号を待ち受け, 信号受信時に起動トリガを発生させるウェイクアップICを開発した. これを用いることにより, 無線LAN端末はスリープしているネットワーク機器を起動させることができ, 端末を使用するときだけネットワーク機器も動作させることでシステム全体の低消費電力化が実現できる. 本論文では, 無線LANインタフェースを用いてウェイクアップICへ制御信号を送信する方法を提案し, プロトタイプの開発とその評価について述べる. 本提案ではIEEE 802.11に従わないタイミングでのフレーム送信を行うが, 無線LANインタフェースのハードウェアを変更することなく実現できることを示す. また, 既存無線LAN機器および電子レンジなどの家電機器からの電波干渉の影響について評価した. 評価の結果, 無線LANと同等の耐干渉性能であることを確認した.

キーワード: ウェイクアップIC, 遠隔起動, 低消費電力ネットワーク, 待機電力, ホームネットワーク, 無線LAN

An Embodiment of Low Power Remote Wake-up Using a Wireless LAN Interface

TAKESHI ISHIHARA^{1,a)} TSUYOSHI KOGAWA¹ TAKAFUMI SAKAMOTO¹ KOJI OGURA¹
EIJI KAMAGATA¹ YUICHIRO OYAMA¹ TAKAOMI MURAKAMI¹

Received: June 11, 2012, Accepted: November 2, 2012

Abstract: We have developed a low power wake-up IC, which outputs trigger signals as receiving of designated signals. Using the IC, power consumption of an entire network system can be reduced because a wireless LAN terminal can wake sleeping network equipments up on demand. In this paper, a transmission method of the wake-up signals for it using a common wireless LAN interface is proposed. Evaluations using our prototype, which is developed using an IEEE 802.11b compliant WLAN interface with modified firmware, show the feasibility and the coexistence of the method and IEEE 802.11 wireless LAN. In addition, coexistence with some home appliances which emit 2.4 GHz radio wave is confirmed.

Keywords: wake-up IC, remote wake-up, standby power, home network, wireless LAN

1. 背景

近年, 省エネルギーが強く志向され, ネットワークの分野でも消費電力を削減する多くの技術が提案・実用化されている. その1つとして, 未使用時は低消費電力な状態に遷移させておき, 遠隔からの指示で動作状態に復帰させる

方法がある.

復帰指示の方法は, Wake On LAN など [1], [5], [6], [7] が用いられている. また, 通信プロトコルと連携し, 低消費電力な状態に遷移した機器の状態管理と復帰を制御する方法も実用化されている [2], [3], [11].

¹ 株式会社東芝
Toshiba Corporation, Kawasaki, Kanagawa 212-8582, Japan
^{a)} takeshi3.ishihara@toshiba.co.jp

本論文の内容は 2011 年 7 月のマルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICO2011) シンポジウム 2011 にて報告され, 同プログラム委員長により情報処理学会論文誌ジャーナルへの掲載が推薦された論文である.

しかしながら、このような既存方法は復帰指示を待ちうけるために電力を消費したり、事前に決められたタイミングでしか指示を受け付けられないなどの問題があった。そこで、非常に小さな電力で無線信号を受信して起動トリガを発生させる方法が提案されはじめている [8], [12], [13]。筆者らの研究グループでも超低消費電力無線ウェイクアップ IC（以下、ウェイクアップ IC）を開発し [9], [10]、ネットワークシステムへの応用を検討している [14]。

本論文では、ウェイクアップ IC を用いたネットワークシステムの実現に必要な制御信号の送信方法を提案する。また、その主な適用先を家庭（ホームネットワーク）とし、家庭内で制御信号を送信する際に問題となる電波干渉の影響について実機を用いて評価する。はじめに 2 章で本研究の関連研究を概観し、3 章で筆者らのグループで開発したウェイクアップ IC の概要と、ネットワークシステムへの適用可能性について述べる。続く 4 章で無線 LAN インタフェースを使った制御信号の送信方法を提案する。5 章でプロトタイプの実装を示し、6 章でその評価を示す。最後に 7 章でまとめる。

2. 関連技術

本論文が対象とするネットワークシステムの低消費電力化手法は、大きく 2 つの技術で構成されている。1 つは、ネットワークシステムとして動作を継続できるようにするための技術であり、もう 1 つは復帰指示を送受信する技術である。本章ではこれらの技術について整理する。

2.1 動作継続のための技術

低消費電力な状態に遷移したネットワーク機器は、パケットの送受信ができない。そのため、ARP や SSDP などの通信プロトコルや新たに通信を開始する手順に対して、特別な対応が必要となる。たとえば、UPnP Low Power [11] や Apple 社の Bonjour [2], ECMA-393 として策定された ProxZzzy [3] では、機器の状態遷移に対応した処理が追加されている。具体的には、状態遷移する機器が自らの状態やサポートする復帰指示の受信方法をネットワーク内に通知する機能や、応答できない機器の代わりに問合せに答える機能、復帰指示を送信する機能などである。

これらの通信プロトコルは、復帰指示を送受信する方法を限定していない。したがって、本論文の提案技術はこれらとともに使用でき、かつ機器のさらなる低消費電力化に貢献するものである。

2.2 復帰指示の送受信に関する技術

Wake on LAN は、通常の通信に用いるネットワークインタフェースを使用して復帰指示を待ち受ける方法の 1 つである。復帰指示はフレーム内に特定のパターンを含めることによって実現する。パターンは自身の MAC アドレス

が 16 回連続するものが主流であるが、ARP 要求などが利用できる機器もある。

この方法は、動作状態で使用するネットワークインタフェースを用いるため、新たなハードウェアは不要である。また、復帰指示の到達範囲が復帰後の通信範囲と同じという利点がある。一方、比較的高速な通信インタフェースで指示を待ち受けるため、消費電力が高くなる傾向がある。また、その電力を支えるために電源回路にも通電が必要となり、機器全体の消費電力が高くなりやすい。

この問題を解決するため、より少ない消費電力で復帰指示を待ち受ける方法が提案されている。たとえば、文献 [1] では Bluetooth を、文献 [7] では 915 MHz 帯の無線機をそれぞれ用いて、復帰指示を待ち受ける方法が示されている。これらの方法は低消費電力であるが、復帰信号の送受信に専用ハードウェアが必要になる。

そこで文献 [5] では、送信側は既存 IEEE 802.11 のインタフェースを利用し、受信側にさらに低消費電力な IEEE 802.15.4 の受信機を用いる方法が示されている。しかしながら、この方法では 2.4 GHz 帯の電波を検出して復帰する方法しか示されておらず、ネットワークに接続する複数台のノードから、特定のノードを選択して復帰させることは困難である。

このような状況に対して、近藤らのグループは文献 [12], [13] で、送信側に通常の IEEE 802.11 インタフェースを使用し、受信側に非常に低消費電力なウェイクアップ IC を用いる方法を提案している。提案方法では、復帰指示を構成するビットパターンと IEEE 802.11 のフレーム長との間に 1:1 の対応関係を設け、復帰指示を長さが異なる複数の IEEE 802.11 フレームの組合せで表現する。復帰指示に ID を持たせているため、特定のノードだけを復帰させることも可能である。

近藤らの技術は従来研究に残る多くの欠点を解決しているが、復帰指示の受信処理に短い時間間隔でのサンプリングを要求する信号となっている。そのため、高速に動作する受信機が必要となり、ウェイクアップ IC の消費電力が高くなる可能性がある。また、実環境における他の IEEE 802.11 ノードや同一周波数帯を使用する他の無線機器との共存に関する評価がなされていない。

これらの関連技術をふまえ、本論文の新規性は以下の 2 点といえる。第 1 に、ウェイクアップ IC の消費電力を抑えながら既存 IEEE 802.11 のインタフェースを活用する復帰指示の送信方法を提案することである。第 2 に、筆者の知る限り、これまで示されていない実環境での評価とその結果を示すこと、である。

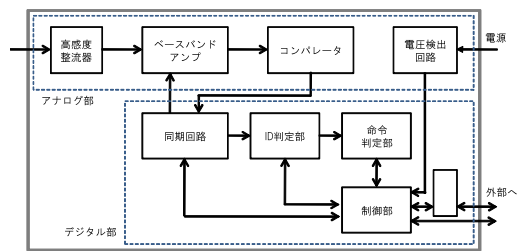


図 1 ウェイクアップ IC の機能ブロック図

Fig. 1 Functional block diagram of the ultra low power wake-up IC.

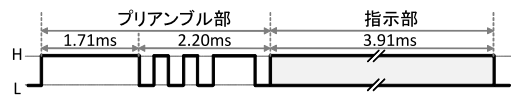


図 2 制御信号の構造

Fig. 2 Format of the wake-up signal.

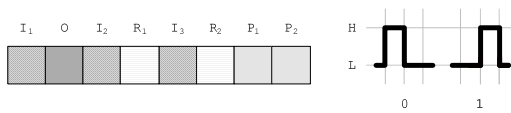


図 3 指示部の構造

Fig. 3 Format of the instruction part.

3. ウェイクアップ IC とそのネットワークシステムへの適用可能性

3.1 ウェイクアップ IC の概要

筆者らのグループが開発したウェイクアップ IC は特定の無線信号（以下、制御信号）を受信してパルス信号を出力する機能を持つ。その特徴は信号待受時の消費電流が $6\mu A$ [4] と小さいことである。このため大容量コンデンサに蓄積した電荷だけで動作させることができ、外部電源回路を含めて電源をオフにすることができる。

本 IC は自動利得制御機能を備えており、周辺の電波状況に応じて制御信号の検出レベルを調整することができる。また、受信感度を高めるために BPF (Band Pass Filter) を搭載していない。このような特徴を持つ、本 IC の機能ブロック図を図 1 に示す。

3.2 ウェイクアップ IC の制御信号

図 2 と図 3 に制御信号のフォーマットを示す。プリアンブル部はウェイクアップ IC が制御信号の先頭を検出するために使用する。指示部の各ビットの値は 2 値 PPM (Pulse Position Modulation) を用いて表現され、その機能は表 1 のとおりである。本 IC は受信した電波に対して包絡線検波を行い、これらのフォーマットに従うことを確認する。さらに、ID ビットが一致している場合にパルス信号を出力する。なお、制御信号の長さは、受信処理に要する消費電力や受信機を構成する部品の要求性能とコスト、他の電波から受ける干渉の影響などを考慮して決定した。

表 1 指示部を構成するビットの役割

Table 1 Functions of each bits of the instruction part.

ビット種別	役割
ID ビット (I_n)	受信先を特定する識別子を指定する。
命令ビット (O)	制御検出時に出力するパルス信号の種別を指示する。
パリティビット (P_n)	エラー検出用のパリティビット。算出方法は次のとおりである。 $P1 = I1 \oplus I2 \oplus I3$ $P2 = O \oplus R1 \oplus R2$
予約ビット (R_n)	将来の拡張に備えるために予約されたビット。0 を指定する。

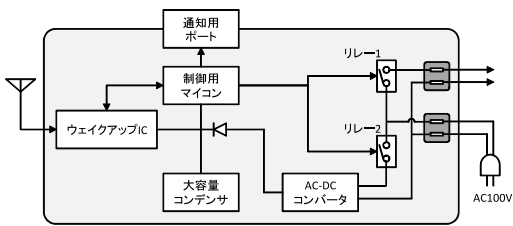


図 4 ウェイクアップ IC を用いた電源制御モジュールの機能ブロック図

Fig. 4 Functional block diagram of power control module based on the wake-up IC.

3.3 ネットワーク機器への適用

ウェイクアップ IC は命令ビットにより 2 種類の信号を検出でき、それぞれ異なるパルス信号を出力する。この 2 つの信号を適切に解釈してスイッチを制御すれば、機器への電源供給を遠隔から制御できる。そこで、ネットワーク機器に後付けできる電源制御モジュールを検討した。その機能ブロック図を図 4 に示す。

以上のとおり、本ウェイクアップ IC は遠隔制御を用いたネットワーク機器の待機電力削減に適用できることが分かる。ただし、通信プロトコルと連携した効率的なシステムとするには、通信を開始するノードが制御信号を適切に送信する方法が必要である。

4. 無線 LAN インタフェースを使った制御信号送信方法

本章では、ウェイクアップ IC をネットワークシステムに適用する際に必要となる制御信号の送信方法を提案する。

4.1 無線送信装置に対する要求

制御信号を送信する無線装置は、既存のネットワーク機器を含めて多くの機器が利用できるものであって、さらに低コストで実現できなければならない。そのため、専用の無線装置を追加する方法は不適切であり、既存の無線装置を利用することが好ましい。

現在、ネットワーク機器において最も普及している無線装置は、IEEE 802.11 に準拠した無線 LAN インタフェー

スと考えられる．そこで本提案では，3.2 節で述べた制御信号を送信する無線装置として，無線 LAN インタフェースを用いる．

4.2 制御信号の形成方法

3.2 節で述べたように，本ウェイクアップ IC は包絡線検波により信号を検出するため，適切な周波数とタイミングで送信された電波であれば，その詳細は問わない．そこで提案方法では 3.2 節で述べた制御信号の ‘H’ の部分で IEEE 802.11 のフレームを送信し，‘L’ の部分では送信しないようにする．以降，‘H’ の部分で送信するフレームを制御信号フレームと呼ぶことにする．

無線 LAN インタフェースはすでに広く普及している反面，電波干渉が多く存在する．特に，2.4GHz 帯は ISM 帯 (The industry, science and medical radio bands) であるため，無線 LAN 以外の機器も多い．そのため，本方式の実用化には適切な干渉対策が必要であり，その方法は 4.5 節で述べる．なお，5GHz 帯は 2.4GHz 帯に比べて到達性に問題があるため採用しなかった．

4.3 無線 LAN インタフェースに対する機能要件

機能要件として以下があげられる．

- キャリアセンスとランダムバックオフを無効にできること．
- 制御信号で指定された時間に合致するフレーム長で信号を送信すること．
- IEEE 802.11 に準拠する動作と制御信号の送信を行う動作とを切り替えられること．

提案方式の信号を正しく作るには，フレームの送信タイミングを制御することが重要である．しかし，IEEE 802.11 で規定されるキャリアセンスやランダムバックオフに従う場合，外的要因により送信タイミングが変化してしまう．そのため，一時的にそれらを無効する必要がある．また，3.2 節で規定した信号長を実現するため，通常の無線 LAN 通信では使用しないフレーム長で送信する必要がある．

先にあげた 2 つの要件に従う制御は，IEEE 802.11 に準拠した無線 LAN インタフェースを実現するファームウェアでは実現できない．一方，4.1 節で述べたとおり，無線装置の追加は好ましくない．したがって，制御信号を送信するモードと IEEE 802.11 に従うモードとを 1 つのハードウェアで切り替えて使用できるようにする必要がある．

4.4 無線 LAN インタフェースの機能切替え

無線 LAN インタフェースの機能を切り替える方法として，デバイスドライバを拡張して ioctl() などのソフトウェアインタフェースを使って制御する方法が考えられる．ソフトウェアによる制御は無線 LAN インタフェースの設定などを操作するためにすでに用いられていることから，制

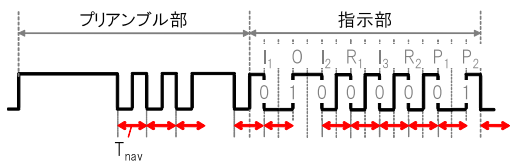


図 5 NAV の設定をとまう制御信号の例
Fig. 5 A wake-up signal with NAV setting.



図 6 制御信号送信部のプロトタイプ
Fig. 6 Prototype of the signal sending module.

表 2 制御信号送信部の構成部品
Table 2 Components of our prototype.

用途	部品名
無線 LAN インタフェース	東芝ディーエムエス製 N3227
制御用マイコン	ATMEL912
接続 I/F (USB シリアル I/F)	FT232RL

御ソフトウェアの変更も最小限で実現できると考える．

4.5 電波干渉への対策

提案方式は 3 つの方法で電波干渉の影響を低減させる．具体的には，パリティビットを用いた単一ビットエラーの修復，再送によるバーストエラーへの対応，IEEE 802.11 の NAV (Network Allocation Vector) を利用した無線 LAN 信号の送信抑制である．

制御信号フレームに NAV を設定することで，同じチャネルを使用する他の無線 LAN 機器からのフレーム送信を抑制し，干渉を未然に防ぐことができる．提案方式では制御信号の ‘L’ の区間に NAV を設定する．その際，提案方式は 2 値 PPM を用いるため，制御信号のすべてのパターンにおいて出現しうる ‘L’ の区間の最大長が事前に決定できる (01 を送信する場合に ‘HLLH’ となり，最も長く ‘L’ が続く)．このため，図 5 に示すようにシンボル長に相当する長さを NAV として設定すればよい．

5. プロトタイプの実装

4 章の提案に基づき制御信号送信部のプロトタイプを実装した (図 6)．その主要な構成部品は表 2 のとおりである．本送信部は，シリアル I/F を介してモジュール内の制御マイコンに指示を出し，同マイコンが制御信号を送信する仕組みとした．また，対応する電源制御モジュールは図 4 に基づき開発した (図 7)．なお，ウェイクアップ IC と制御用マイコンは図 7 の基板裏側に実装されている．

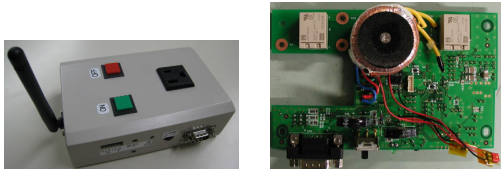


図 7 電源制御モジュールのプロトタイプ
Fig. 7 Prototype of the power control module.

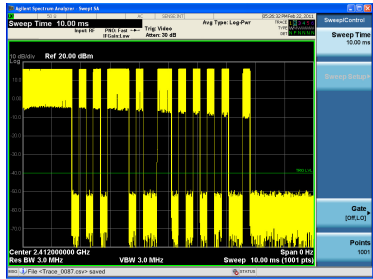


図 8 プロトタイプから送信された制御信号
Fig. 8 Recorded wake-up signal sent by our prototype.

6. 評価

5 章に示したプロトタイプを用いて、提案方式の実現性、無線 LAN との共存可能性を評価した。さらに提案方式の主たる適用先である家庭環境での使用を想定し、家電機器との共存可能性についても評価した。

6.1 動作の確認

はじめに、プロトタイプを操作して 3.2 節で述べた制御信号が送信できることを確認した。送信された信号をアナライザ (Agilent Technologies N9010A EXA シグナルアナライザ) で記録し、その波形を調べた。

6.1.1 評価結果

図 5 の信号を送信して記録された波形を図 8 に示す。この結果から、本提案に沿った信号が送信できていることが分かる。

6.1.2 考察

一般的な無線 LAN インターフェスは、無線信号を送受信する RF チップとマイコンとで構成されている。今回の実装ではマイコン上で動作するファームウェアを変更しているが、現在市販されている無線 LAN インタフェスも更新可能なソフトウェアを搭載している。そのため、他の無線 LAN インタフェスでもソフトウェアの更新で制御信号の送信機能を付加できる可能性が高い。

6.2 無線 LAN との共存

6.2.1 被干渉に関する評価

本項では、他の無線 LAN 機器から受ける電波干渉の影響と NAV を用いた干渉対策の効果について述べる。

本評価は図 9 の環境で行った。無線 LAN 通信のトラフィックはトラフィックジェネレータを用いて表 3 のと

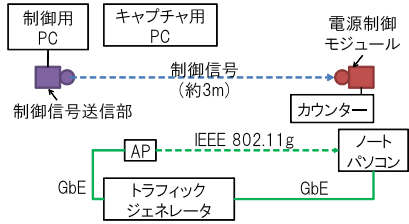


図 9 被干渉評価の評価環境
Fig. 9 Evaluation environment of effects of interference from other WLAN terminals.

表 3 被干渉評価における無線 LAN トラフィックの条件
Table 3 Background traffic used at Fig. 9.

項目	値
送信チャネル	制御信号と同じチャネルを使用
暗号化	WEP を適用
向き	単一方向とし、ダウンリンク方向 (AP からノートパソコンの方向) にデータが流れるようにする。
スループット	0, 0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 (Mbps) から 1 つを設定する。
パケット種別	IPv4 ヘッダとランダムデータとする。IPv4 ヘッダのプロトコルフィールドはゼロを設定する。
サイズ	IPv4 データグラムのサイズとして 1,500 バイトを指定し、試行中は固定とする。

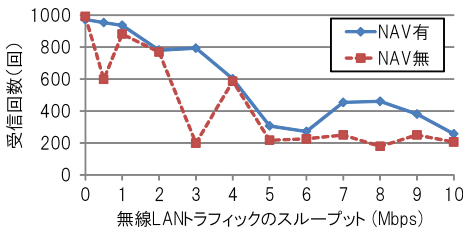


図 10 被干渉評価の結果
Fig. 10 The number of received signals under the background WLAN traffic.

おりに生成した。また、カウンタはウェイクアップ IC が生成したパルス信号の個数を計測するものである。

評価手順は次のとおりである。これを NAV 設定の有無と表 3 の各スループットに対して行った。その結果を図 10 に示す。

- (1) カウンタの値をゼロにリセットする。
- (2) 無線 LAN 通信のトラフィックを生成する。
- (3) トラフィック生成から 5 秒程度経過したのち、制御信号の送信を開始する。制御信号は 16 ms 間隔で合計 1,000 回送信する。
- (4) 制御信号の送信が完了したらカウンタの値を受信回数として記録する。
- (5) 無線 LAN 通信のトラフィックを停止する。

6.2.2 与干渉に関する評価

本項では、制御信号が他の無線 LAN 通信に与える影響について評価する。

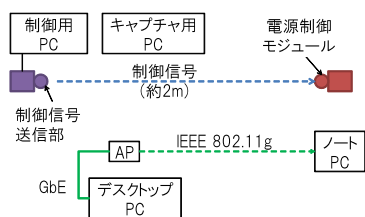


図 11 与干渉評価の評価環境

Fig. 11 Evaluation environment of effects of interference with other WLAN terminals.

表 4 与干渉評価における制御信号の送信条件

Table 4 Conditions of the wake-up signal transmission at Fig. 11.

項目	値
再送回数	7 回 (1 回の送信指示で制御信号を 8 つ送信)
送信間隔	5, 10, 15, 20, 40, 80 ms から選択

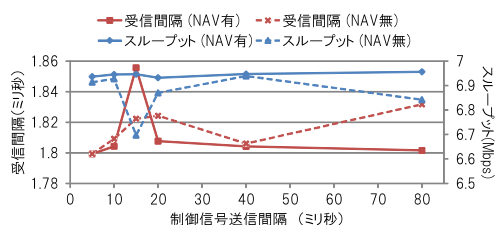


図 12 与干渉評価の結果

Fig. 12 Throughput and received interval of WLAN traffic under the wake-up signal transmissions.

評価環境を図 11 に示す。本評価では実際の通信に対する影響を調べるため、帯域測定ツール iperf を用いてトラフィックを生成し、フレームの平均受信間隔と平均スループットを求めた。なお、トラフィックは無線部での暗号化はせず、制御信号と同じチャネルを使用して送信した。

評価手順は次のとおりである。制御信号の送信間隔は表 4 に従って変化させ、1 つの送信間隔に対して 3 回測定した。また、NAV 設定による影響の有無を確認するため NAV を設定した状態 (NAV 有) と設定しない状態 (NAV 無) とで各々測定した。

- (1) iperf サーバをデフォルト設定で起動する。
- (2) フレームキャプチャを開始する。
- (3) デフォルト設定で iperf クライアントを実行して、無線 LAN 部分にトラフィックを流す。
- (4) iperf のトラフィック送信が始まって約 5 秒が経過したときに、制御信号の送信を 1 回だけ指示する。
- (5) iperf のトラフィックが終了することを確認する。
- (6) フレームキャプチャを停止する。

測定で得られたフレームキャプチャから算出した平均受信間隔と平均スループットを図 12 に示す。

6.2.3 考察

6.2.3.1 被干渉評価に対する考察

図 10 の結果から、NAV が制御信号の受信回数を増やす

No	Time	Src	Dst	Info.
1855	9.876902	00:00:c0:a8:01:fd	00:24:d2:2f:f4:5a	IEEE 802.11 QoS Data (RA) IEEE 802.11 Ack
1856	9.876916	00:00:c0:a8:01:fd	00:22:cf:00:fd:51	IEEE 802.11 QoS Data (RA) IEEE 802.11 Ack
1857	9.880951	00:00:c0:a8:01:fd	00:24:d2:2f:f4:5a	IEEE 802.11 QoS Data (RA) IEEE 802.11 Ack
1858	9.880965	00:00:c0:a8:01:fd	00:22:cf:00:fd:51	IEEE 802.11 QoS Data (RA) IEEE 802.11 Ack
1859	9.882951	00:23:18:06:ed:c9	12:34:56:ff:ff:ff	制御信号の一部
1860	9.883438	00:23:18:06:ed:c9	12:34:56:ff:ff:ff	制御信号の一部
1861	9.885388	00:23:18:06:ed:c9	12:34:56:ff:ff:ff	制御信号の一部
1862	9.887344	00:23:18:06:ed:c9	12:34:56:ff:ff:ff	制御信号の一部
1863	9.887529	00:22:cf:00:fd:51 (TA)	00:24:d2:2f:f4:5a (RA)	IEEE 802.11 RTS
1864	9.888329	00:23:18:06:ed:c9	12:34:56:ff:ff:ff	制御信号の一部
1865	9.888552	00:22:cf:00:fd:51 (TA)	00:24:d2:2f:f4:5a (RA)	IEEE 802.11 RTS
1866	9.888679	00:22:cf:00:fd:51 (TA)	00:24:d2:2f:f4:5a (RA)	IEEE 802.11 CTS
1867	9.890389	00:22:cf:00:fd:51 (TA)	00:24:d2:2f:f4:5a (RA)	IEEE 802.11 RTS
1868	9.890515	00:22:cf:00:fd:51 (TA)	00:24:d2:2f:f4:5a (RA)	IEEE 802.11 CTS
1869	9.892008	00:00:c0:a8:01:fd	00:22:cf:00:fd:51 (RA)	IEEE 802.11 QoS Data
1870	9.892015	00:00:c0:a8:01:fd	00:22:cf:00:fd:51 (RA)	IEEE 802.11 Ack

図 13 被干渉評価 (3 Mbps/NAV 無) で記録されたフレーム

Fig. 13 Captured frames of the background traffic and a broken wake-up signal (3 Mbps without NAV).

No	Time	Src	Dst	Info.
5289	11.317835	00:00:c0:a8:01:fd	00:24:d2:2f:f4:5a	IEEE 802.11 QoS Data
5290	11.317849	00:00:c0:a8:01:fd	00:22:cf:00:fd:51 (RA)	IEEE 802.11 Ack
5291	11.320121	00:23:18:09:ed:c9	12:34:56:ff:ff:ff	制御信号の一部
5292	11.320641	00:23:18:09:ed:c9	12:34:56:ff:ff:ff	制御信号の一部
5293	11.321133	00:23:18:09:ed:c9	12:34:56:ff:ff:ff	制御信号の一部
5294	11.322108	00:23:18:09:ed:c9	12:34:56:ff:ff:ff	制御信号の一部
5295	11.322597	00:23:18:09:ed:c9	12:34:56:ff:ff:ff	制御信号の一部
5296	11.323578	00:23:18:09:ed:c9	12:34:56:ff:ff:ff	制御信号の一部
5297	11.324067	00:23:18:09:ed:c9	12:34:56:ff:ff:ff	制御信号の一部
5298	11.324556	00:23:18:09:ed:c9	12:34:56:ff:ff:ff	制御信号の一部
5299	11.325047	00:23:18:09:ed:c9	12:34:56:ff:ff:ff	制御信号の一部
5300	11.325452	00:23:18:09:ed:c9	12:34:56:ff:ff:ff	制御信号の一部
5301	11.326242	00:23:18:09:ed:c9	12:34:56:ff:ff:ff	制御信号の一部
5302	11.328181	00:00:c0:a8:01:fd	00:24:d2:2f:f4:5a	IEEE 802.11 QoS Data
5303	11.328194	00:00:c0:a8:01:fd	00:22:cf:00:fd:51 (RA)	IEEE 802.11 Ack

図 14 被干渉評価 (3 Mbps/NAV 有) で記録されたフレーム

Fig. 14 Captured frames of the background traffic and a complete wake-up signal (3 Mbps with NAV).

ことが分かる。ただし、NAV の有無で差が出ないケースもあった。この原因を確認するため、キャプチャしたフレームを分析した。はじめに NAV の効果が最も大きく見られた 3 Mbps の場合について示す。その後、効果が少なかった 4 Mbps を示す。

3 Mbps/NAV 無におけるフレームキャプチャの抜粋を図 13 に示す。本評価で送信している制御信号は図 8 に示したものであり、11 個の制御信号フレームで構成されている。しかしながら、図 13 では 5 つしか記録されていない。この原因は AP とノート PC から送信された通常の IEEE 802.11 フレームとの衝突と考えられる。また、制御信号の途中で他の IEEE 802.11 フレーム (図 13 では RTS) が割り込んでおり、衝突しない場合でも、正しく制御信号が作られていないことも分かる。

同様に、3 Mbps/NAV 有におけるフレームキャプチャの抜粋を図 14 に示す。こちらでは 11 個すべての制御信号フレームが記録されており、NAV によって AP やノート PC からの送信が抑制できていることが確認できる。また、NAV により適切に送信が抑制されているため、RTS/CTS による衝突回避の仕組みも動作していない。

続いて、NAV の効果がほとんど見られなかった 4 Mbps/NAV 有におけるフレームキャプチャの抜粋を図 15 に示す。この図では制御信号フレームが 10 個しか記録されていない。記録されたフレームの送信間隔から、先頭の制御信号フレームが記録できていないと判断する。すなわち、先頭の制御信号フレームが他ノードから送信された IEEE 802.11 フレームと衝突したと考えられる。

この原因は、本プロトタイプが送信タイミングの維持を優先してキャリアセンスとバックオフを実行しないことに

No	Time	Src	Dst	Info.
5261	9.551284	00:00:c0:a8:01:fd	00:24:d2:2f:f4:5a	IEEE 802.11 QoS Data
5262	9.551218		00:22:cf:00:fd:51 (RA)	IEEE 802.11 Ack
5263	9.553471	00:23:18:09:ed:c9	12:34:56:ff:ff:ff	制御信号の一部
5264	9.553987	00:23:18:09:ed:c9	12:34:56:ff:ff:ff	制御信号の一部
5265	9.554884	00:23:18:09:ed:c9	12:34:56:ff:ff:ff	制御信号の一部
5266	9.555372	00:23:18:09:ed:c9	12:34:56:ff:ff:ff	制御信号の一部
5267	9.556348	00:23:18:09:ed:c9	12:34:56:ff:ff:ff	制御信号の一部
5268	9.556840	00:23:18:09:ed:c9	12:34:56:ff:ff:ff	制御信号の一部
5269	9.557330	00:23:18:09:ed:c9	12:34:56:ff:ff:ff	制御信号の一部
5270	9.557820	00:23:18:09:ed:c9	12:34:56:ff:ff:ff	制御信号の一部
5271	9.558311	00:23:18:09:ed:c9	12:34:56:ff:ff:ff	制御信号の一部
5272	9.559844	00:23:18:09:ed:c9	12:34:56:ff:ff:ff	制御信号の一部
5273	9.560884	00:00:c0:a8:01:fd	00:24:d2:2f:f4:5a	IEEE 802.11 QoS Data
5274	9.560998		00:22:cf:00:fd:51 (RA)	IEEE 802.11 Ack

図 15 被干渉評価 (4Mbps/NAV 有) で記録されたフレーム

Fig. 15 Captured frames of the background traffic and an incomplete wake-up signal (4 Mbps with NAV).

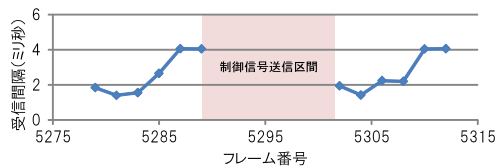


図 16 被干渉評価 (3 Mbps, NAV 有) における受信間隔の変化

Fig. 16 Receive interval of the background traffic (3 Mbps with NAV).

ある。他のノードが送信中であっても、本プロトタイプはバックオフせずに最初の制御信号フレームを送信してしまう。その結果、衝突が発生する。他ノードは衝突を検出するとキャリアセンスとランダムバックオフに移行するが、本プロトタイプは連続して制御信号フレームを送信し続ける。加えて、2 フレーム目以降で送信される制御信号フレームには NAV が設定されているため、他ノードはキャリアセンスを継続する。結果として、後続の制御信号フレームは衝突することなく送信され、正しく受信できる。

この現象は本プロトタイプの実装に依存するため、無線 LAN トラフィックのスループットによらずに発生する可能性があった。今回の評価では、無線 LAN トラフィックと制御信号の送信タイミングによって、NAV の効果が確認できたスループットと確認できないスループットが生じたものと考えられる。

他ノードの送信が抑制されていることを確認するため、3 Mbps/NAV 有の試行で記録されたキャプチャ結果から無線 LAN トラフィックの受信間隔を算出した。その結果を図 16 に示す。無線 LAN AP でフレームがバッファされて間隔が狭くなっている様子が見て取れる。これにより、制御信号フレームで設定した NAV により適切に送信を抑制できていることが確認された。

以上の考察より、NAV を適切に設定することにより他の無線 LAN トラフィックの送信を抑制し、制御信号が受信しやすくなることが確認できた。ただし、キャリアセンスを行わない今回のプロトタイプでは、制御信号を構成する先頭のフレームが他のフレームと衝突して喪失する傾向が見られた。これを回避するために、最初のフレーム送信に限ってキャリアセンスを実行することが好ましい。さらに、制御信号どうしが繰り返し衝突することを避けるため、最初のフレーム送信に限ってランダムバックオフを実行す

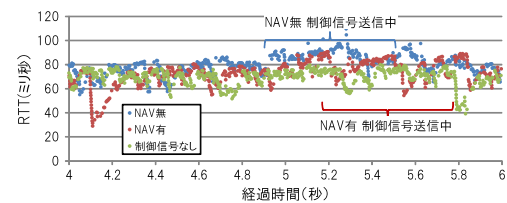


図 17 被干渉評価における無線 LAN トラフィックの RTT 変化 (制御信号の送信間隔 80 ms)

Fig. 17 Round trip time of the background traffic (Wake-up signal sending interval: 80 ms).

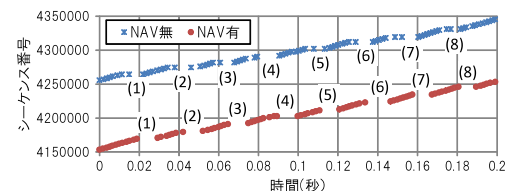


図 18 与干渉評価における無線 LAN トラフィックのシーケンス番号の時間変化 (制御信号の送信間隔 15 ms)

Fig. 18 TCP sequence number of the background traffic (Wake-up signal sending interval: 15 ms).

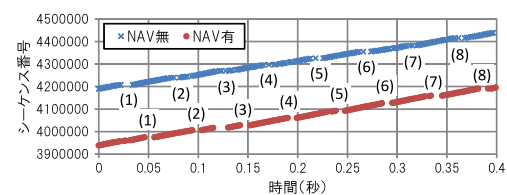


図 19 与干渉評価における無線 LAN トラフィックのシーケンス番号の時間変化 (制御信号の送信間隔 40 ms)

Fig. 19 TCP sequence number of the background traffic (Wake-up signal sending interval: 40 ms).

る必要がある。

6.2.3.2 与干渉評価に対する考察

図 12 の結果から、制御信号を 8 つ連続で送信した際に NAV の有無による影響はないと判断する。無線 LAN 通信のトラフィックに対する制御信号の送信頻度が低いため、大局的な影響がなかったと考えられる。

制御信号を送信した際の局所的な変化を確認するため、フレームキャプチャを分析した。はじめに制御信号の送信間隔を 80 ms とした場合における RTT の変化について図 17 に示す。制御信号の送信により局所的に RTT が乱れる様子が確認できる。ただし、記録された変化は数十ミリ秒の範囲内に収まっており、制御信号を送信しない場合であっても同程度の変動は発生しうる。したがって、個々のフレーム単位で見ても、制御信号が与える影響はないと考える。

さらに正確に確認すべく、制御信号の送信間隔が 15 ms と 40 ms の試行を 1 つずつ選び、制御信号を送信している 5 秒後付近で iperf が生成しているトラフィックの TCP シーケンス番号の時間変化を確認した (図 18, 図 19)。なお、

これらの図は制御信号の送信開始がほぼ同じになるように横軸の値を調整している。また、送信タイミングが違うため、TCP シーケンス番号には違いが生じている。図中の括弧は制御信号が送信されたタイミングに合わせて付している。

送信間隔 15 ms の試行は、図 12 の結果では NAV 有無で差が大きかった。しかし、図 18 では NAV の有無による差は見られない。したがって、スループットが低下した原因は制御信号以外にあると判断できる。一方、送信間隔 40 ms の試行では、図 12 の結果において NAV 有無の差が見られなかった。実際に図 19 を見ても、NAV の有無でシーケンス番号の増え方に変化は見られない。

以上の分析をふまえると、以下の結論を得る。

- 制御信号の送信は同一チャネルを利用する無線 LAN での通信に対して局所的な影響を与える。ただし、その影響はスループットや RTT を変化させるほどではない。
- NAV の設定をともなった制御信号を送信しても、その頻度が小さければ、無線 LAN トラフィックへの影響の大きさは NAV の設定をともなわない場合と変わらない。

6.3 家電機器との共存可能性

本節では 2.4 GHz 帯を使用する家電機器と本プロトタイプとの共存可能性について述べる。

6.3.1 評価環境と評価手順

本評価は、家電機器が発する電波の影響を厳密に確認するためにシールドルームで行った。シールドルーム内にプロトタイプと家電機器を図 20 のように設置し、家電機器を使用中に送信した制御信号が正常に受信できるかどうかを確認した。電源制御モジュールには電球を接続し、制御信号を正常に受信できた場合には点灯するようにした。評価に使用した家電機器は 6 種類であり、電波を発する家電機器のうち広く普及しているものを選択した。

評価手順は次のとおりである。

- (1) 機器を図 20 のとおり設置する。家電機器の初期位置

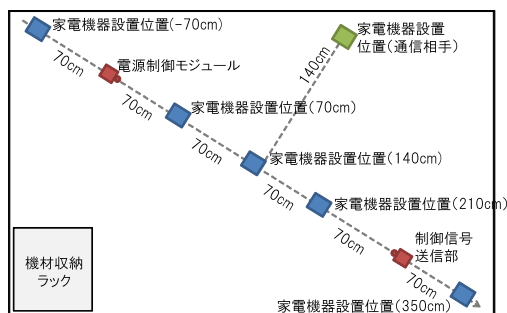


図 20 家電機器との共存可能性に関する評価環境

Fig. 20 Evaluation environment of coexistence with some home appliances.

は -70 cm とする。

- (2) 制御信号の送信操作を 1 回行い、電球が点灯することを確認する。点灯したらスイッチを押して消灯する。
- (3) 制御信号の送信操作を合計 100 回繰り返し、点灯回数を結果として記録する。
- (4) 家電機器を移動し、前記手順を繰り返す。すべての設置位置に対して測定したら終了とする。

6.3.2 結果と考察

評価実験の結果を図 21 に示す。図 21 から、評価対象とした家電機器は制御信号に対してそれぞれ異なる影響を与えることが分かる。この理由を確認するため、各機器から発せられる電波をアナライザで計測した。計測結果をふまえ、本結果に考察を加える。

はじめに制御信号が良好に受信できたゲーム機の計測結果を図 22 に示す。図 22 から分かるように送信される電波の出力は制御信号よりも小さかった。そのため、自動利得制御が有効に働きすべての設置場所において良好に制御信号が受信できたと判断する。

同様に制御信号が良好に受信できたワイヤレスキーボード・マウスの測定結果を図 23 に示す。これから分かるように電波の送信間隔が 8 ms 程度あるうえ、その出力も小さい。図 2 に示したように制御信号は 7.82 ms であることから、電波が発せられていない区間で制御信号が送信できることが分かる。仮に衝突してもパリティビットにより対処できたと考えられる。

次に本評価中に制御信号がまったく受信できなかったワイヤレスヘッドフォンの計測結果を図 24 に示す。これから、強い電波が連続して発信されており制御信号が割り込

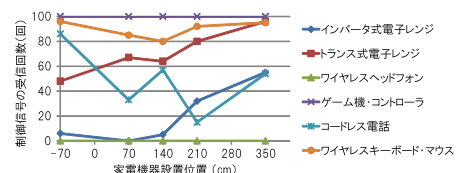


図 21 家電機器との共存可能性に関する評価結果

Fig. 21 Evaluation result of coexistence with home appliances.

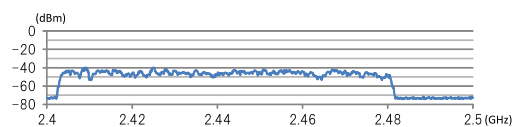


図 22 ゲーム機（Bluetooth）から発せられる電波

Fig. 22 Radio-frequency spectrum of the game console (Bluetooth).

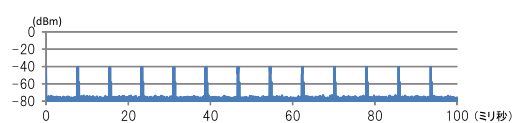


図 23 ワイヤレスキーボード・マウスから発せられる電波

Fig. 23 Radio signal strength (wireless keyboard and mouse).

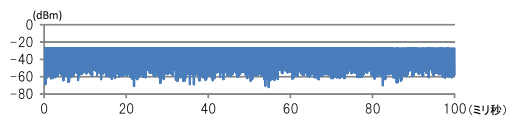


図 24 ワイヤレスヘッドフォンから発せられる電波
Fig. 24 Radio signal strength (wireless headphone).

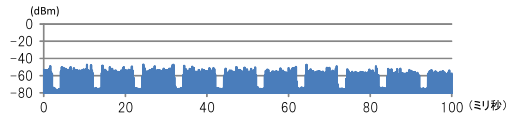


図 25 インバータ式電子レンジから発せられる電波
Fig. 25 Radio signal strength (microwave oven (inverter)).

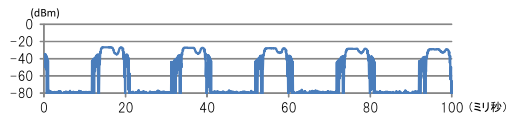


図 26 トランス式電子レンジから発せられる電波
Fig. 26 Radio signal strength (microwave oven (transformer)).

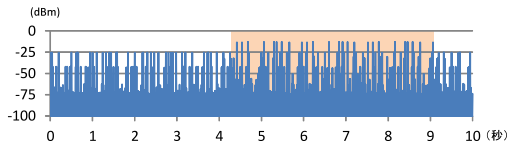


図 27 コードレス電話から発せられる電波
Fig. 27 Radio signal strength (cordless telephone).

む余地がないことが分かる。

電子レンジは、両方式とも受信機から離れるほど影響が小さくなっている。しかし、インバータ式がより大きな影響を与えることが分かった。これは図 25 ならびに図 26 に示すように、電子レンジが発する電波が方式により異なっていることによる。インバータ式では電波が連続的に送信されているのに対して、トランス式では比較的長い休止時間がある。このため、トランス式のほうが良好に受信できると考えられる。なお、インバータ式であっても電波強度が時間とともに変化することが確認された。本測定で受信できた制御信号は、この電波が弱いタイミングで受信できたものと推測できる。

コードレス電話を使用中に送信された制御信号の受信回数は不規則に変化しており、具体的な傾向を見い出すことは困難である。この原因を調べるため、コードレス電話が発信する電波を 10 秒間記録した (図 27)。その結果、コードレス電話が発信する電波には強い区間 (図 27 の色付き部分) と弱い区間があることが分かった。このような電波の強弱がウェイクアップ IC の受信状況に影響を与えたものと考えられる。

以上の評価から、提案方式は共存できる家電機器と共存できない家電機器があることが分かる。特に、ワイヤレスヘッドフォンやインバータ式電子レンジのように強い電波を連続的に送信する家電機器との共存は困難である。この

表 5 再送の効果に対する評価結果

Table 5 Evaluation result of signal retransmission.

合計送信回数	1	2	4	8
受信回数 (インバータ式電子レンジ)	5	21	42	66
受信回数 (トランス式電子レンジ)	64	97	88	100
受信回数 (ワイヤレスヘッドフォン)	0	0	0	0

ような機器が存在する環境で使用する場合には、それらの機器を遠ざけたり、同時に使用しないように注意したりするなど、利用者側の対応が必要となる。

6.4 再送による受信可能性の向上

6.3 節における一連の評価では、制御信号を 1 回送信した際にそれが正常に受信できた回数で評価した。4.5 節で述べたとおり、提案手法では再送により電波干渉の回避を試みる。本節では 6.3 節で述べた家電機器のうち電波干渉の影響が大きかった電子レンジとワイヤレスヘッドフォンに対して、再送の効果を確認する。

6.4.1 評価環境と評価手順

本評価の評価環境は 6.3.1 項と同じとする。ただし、家電機器の設置場所は 140 cm で固定した。評価手順は以下のとおりである。

- (1) 制御信号の再送回数を 0 回 (合計送信回数 1 回)、1 回 (同 2 回)、3 回 (同 4 回)、7 回 (同 8 回) のいずれかに設定する。
- (2) 制御信号の送信操作を 1 回行い、電球が点灯することを確認する。点灯したらスイッチを押して消灯する。
- (3) 制御信号の送信操作を合計 100 回繰り返し、点灯回数を結果として記録する。
- (4) 再送回数の設定を変更し、前記手順を繰り返す。すべての再送回数に対して測定したら終了とする。

6.4.2 結果と考察

本評価実験の結果を表 5 に示す。電子レンジではいずれの方式においても再送で受信回数が向上した。しかしながら、インバータ式電子レンジでは 6 割程度の改善にとどまった。また、ワイヤレスヘッドフォンでは改善が見られなかった。これらは図 25 や図 24 に示した電波の送信状況から推測できる。すなわち、他の電波の送信余地がないワイヤレスヘッドフォンでは制御信号が受信できず、電波強度が変わり送信余地があるインバータ式電子レンジでは再送回数の増加とともに受信回数が増加したと結論できる。

一方、トランス式電子レンジでは合計 2 回の送信で 90% を超える受信確率が達成でき、再送の効果が大きかった。この結果についても、図 26 から説明できる。トランス式電子レンジの電波は約 10 ms ごとに送信と休止を繰り返しており、約 8 ms の制御信号を 2 回送信すれば、1 回は休止期間に含まれる可能性が高くなる。ただし、両電波の送信周期が一致するとつねに干渉が発生することになるため、送

信間隔が異なっている必要がある。

なお、再送回数が増えると制御信号の受信処理に要する消費電力量が増加するが、一連の評価を通じて大容量コンデンサに蓄積された電荷が不足する場面は見られなかった。このことから再送が消費電力量に与える影響は軽微と判断する。また、電波干渉の影響がない Wake on LAN は電源回路を含めて通電状態を保つ必要があることから、再送を行ったとしても提案方式のほうが消費電力量は小さくなると考えられる。

6.5 全体考察

本章では、筆者らが提案するウェイクアップ IC を用いたネットワークシステムにおける制御信号の送信方法について電波干渉の観点から評価した。

6.1 節では提案方式が無線 LAN インタフェースを使って実現できることを示した。6.2 節では、制御信号フレームに適切に NAV を設定することで他の無線 LAN 通信を避けながら制御信号を送信できることを示し、また、他の無線 LAN 通信に対する影響が軽微であることを示した。加えて、プロトタイプを使った評価を通じ、制御信号を構成する最初の制御信号フレームにおいてはキャリアセンスを実行する必要があることを示した。6.3 節では提案方式と電波を発する家電機器との共存について評価し、共存可能な機器と困難な機器とがあることを示した。さらに 6.4 節で、再送により受信回数が向上することを示した。

なお、制御信号の送信に用いた 2.4 GHz 帯は ISM 帯であるため、同一周波数帯を使用するあらゆる機器との共存を評価することは困難である。そこで、本論文では家庭を主たる使用環境ととらえ、家庭向けで最も普及している通信方式である IEEE 802.11 や電波を発する家電機器との共存に限定して評価した。家電機器については、通信のための電波として Bluetooth と独自の通信方式を用いる機器を選択し、それ以外の電波として電子レンジを選択した。これらにより現在の家庭環境はおおむね含まれると考えている。また、今後普及が予想される IEEE 802.15.4 については、その用途から通信間隔が比較的長いと予想されるため、制御信号との間で干渉が発生する可能性は低いと考える。

以上の評価結果をふまえ、提案方式は一部の状況において注意が必要であるもののおおむね使用できると判断する。使用が困難になる状況については、利用者に対応を求めることで解決できる。将来的には系統的に使用が困難な状況を検出し、代替手段に切り替えるなど対応の自動化が必要である。

7. まとめ

本論文では、ウェイクアップ IC を用いたネットワークシステムの実現に必要な制御信号の送信方法を提案した。提案手法は既存の無線 LAN インタフェースを活用するた

め、広く普及している無線 LAN ノードのソフトウェアを変更するだけで適用可能である。

また、いくつかの電波干渉下において提案手法が有効に機能することを示した。まず、制御信号と無線 LAN 通信との共存について評価し、NAV により制御信号が保護できること、および制御信号の無線 LAN 通信への影響が小さいことを確認した。また、電波を発する家電機器との共存については、一部の機器を除いて共存できることを確認した。共存にあたっては制御信号の再送により、受信できる確率が改善することも確認できた。本方式の耐干渉性能は無線 LAN と同等であり、一部機器については同時に使用しないなど利用者側の対応が必要であることも分かった。

今後は、本提案で使用したウェイクアップ IC の性能を改善するなどして、より使い勝手の良いシステムへと改善していく。

謝辞 本研究は総務省平成 21 年度第 2 次補正予算「ネットワーク統合制御システム標準化等推進事業」の一環として実施したものである。

参考文献

- [1] Agarwal, Y., Schurgers, C. and Gupta, R.: Dynamic power management using on demand paging for networked embedded systems, *Proc. 2005 Asia and South Pacific Design Automation Conference, ASP-DAC '05*, New York, NY, USA, ACM, pp.755–759 (2005).
- [2] Apple Inc.: Mac OS X v10.6: About Wake on Demand (オンライン, 2011 年 5 月), available from <http://support.apple.com/kb/HT3774>.
- [3] Ecma International: ProxZzzy for sleeping host (2012).
- [4] Kogawa, T., Ishihara, T., Ogura, K., Umeda, T. and Sakamoto, T.: Low power consumption wireless wake-up module controlling AC power supply at household appliances, *IEEE International Symposium on Consumer Electronics*, pp.393–396 (online), DOI: 10.1109/ISCE.2011.5973856 (2011).
- [5] Mishra, N., Chebrolu, K., Raman, B. and Pathak, A.: Wake-on-WLAN, *Proc. 15th International Conference on World Wide Web, WWW '06*, New York, NY, USA, ACM, pp.761–769 (2006).
- [6] Pering, T., Raghunathan, V. and Want, R.: Exploiting Radio Hierarchies for Power-Efficient Wireless Device Discovery and Connection Setup, *Proc. 18th International Conference on VLSI Design held jointly with 4th International Conference on Embedded Systems Design, VLSID '05*, Washington, DC, USA, IEEE Computer Society, pp.774–779 (2005).
- [7] Shih, E., Bahl, P. and Sinclair, M.J.: Wake on wireless: An event driven energy saving strategy for battery operated devices, *Proc. 8th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, MobiCom '02*, New York, NY, USA, ACM, pp.160–171 (2002).
- [8] Takiguchi, T., Saruwatari, S., Morito, T., Ishida, S., Minami, M. and Morikawa, H.: A Novel Wireless Wake-Up Mechanism for Energy-Efficient Ubiquitous Networks, *IEEE International Conference on Communications Workshops, ICC Workshops 2009*, pp.1–5 (2009).
- [9] Umeda, T. and Otaka, S.: ECO chip: Energy Consumption Zeroize Chip with a 953 MHz High-Sensitivity Radio

Wave Detector for Standby Mode Applications, *Custom Integrated Circuits Conference, CICC '07*, pp.663–666, IEEE (2007).

- [10] Umeda, T., Yoshida, H., Sekine, S., Fujita, Y., Suzuki, T. and Otake, S.: A 950-MHz rectifier circuit for sensor network tags with 10-m distance, *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, Vol.41, No.1, pp.35–41 (2006).
- [11] UPnP Forum: UPnP Low Power Architecture (2007).
- [12] 近藤良久, 四方博之, 湯 素華, 岩井優仁, 田中利康, 筒井英夫, 小花貞夫: 無線 LAN 信号を用いたオンデマンドウェイクアップ方式, 信学技報, NS2010-185, Vol.110, No.448, pp.123–128 (2011).
- [13] 近藤良久, 四方博之, 湯 素華, 筒井英夫, 小花貞夫: オンデマンド起動型無線 LAN アクセスポイントのためのウェイクアップ受信機の設計と評価, DICO2011 論文集, pp.286–291 (2011).
- [14] 石原丈士, 大山裕一郎, 村上貴臣: 超低消費電力無線ウェイクアップ IC を使ったネットワーク機器の遠隔電源制御, 東芝レビュー, Vol.67, No.2, pp.31–34 (2012).

推薦文

超低消費電力で無線信号を待ち受け, 信号受信時に起動トリガを発生させるウェイクアップ IC を開発し, 同 IC のための起動信号の送信方法を提案している点に新規性があり, 実装したシステムを用いた評価により実用性を示していることから, 学術的な価値が高いと考えられる.

(マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICO2011) シンポジウム 2011 プログラム委員長 屋代智之)



石原 丈士 (正会員)

2001 年東京工業大学大学院情報理工学研究科計算工学専攻修士課程修了. 同年株式会社東芝入社. IPv6 や情報家電の研究開発を経て, ネットワークの低消費電力化技術に関する研究開発に従事.



古川 剛志

2002 年東北大学大学院情報科学研究科情報基礎科学専攻修士課程修了. 同年株式会社東芝入社. 無線通信システムの研究開発に従事. 電子情報通信学会会員.



坂本 岳文

1993 年早稲田大学大学院電気工学専攻修士課程修了. 同年株式会社東芝入社. 無線システムの研究開発に従事. 電子情報通信学会会員.



小倉 浩嗣

1988 年横浜国立大学大学院工学研究科物質工学専攻修士課程修了. 同年株式会社東芝入社. 無線通信方式・無線通信システムの研究に従事. 電子情報通信学会, IEEE 各会員.



鎌形 映二

1989 年早稲田大学大学院電気工学専攻修士課程修了. 同年株式会社東芝入社. 電力系統監視制御システム技術開発に従事. 電気学会会員.



大山 裕一郎

2008 年九州大学大学院システム情報科学府情報工学専攻修了. 同年株式会社東芝入社. ネットワークの低消費電力化技術に関する研究開発に従事.



村上 貴臣

2009 年北海道大学大学院理学院宇宙理学専攻修士課程修了. 同年株式会社東芝入社. ネットワークの低消費電力化技術に関する研究開発に従事. 映像情報メディア学会会員.