

無線 LAN インターフェイスを用いた 低消費電力遠隔起動の実現

石原 丈士^{†1} 古川 剛志^{†1} 坂本 岳文^{†1}
小倉 浩嗣^{†1} 鎌形 映二^{†1}

筆者らは、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ーを発生させるウェイクアップ IC を開発し、ネットワークシステムへの応用を検討している。本論文では同 IC を用いたネットワークシステムの実現に必要な起動信号の送信方法を提案し、実現性や IEEE 802.11 無線 LAN との共存に関する評価結果を示す。本提案では 2 値 PPM を用いて変調される起動信号を、広く普及している無線 LAN インターフェイスを用いて生成する。PPM の 'H' に相当する区間で無線 LAN フレームを送信し、'L' の区間では送信しない。この送信タイミングは IEEE 802.11 とは異なるため、既存無線 LAN インターフェイスモジュールのファームウェアを改変してプロトタイプを実装した。プロトタイプを用いた評価を通じて、既存無線 LAN インターフェイスでの実現可能性を確認し、無線 LAN と共存できることを確認した。

The embodiment of low power remote wake-up using a wireless LAN interface

Responding to growing demand for energy efficient electric appliances, we have developed a low power wake-up IC. The IC may have applicability to networked system. In this paper, a transmission method of wake-up signals for it using a common wireless LAN interface is proposed.

In this method, each transmission of IEEE 802.11 frames constitutes 'HIGH' level parts of the signals which are produced by pulse-position modulation. In the same manner, each non-transmission constitutes 'LOW' level. Because this requires different transmission timings from that of IEEE 802.11, it would require some modifications to the firmware for the WLAN interface.

Our prototype was developed using an IEEE 802.11b compliant card, in which modified firmware was installed. Through evaluations using it, the feasibility of our proposal and the coexistence of our method and IEEE 802.11 wireless LAN were confirmed.

1. 背景

近年、地球温暖化に対する関心が高まり、省エネルギーが強く志向されている。家電機器に限らず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されて実用化されている。例えば、有線 LAN の消費電力を減らす IEEE 802.3azTM が 2010 年 10 月に策定され、普及が始まっている³⁾。この技術は、データを送受信しないタイミングを明示することで、ネットワークインターフェイスを構成する部品の電源を細かく制御できるように工夫されている。

一方で、ネットワークの適用範囲は拡大を続けている。特にパソコンや AV 機器を中心としたホーム AV ネットワークは、家庭用テレビの高機能化により急速に拡大している。さらにスマートグリッドや Internet of Things といった分野で技術が確立されれば、ネットワークの適用範囲は拡大し続けると予想される。

このようにネットワークの適用範囲が広がると、機器の待機電力が大きな問題になる。通常、パケットの到着を待ちうけるネットワーク機器は停止できない。そのため、待機電力を抑えるにはさらなる技術革新が必要であり、技術革新を促すため待機電力を規制する動きも進んでいる⁵⁾。ネットワーク機器の待機電力を削減する方法として、一時的に低消費電力な状態に遷移しておき、遠隔からの復帰起動により通常の動作状態に復帰させる方法がある。起動を指示する方法として、Wake On LAN, Wake on Wireless LAN, IEEE 802.11 無線 LAN よりも消費電力が少ない Bluetooth や IEEE 802.15.4 を使用する方法^{1),4),6),7)}などが提案されている。また、通信プロトコルとの連携により低消費電力状態に遷移した機器を管理し、適切なタイミングで遠隔起動する方法も実用化されている²⁾。

しかしながら、従来の遠隔起動方法は起動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できないなどの問題があった。このような既存方式の欠点を解消するため、超低消費電力で無線信号を受信して起動トリガーを発生させる方法が提案されている^{8),11)–13)}。また、筆者らのグループでも超低消費電力無線受信 IC を開発し^{9),10)}、ネットワークシステムへの応用を模索している。

本論文では、同 IC を用いたネットワークシステムを実現するにあたり必要となる起動信

^{†1} 株式会社東芝 研究開発センター

Toshiba Corporation, Research and Development Center.

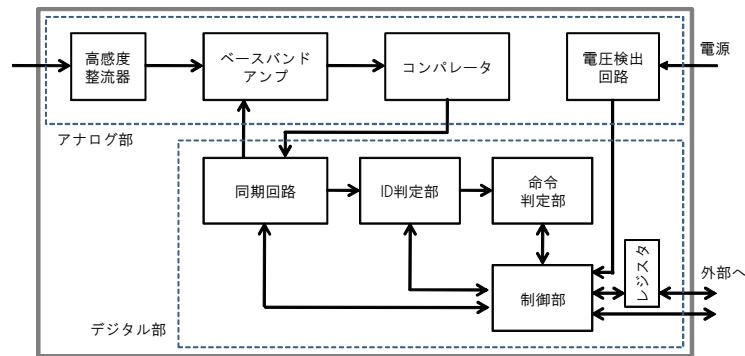


図 1 超低消費電力無線受信 IC の機能ブロック図
Fig. 1 Functional blocks of the wake-up IC

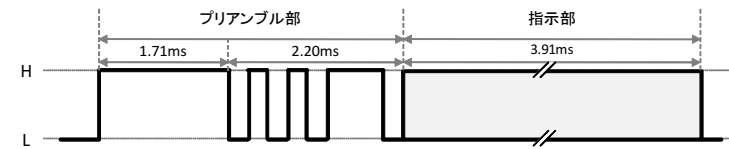


図 2 起動信号の構造
Fig. 2 Format of wake-up signal

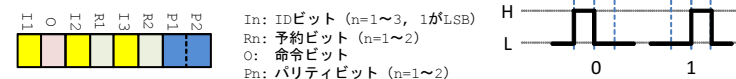


図 3 指示部の構造
Fig. 3 Format of instruction part

号の送信方法を提案する．はじめに 2 章にて，筆者らのグループで開発している同 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 3 章にて無線 LAN インターフェイスを使った起動信号の送信方法を提案する．4 章でプロトタイプの実装を示し，5 章にて前記プロトタイプを使った評価を示す．6 章にて評価結果について考察し，最後に 7 章にてまとめる．

2. 超低消費電力無線受信 IC とネットワークシステムへの適用

2.1 超低消費電力無線受信 IC の概要

筆者らが開発した超低消費電力無線受信 IC は，特定の無線信号を受信するとその旨を通知するパルス信号を出力するウェイクアップ IC である．その特徴は待機電力が小さいことであり，文献 9) によれば $0.14\mu W$ である．この待機電力を実現するため，本 IC は LNA (Low Noise Amplifier) を搭載していない．また，LNA を搭載しない状態での受信感度を高めるために BPF (Band Pass Filter) も搭載していない．このような構造上の特徴を持つ本 IC の機能ブロック図を図 1 に示す．

2.2 超低消費電力無線受信 IC の起動信号

図 2 と図 3 に本 IC が検出する信号（以下，起動信号と呼ぶ）を示す．起動信号は前半のプリアンブル部と後半の指示部で構成される．プリアンブル部は指示部に表れないパターンであり，本 IC が起動信号の先頭を検出するために使用する．後半の指示部は ID ビッ

表 1 指示部を構成するビットの役割

Table 1 Assigned functions to each bits of instruction part

ビット種別	役割
ID ビット	受信先を特定する識別子を指定する．
命令ビット	信号検出時に出力する信号の種類（起動・停止）を指示する．
パリティビット	エラー検出用のパリティビット．算出方法は次の通りである． $P1 = I1 \oplus I2 \oplus I3$ $P2 = O \oplus R1 \oplus R2$
予約ビット	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．

ト・命令ビット・パリティビットに分かれる．各ビットの機能は 2 値 PPM (Pulse Position Modulation) を用いて表現され，その機能は表 1 に示す通りである．

2.3 ネットワークシステムへの適用

超低消費電力無線受信 IC は 2 種類の信号を検出してそれぞれ異なるパルス信号を出力する．この 2 つの信号で交流 100V のリレーを制御すれば，機器への電源供給を制御できる．これを利用してネットワーク機器の電源を制御する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．このモジュールを使用すれば，遠隔起動を用いたネットワーク機器の待機電力削減方式に本 IC が適用できると考えられる．

ただし，通信プロトコルと連携した効率的な動作を実現するには，通信を開始するノードが起動信号を送信する方法が必要である．以降，通信機器が起動信号を送信するための仕組

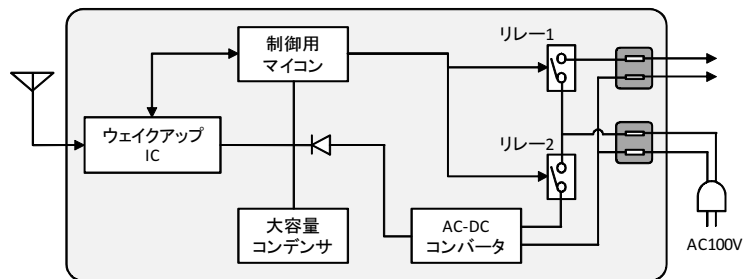


図 4 超低消費電力無線受信 IC を用いた電源制御モジュールの機能ブロック図
Fig. 4 Functional block of power control module based on the wake-up IC

みについて述べる。

3. 無線 LAN インターフェイスを使った起動信号の送信

本章では、超低消費電力無線受信 IC をネットワークシステムに適用する際に必要となる起動信号の送信方法を提案する。提案方法は無線 LAN インターフェイスを活用して起動信号を作る。すなわち、2.2 節で述べた起動信号の‘H’の部分にて IEEE 802.11 に基づくフレームを送信し、‘L’の部分では送信しないようにする。以降、‘H’の部分にて送信するフレームを起動信号フレームと呼ぶことにする。

3.1 無線 LAN インターフェイスを利用することの利点・欠点

無線 LAN インターフェイスを利用することは以下の利点と欠点がある。

- 利点
 - 既存の無線 LAN 向けハードウェアが利用できる。無線 LAN は広く普及しているため、多くのノードが起動信号を送信できるようになる。
 - 電波の送信出力を他の周波数帯よりも大きくすることができる。
- 欠点
 - ISM 帯であるため、多様な機器からの干渉電波が存在する。
 - 無線 LAN インターフェイスを制御するソフトウェアの変更が必要である。

前記欠点のうち 2 番目については、ファームウェアを含めたソフトウェアのアップデートが広く行われている現状を踏まえ、大きな欠点ではないと考える。

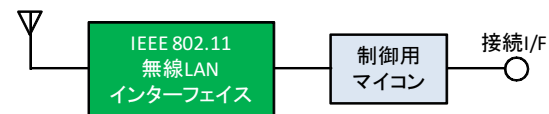


図 5 提案する起動信号送信部のハードウェア構成
Fig. 5 A hardware structure of wake-up signal sending unit

3.2 機能要求

2.2 節で述べた起動信号を無線 LAN インターフェイスで送信するには以下が必要である。

- IEEE 802.11 の規定とは異なるタイミングで電波を発射すること
提案方式では無線 LAN フレームの有無で情報を伝えるため、フレームの送信タイミング制御が重要である。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する。そのため、一時的にそれらを無効にして送信する必要がある。
- 起動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
2.2 節で規定した信号長を実現するため、IEEE 802.11 で規定されるフレーム長や送信速度とは異なるものを使用せざるを得ない可能性がある。
- IEEE 802.11 に準拠する動作と起動信号の送信を行う動作とを切り替えられること
先に挙げた 3 つの要求に従う制御は、IEEE 802.11 に準拠した無線 LAN インターフェイスを実現するファームウェアでは実現できない。一方、専用のハードウェアを使用すると製造コストが上がるため好ましくない。従って、起動信号を送信するモードと IEEE802.11 に従うモード（以降、無線 LAN モード）とを切り替えて使用できるように必要がある。

3.3 ハードウェア構成

前節の要求条件を満たす起動信号送信部のハードウェア構成例を図 5 に示す。制御用マイコンは、起動信号の送信タイミング制御や IEEE 802.11 で規定される動作を実現する。なお、このマイコンは図 5 のように独立に搭載してもよいが、無線 LAN インターフェイスに内蔵されている制御部を活用することもできる。接続 I/F は信号の送信を指示する外部ホストとの接続用インターフェイスである。

3.4 ソフトウェア構成

機能要求に従い、本提案の起動信号送信部には起動信号送信モードと無線 LAN モードとを切り替える機能を持たせる。これを実現する方法として次の 2 つの方法が考えられる。

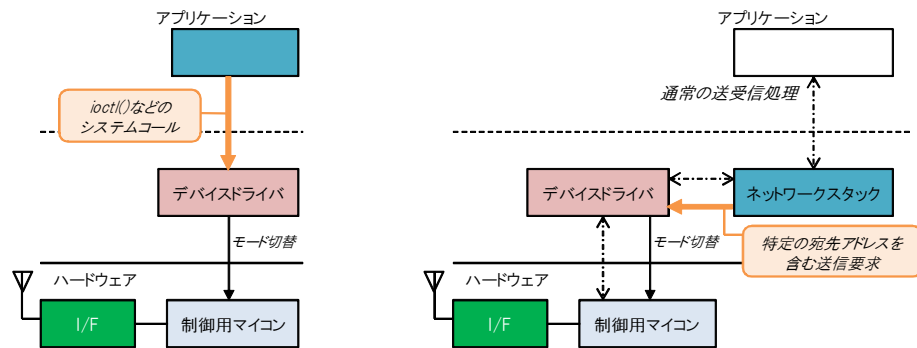


図 6 提案方式を実現するソフトウェア構成
Fig. 6 A software structure of wake-up signal sending process

- ioctl() などを使ってアプリケーションや OS から制御用マイコンに指示を出し、動作モードを切り替える。
- 宛先 MAC アドレスに特別な値を設定した送信要求を発行すると、制御用マイコンがそれを解釈して起動信号モードに一時的に切り替えて送信する。

これら 2 つの方法を実現するソフトウェアの構成を図 6 に示す。

3.5 電波干渉への対策

2.4GHz 帯は ISM 帯 (The industry, science and medical radio bands) として広く使用されている。そのため、様々な機器から発射された電波が超低消費電力無線受信 IC を用いた遠隔起動に対する干渉電波となりうる。提案方式ではパリティビット、再送、IEEE 802.11 の NAV(Network Allocation Vector) の 3 つの方法で電波干渉の影響を低減する。

パリティビットは短時間の電波干渉による起動信号のビット破壊を検出して修復する。再送はパリティビットで修復できないバースト的なビット破壊が発生した場合に対処する。NAV は同じチャンネルを使用する他の IEEE 802.11 機器からのフレーム送信を抑制する。

NAV の設定方法について補足する。NAV は IEEE 802.11 で規定される仮想キャリアセンスを実現する方法である。MAC 層ヘッダの Duration フィールドに値を設定したフレームを送信することで、それを受信したノードは設定された値が示す時間をキャリアが存在する時間として扱う。この仕組みを利用して、起動信号の 'L' の区間に相当する NAV を設定し、同じチャンネルを使用する IEEE 802.11 機器がフレームを送信することを防止する。

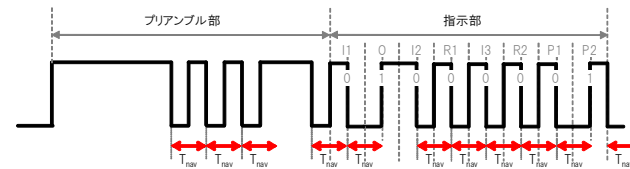


図 7 NAV の設定を伴う起動信号の例
Fig. 7 An example of a wake-up signal with NAV setting

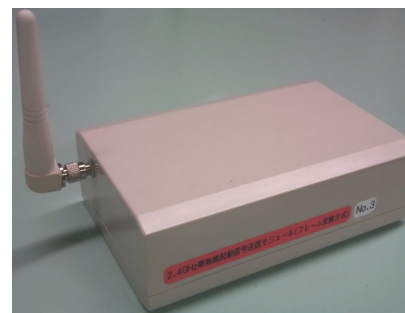


図 8 プロトタイプの外観
Fig. 8 Appearance of our prototype



図 9 プロトタイプの内部基板
Fig. 9 Circuit board of our prototype

NAV の設定を伴う起動信号の一例を図 7 に示す。この例では最も長く 'L' が続く部分に等しい長さの NAV を設定している。

4. プロトタイプの実装

3 章の提案に基づくプロトタイプを実装した。その外観を図 8、内部を図 9 に示す。ハードウェア構成は図 5 に準じている。使用した無線 LAN インターフェイスと制御用マイコン、接続 I/F の諸元は表 2 の通りである。

なお、本プロトタイプは無線 LAN インターフェイスにより起動信号が送信できることを評価することに焦点を置いたため、無線 LAN ノードとして通信する機能および 3.4 節で述べた無線 LAN モードと起動信号モードの切り替えは実装していない。

表 2 起動信号送信部の構成部材
Table 2 Components of our prototype

機能要素	使用部品名
無線 LAN インターフェイス	東芝ディーエムエス製 N3227
制御用マイコン	ATMEL912
接続 I/F	FT232RL

5. 評価

4章に示したプロトタイプを用いて、無線 LAN インターフェイスを用いた起動信号の送信可能性と無線 LAN との共存に関して評価した。

5.1 実現性の確認

プロトタイプを用いて 2.2 節で述べた超低消費電力無線受信 IC の起動信号が送信できることを確認する。確認はモジュールから起動信号を送信し、その波形をアナライザ (Agilent Technologies N9010A EXA シグナルアナライザ) で観測することにより行う。

図 10 に観測結果を示す。この信号は図 7 で示したものであり ID ビット=0、命令ビット=1 (起動指示) の場合である。この結果から、規定に沿った信号が送信できていることが分かる。なお、その他のビットパターンについても同様に確認しているが、スペースの都合により割愛する。

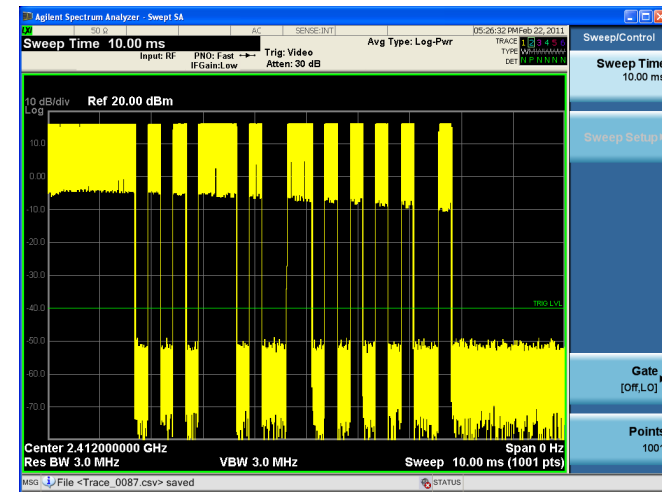


図 10 プロトタイプから送信された起動信号の観測結果
Fig. 10 A recorded wake-up signal

5.2 IEEE 802.11 無線 LAN との共存

5.2.1 評価 (1): IEEE 802.11 のフレームが起動信号に与える影響の確認

3.5 節にて述べたように、提案方式は NAV を用いて他の IEEE 802.11 機器からのフレーム送信を抑制する機能を持つ。本節ではその効果について検証し、結果を述べる。

5.2.1.1 評価環境

評価環境は図 11 および表 3、表 4、表 5 の通りである。

5.2.1.2 評価手順

次の手順を 1 回の試行とし、トラフィックのスループットは表 4 に従って変化させた。また、Duration フィールドの値を設定した状態 (NAV 有) と設定しない状態 (NAV 無) の双方で行った。

- (1) カウンターの値をゼロにリセットする。
- (2) N2X を操作し、無線 LAN 部分に流れる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、起動信号の送信を開始する。

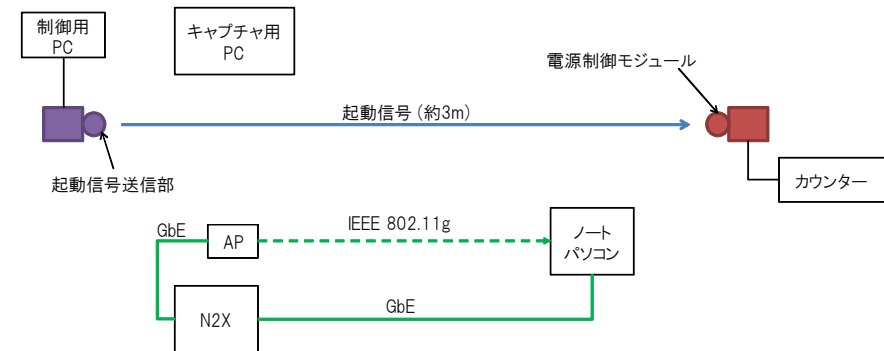


図 11 評価 (1) の環境
Fig. 11 Evaluation environment of the evaluation No.1

表 3 評価 (1) の環境を構成する機器の詳細
Table 3 Detail information of the evaluation No.1's equipments

図 11 での表記	諸元・役割
N2X	Agilent Technologies N2X . 無線 LAN で転送するトラフィックを生成する . トラフィックの詳細は表 4 を参照 .
AP	Planex MZK-W04NU . 802.11b/g/n に対応するアクセスポイントであるが , 使用する通信規格を IEEE 802.11b に固定して使用 .
ノートパソコン	dynabook satellite J80 (Intel Core 2 Duo T9550, WindowsXP) . 有線 LAN (GbE) と無線 LAN(IEEE 802.11b) を WindowsXP のネットワークブリッジ機能でブリッジする .
制御用 PC	起動信号送信部に対して起動信号の送信を指示するためのパソコン .
電源制御モジュール	本 IC を搭載したモジュール (図 4 参照) .
カウンター	本 IC が起動信号を正しく受信した時に出力されるパルスを計測するカウンター .
キャプチャ用 PC	起動信号を含む IEEE 802.11 フレームをキャプチャする PC .

表 4 評価 (1) における無線 LAN トラフィックの条件
Table 4 Conditions of the background WLAN traffic at the evaluation No.1

項目	値
送信チャンネル	起動信号と同じチャンネルを使用
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 1500 バイトを指定し , 試行中は固定とする .

表 5 評価 (1) における起動信号の送信条件
Table 5 Conditions of the wake-up signal transmission at the evaluation No.1

項目	値
送信回数	1000 回
送信間隔	16 ms

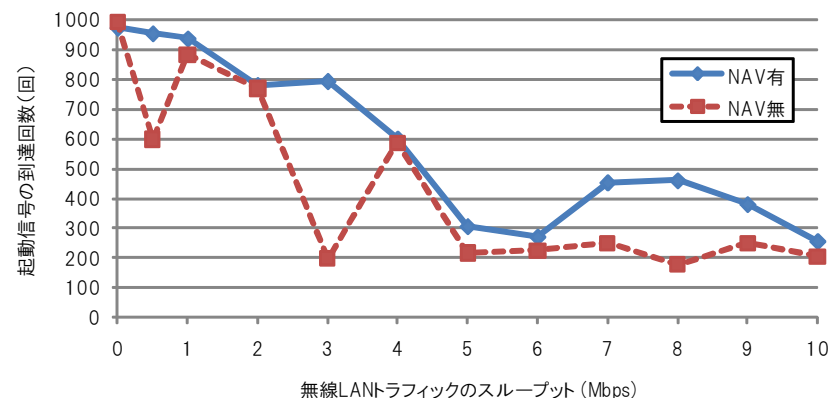


図 12 評価 (1) の結果
Fig. 12 Result of evaluation No.1

- (4) 起動信号の送信が完了したらカウンターの値を記録する .
- (5) 無線 LAN 部分に流れるトラフィックを停止する .

5.2.1.3 評価結果

本評価の結果を図 12 に示す .

5.2.2 評価 (2): 起動信号が IEEE802.11 による通信に与える影響の確認

NAV を用いて起動信号の送信を優先すると , AP や他のノードのフレーム送信が待たされる . ここでは NAV を設定した起動信号が , 通常の無線 LAN フレームの送信に与える影響とそれを含む通信全体に与える影響に対する評価とその結果を述べる .

5.2.2.1 評価環境

評価環境は図 13 および表 6 と表 7 の通りである . 本評価では現実的な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する . なお , トラフィックは無線部での暗号化はせず , 起動信号と同じチャンネルを使用して送信した .

5.2.2.2 評価手順

次の手順を 1 回の試行とし , 起動信号の送信間隔 1 つに対して 3 回繰り返す . 送信間隔は表 7 に従って変化させる . また , Duration フィールドの値を設定した状態 (NAV 有) と設定しない状態 (NAV 無) とで評価する .

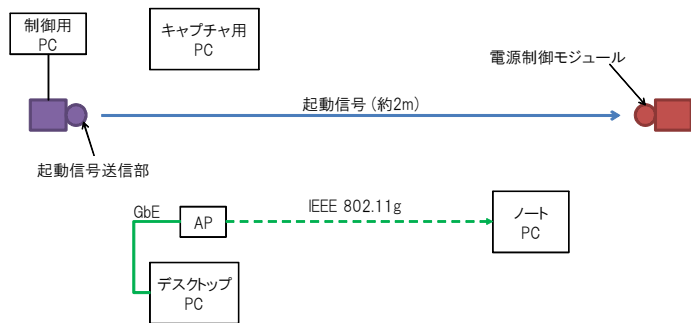


図 13 評価 (2) の環境

Fig. 13 Evaluation environment of the evaluation No.2

表 6 評価 (2) の環境を構成する機器の詳細

Table 6 Detail information of the evaluation No.2's equipments

図 13 での表記	諸元・役割
AP	Planex MZK-W04WN . 使用する通信規格を IEEE 802.11b に固定して利用 .
デスクトップ PC	東芝 Equium 5100 (Intel Pentium 4, 2.8CGHz) . iperf のクライアントとして動作させる .
ノート PC	東芝 dynabook RX3 (Windows 7 SP1, Intel Core i5 M520, 2.4 GHz) . iperf のサーバとして動作させる .
制御用 PC	起動信号送信部に対して起動信号の送信を指示するためのパソコン .
キャプチャ用 PC	IEEE 802.11 フレームをキャプチャする PC .

表 7 評価 (2) における起動信号の送信条件

Table 7 Conditions of the wake-up signal transmission at the evaluation No.2

項目	値
送信回数	8 回 (1 回の送信指示で 8 回送信)
送信間隔	5, 10, 15, 20, 40, 80 ms から選択

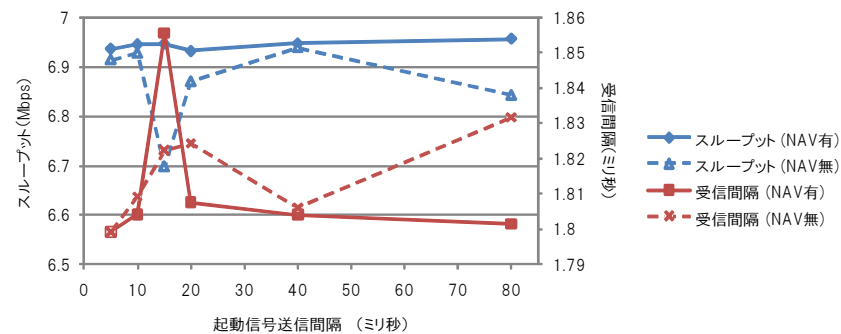


図 14 評価 (2) の結果

Fig. 14 Result of evaluation No.2

- (1) iperf サーバを起動する .
- (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 秒が経過した時に , 起動信号の送信を 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 .

5.2.2.3 評価結果

フレームキャプチャから各送信間隔における平均スループットおよび平均受信間隔を求めた . その結果を図 14 に示す .

6. 考 察

本章では 5 章で述べた評価の結果について考察する .

6.1 実現性に対する考察

5.1 節の結果から , 2.2 節で規定した起動信号が正しく生成できたことが確認できる . 3.1 節で述べた通り , 提案方式では無線 LAN インターフェイスのファームウェアを変更する必要がある . しかし , 現在市販されている無線 LAN インターフェイスの多くは , デバイスド

ライバとファームウェアが共に更新可能であることが多い。そのため、今回のプロトタイプと同様の変更は、他の無線 LAN インターフェイスにも適用できると考える。

6.2 IEEE 802.11 無線 LAN との共存に関する考察

6.2.1 NAV による起動信号の到達性向上に対する考察

評価 (1) の結果 (図 12) から、適切に設定した NAV が起動信号の到達性を向上させることがわかる。ただし、NAV の有無で差が見られ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 3Mbps の場合について分析する。その後、効果が少なかった 4Mbps を分析する。

3Mbps/NAV 無におけるキャプチャからの抜粋を図 15 に、3Mbps/NAV 有におけるキャプチャの抜粋を図 16 に示す。本評価で送信している起動信号は、図 10 に示したものであり、11 個のフレームで構成されている。しかしながら、図 15 では 5 つしか記録されていない。この原因は AP や STA から送信された通常のフレームと衝突したものと考えられる。また、3.5 節にて懸念したように、起動信号の途中で通常のフレームが割り込んでいる (1863 フレーム目)。この例では、RTS や CTS が割り込んでいることから、他のノードが起動信号を送信するノードの存在を検出しており、その送信を一時停止させようとしていることが分かる。一方、図 16 では 11 個全てのフレームが記録されており、NAV によって AP や STA 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 4Mbps/NAV 有におけるキャプチャの抜粋を図 17 に示す。この図では起動信号が 10 個しか記録されていない。記録されたフレームの時間間隔から、先頭のフレームが記録できていないと判断する^{*1}。おそらく 1 フレーム目は、AP や STA が送信するフレームと衝突したために受信できなかったと考えられる。

この原因は、本プロトタイプがキャリアセンスを実行しないことにある。他のノードが通常フレームを送信中であっても、本プロトタイプはキャリアセンスせずに最初のフレームを送信してしまう。その結果、他ノードが送信したフレームと衝突する。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。本プロトタイプは連続して起動信号フレームを送信し続ける。2 フレーム目以降で送信される起動信号フレームには 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、後続の起動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。ただし、起動信号の先頭を検

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
1856	9.876916		00:22:cf:00:fd:51	(RA) IEEE 802.11 Acknowledgement
1857	9.880951	00:00:c0:a8:01:fd	00:24:d2:2f:f4:5a	IEEE 802.11 QoS Data
1858	9.880965		00:22:cf:00:fd:51	(RA) IEEE 802.11 Acknowledgement
1859	9.882951	00:23:18:06:ed:c9	12:34:56:ff:ff:ff	起動信号の一部
1860	9.883438	00:23:18:06:ed:c9	12:34:56:ff:ff:ff	起動信号の一部
1861	9.885388	00:23:18:06:ed:c9	12:34:56:ff:ff:ff	起動信号の一部
1862	9.887344	00:23:18:06:ed:c9	12:34:56:ff:ff:ff	起動信号の一部
1863	9.887529	00:22:cf:00:fd:51 (TA)	00:24:d2:2f:f4:5a (RA)	IEEE 802.11 Request-to-send
1864	9.888329	00:23:18:06:ed:c9	12:34:56:ff:ff:ff	起動信号の一部
1865	9.888552	00:22:cf:00:fd:51 (TA)	00:24:d2:2f:f4:5a (RA)	IEEE 802.11 Request-to-send
1866	9.888679		00:22:cf:00:fd:51 (RA)	IEEE 802.11 Clear-to-send
1867	9.890389	00:22:cf:00:fd:51 (TA)	00:24:d2:2f:f4:5a (RA)	IEEE 802.11 Request-to-send
1868	9.890515		00:22:cf:00:fd:51 (RA)	IEEE 802.11 Clear-to-send
1869	9.892008	00:00:c0:a8:01:fd	00:24:d2:2f:f4:5a	IEEE 802.11 QoS Data
1870	9.892015		00:22:cf:00:fd:51 (RA)	IEEE 802.11 Acknowledgement

図 15 評価 (1) 無線 LAN トラフィック 3Mbps/NAV 無のフレームキャプチャ

Fig. 15 Captured frames at the evaluation (1) (3Mbps, without NAV)

出するために必要なフレームが壊れているため、超低消費電力無線受信 IC は起動信号を受信できない。

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依らずに発生する問題である。今回の評価では、無線 LAN トラフィックと起動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。

図 18 に NAV 有の起動信号を送信した際 (図 16 と同じ試行) の、無線 LAN トラフィックの受信間隔の変化を示す。無線 LAN AP にてフレームがバッファされ、間隔が狭くなっている様子が見て取れる。これにより、起動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、起動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、起動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。

6.2.2 NAV を伴う起動信号が IEEE802.11 による通信に与える影響の考察

評価 (2) の結果から、起動信号を 8 回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。また、無線 LAN 部分のトラフィックに対する起動信号の送信頻度が低いため、

*1 キャプチャに PC を用いているため、厳密なタイムスタンプは得られていない点には注意が必要である。

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		00:22:cf:00:fd:51 (RA)	IEEE 802.11 Acknowledgement
5291	11.320121	00:23:18:09:ed:c9	12:34:56:ff:ff:ff	起動信号の一部
5292	11.320641	00:23:18:09:ed:c9	12:34:56:ff:ff:ff	起動信号の一部
5293	11.321133	00:23:18:09:ed:c9	12:34:56:ff:ff:ff	起動信号の一部
5294	11.322108	00:23:18:09:ed:c9	12:34:56:ff:ff:ff	起動信号の一部
5295	11.322597	00:23:18:09:ed:c9	12:34:56:ff:ff:ff	起動信号の一部
5296	11.323578	00:23:18:09:ed:c9	12:34:56:ff:ff:ff	起動信号の一部
5297	11.324067	00:23:18:09:ed:c9	12:34:56:ff:ff:ff	起動信号の一部
5298	11.324556	00:23:18:09:ed:c9	12:34:56:ff:ff:ff	起動信号の一部
5299	11.325047	00:23:18:09:ed:c9	12:34:56:ff:ff:ff	起動信号の一部
5300	11.325452	00:23:18:09:ed:c9	12:34:56:ff:ff:ff	起動信号の一部
5301	11.326242	00:23:18:09:ed:c9	12:34:56:ff:ff:ff	起動信号の一部
5302	11.328181	00:00:c0:a8:01:fd	00:24:d2:2f:f4:5a	IEEE 802.11 QoS Data
5303	11.328194		00:22:cf:00:fd:51 (RA)	IEEE 802.11 Acknowledgement

図 16 評価 (1) 無線 LAN トラフィック 3Mbps/NAV 有のフレームキャプチャ
Fig. 16 Captured frames at the evaluation (1) (3Mbps, with NAV)

No	Time	Src	Dst	Info.
5261	9.551204	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 Acknowledgement
5263	9.553471	00:23:18:09:ed:c9	12:34:56:ff:ff:ff	起動信号の一部
5264	9.553907	00:23:18:09:ed:c9	12:34:56:ff:ff:ff	起動信号の一部
5265	9.554884	00:23:18:09:ed:c9	12:34:56:ff:ff:ff	起動信号の一部
5266	9.555372	00:23:18:09:ed:c9	12:34:56:ff:ff:ff	起動信号の一部
5267	9.556348	00:23:18:09:ed:c9	12:34:56:ff:ff:ff	起動信号の一部
5268	9.556840	00:23:18:09:ed:c9	12:34:56:ff:ff:ff	起動信号の一部
5269	9.557330	00:23:18:09:ed:c9	12:34:56:ff:ff:ff	起動信号の一部
5270	9.557820	00:23:18:09:ed:c9	12:34:56:ff:ff:ff	起動信号の一部
5271	9.558311	00:23:18:09:ed:c9	12:34:56:ff:ff:ff	起動信号の一部
5272	9.559044	00:23:18:09:ed:c9	12:34:56:ff:ff:ff	起動信号の一部
5273	9.560884	00:00:c0:a8:01:fd	00:24:d2:2f:f4:5a	IEEE 802.11 QoS Data
5274	9.560990		00:22:cf:00:fd:51 (RA)	IEEE 802.11 Acknowledgement

図 17 評価 (1) 無線 LAN トラフィック 4Mbps/NAV 無のフレームキャプチャ
Fig. 17 Captured frames at the evaluation (1) (4Mbps, with NAV)

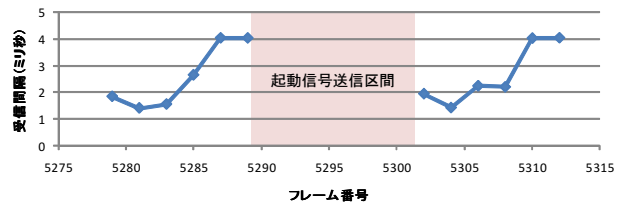


図 18 評価 (1) 無線 LAN トラフィックの受信間隔 (3Mbps, NAV 有)
Fig. 18 Receive interval of the captured frames at the evaluation (1) (3Mbps, with NAV)

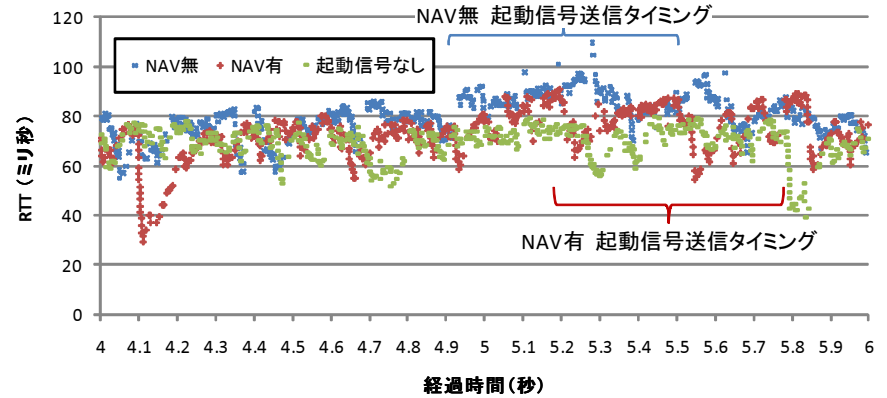


図 19 評価 (2) 無線 LAN トラフィックの RTT 変化 (起動信号の送信間隔 80ms)
Fig. 19 Round trip time at the evaluation No.2 (Interval: 80ms)

大局的には影響が無かったと考えられる。

起動信号を送信した際の局所的なトラフィックの変化を確認するため、キャプチャ結果を分析した。はじめに起動信号の送信間隔を 80ms とした場合の RTT 変化について図 19 に示す。起動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、起動信号を送信しない場合であっても同程度の変動がある。従って、NAV の有無だけでなく、起動信号の送信自体が無線 LAN での通信に対して大きな影響を与えないと判断する。

さらに細かく見るために、起動信号の送信間隔が 15ms と 40ms の試行を 1 つ選び、起動信号を送信している 5 秒後付近にて 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見る (図 20, 図 21)。なお、これらの図は起動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。なお、送信タイミングが異なるため、TCP シーケンス番号には違いが生じている。図中の括弧は起動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 15ms の試行は、図 14 の結果では NAV 有無で差が大きかった。しかし、図 20 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起動信号の送信以外にあると判断できる。一方、送信間隔 40ms の試行では、図 14 の結果にお

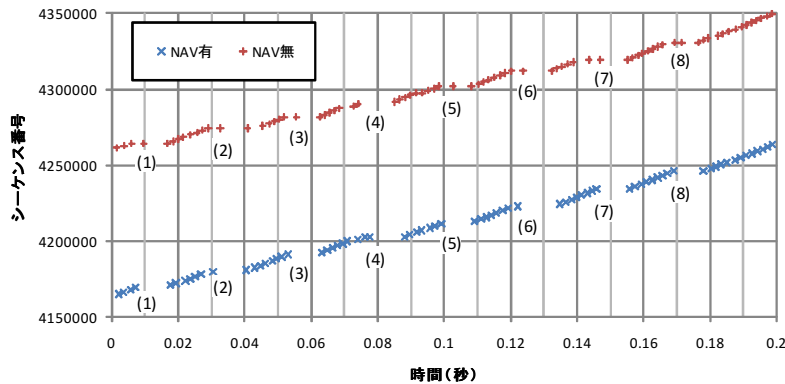


図 20 評価 (2) 無線 LAN トラフィックのシーケンス番号の時間変化 (起動信号の送信間隔 15ms)
Fig. 20 TCP sequence numbers at the evaluation No.2 (Interval: 15ms)

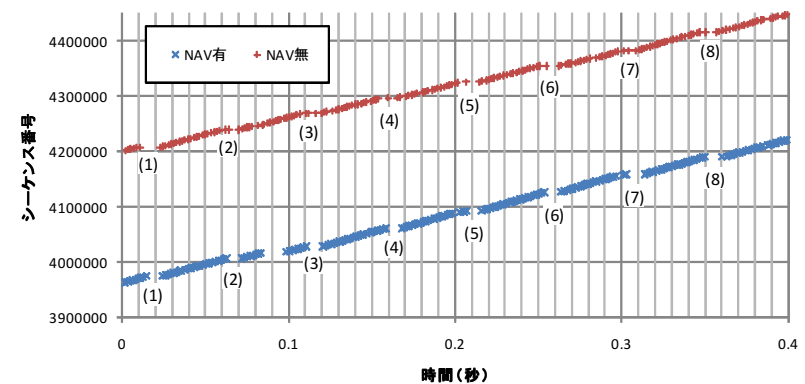


図 21 評価 (2) 無線 LAN トラフィックのシーケンス番号の時間変化 (起動信号の送信間隔 40ms)
Fig. 21 TCP sequence numbers at the evaluation No.2 (Interval: 40ms)

いて NAV 有無の差が見られなかった。実際に図 21 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。また、図 20 および図 21 のいずれにおいても、NAV 無では起動信号の送信中にもフレームが記録されている。このため、起動信号は正常に受信されない可能性が高い。

以上の分析を踏まえると、以下の結論を得る。

- 起動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、その影響は通信特性を変化させるほどではない。
- NAV の設定を伴った起動信号を送信しても、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に変化はない。

7. ま と め

本論文では、小さな待機電力で無線信号を待ちうける無線受信 IC を用いたネットワークシステムにて起動信号を送信する方法を提案した。提案手法は既存の無線 LAN インターフェイスを活用するため、広く普及している WiFi 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。起動信号と無線 LAN との共存について評価を行い、NAV による起動信号の保護ができること及び無線 LAN 通信への影響が小さいことを確認した。

今後は、本提案を含むシステム全体の動作検証を進める。その中で、起動信号の送信機能

と通常の無線 LAN インターフェイスとしての機能を共存などを確認していく。

謝辞 本研究は平成 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, *Proceedings of the 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 (2011).
<http://support.apple.com/kb/HT3774> (オンライン, 2011 年 5 月).
- 3) IEEE: IEEE Std 802.3az™-2010, Amendment 5: Media Access Control Parameters, Physical Layers, and Management Parameters for Energy-Efficient Ethernet (2010).
- 4) Mishra, N., Chebrolu, K., Raman, B. and Pathak, A.: Wake-on-WLAN, *Proceedings of the 15th international conference on World Wide Web, WWW '06*, New York, NY, USA, ACM, pp.761–769 (2006).
- 5) Nissen, N.F.: EuP Preparatory Studies Lot 26: Networked Standby Losses Draft Final Report (2010).

- 6) Pering, T., Raghunathan, V. and Want, R.: Exploiting Radio Hierarchies for Power-Efficient Wireless Device Discovery and Connection Setup, *Proceedings of the 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, *Proceedings of the 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, *Communications Workshops, 2009. ICC Workshops 2009. IEEE International Conference on*, pp.1–5 (2009).
- 9) Umeda, T. and Otaka, S.: ECO chip: Energy Consumption Zeroize Chip with a 953MHz High-Sensitivity Radio Wave Detector for Standby Mode Applications, *Custom Integrated Circuits Conference, 2007. CICC '07. IEEE*, pp.663–666 (2007).
- 10) Umeda, T., Yoshida, H., Sekine, S., Fujita, Y., Suzuki, T. and Otaka, S.: A 950-MHz rectifier circuit for sensor network tags with 10-m distance, *Solid-State Circuits, IEEE Journal of*, Vol.41, No.1, pp.35–41 (2006).
- 11) 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).
- 12) 湯素華, 四方博之, 近藤良久, 小花貞夫: New wakeup transceiver for on-demand wireless LAN, 信学技報, NS2010-184, Vol.110, No.448, pp.117–122 (2011).
- 13) 難波耕佑, 四方博之, 近藤良久, 湯素華: ウェイクアップ受信機を用いた Radio-On-Demand Networks のための ID 設計に関する一検討, 信学技報, NS2010-187, Vol.110, No.448, pp.135–140 (2011).