

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

近藤良久[†] 四方博之^{††} 湯素華[†] 筒井英夫[†] 小花貞夫[†]

筆者らは、必要に応じて端末 (STA) が無線 LAN 信号を用いてスリープ中の無線 LAN アクセスポイント (AP) を起動し、無線 LAN による接続を行なう、AP のオンデマンドウェイクアップ方式を提案してきている。提案方式では、STA は無線 LAN 信号のフレーム長を調整することでウェイクアップ用の信号とし、AP に備えられたウェイクアップ受信機が、無線 LAN 信号のフレーム長を検出することで、ウェイクアップ信号を復号・識別する。本稿では、試作したウェイクアップ受信機ハードウェアについて紹介し、評価結果を報告する。試作機のビット誤り率を測定し、無線 LAN 信号のフレーム長検出誤り率の解析を行なった。結果として、無線 LAN の通信エリアと同等以上のエリアにおいて、提案方式を用いた AP のオンデマンド起動が可能であることを示した。また、フレーム長を検出する際の誤差要因についての解析を行い、ウェイクアップ信号として使用可能な無線 LAN 信号のフレーム長の制限事項について明らかとした。

Development of Wake-up Receiver Prototype for Radio-On-demand Wireless LAN Access Point

Yoshihisa Kondo[†] Hiroyuki Yomo^{††} Suhua Tang[†]
Hideo Tsutsui[†] and Sadao Obana[†]

We have proposed an on-demand wake-up scheme for wireless LAN (WLAN) access point (AP) to provide WLAN users with green wireless access. In our proposed scheme, APs are put into a sleep mode during idle periods and woken up by stations (STAs) upon communications demands. The on-demand wake-up is realized by a wake-up receiver which is equipped with each AP and is used to detect frame length of WLAN frames transmitted by STA as a wake-up signal. In this paper, we introduce a prototype of the proposed wake-up receiver. We evaluate and analyze bit error ratio error ratio of frame length detection of the proposed wake-up receiver by using develop prototype. We show that the on-demand wake-up with the proposed wake-up receiver can cover larger area than communication area of WLAN.

[†]ATR 適応コミュニケーション研究所
ATR Adaptive Communications Research Laboratories
^{††}関西大学 システム理工学部
Faculty of Engineering Science, Kansai University

1. はじめに

近年、スマートフォンなど様々なモバイル端末に IEEE802.11 による無線 LAN 通信機能を搭載する動きが加速しており、無線 LAN を介したインターネット接続に対する需要が増している。無線 LAN アクセスポイント (AP) の設置数も年々増加してきているが、今後ますます増加することが予想される。しかし、AP は子機端末 (STA) の接続がなく、使用されていない状況であっても、電源を入れたままにされることが多く、無駄な電力が消費されているのが現状である 1)。近年の世界的な CO2 排出削減に対する取り組みや、我が国においては電力供給が逼迫する状況のなか、通信にかかる無駄な電力消費を削減することは急務である。また、スマートグリッドを実現するエネルギー管理システムの一部にも、無線 LAN による通信の利用が検討されるなど、無線 LAN は省電力化を実現するシステムを構成する要素としても注目されている。AP の無駄な電力消費を削減することは、直接的に通信にかかる消費電力を削減するに留まらず、波及的に無線 LAN を用いた省電力システムを広く普及させる上でも重要である。

AP の消費電力を削減する最も単純な方法は、使用していない場合は AP にスリープモードを適用することである。しかし、AP のような組み込み装置においては、高度な信号処理を行う無線 LAN モジュールによる消費電力が、装置全体の消費電力に対して相対的に大きいため、無線 LAN モジュールを含む装置の大部分を停止しなければ、大きな省電力効果を得られない。一方、無線 LAN モジュールを停止してしまうと、無線による遠隔からのスリープの解除は困難となり、ユーザの利便性が大きく損なわれる。そこで、筆者らは、無線 LAN 以外に、少ない消費電力で受信待ち受けの可能なウェイクアップ受信機を AP に備え、必要に応じて STA がウェイクアップ用の信号を送信し AP を起動した後に無線 LAN による通信を開始する、AP のオンデマンド起動方式を提案してきている 2)3)。提案方式では、STA は、無線 LAN 信号のフレーム長を利用し、起動を所望する AP を個別に識別する ID (ウェイクアップ ID) を伝送する。AP に備えられたウェイクアップ受信機は、包絡線検波に基づく簡易な受信機であり、超低消費電力で動作する。ウェイクアップ受信機は、受信無線信号の包絡線からフレーム長を検出し、ウェイクアップ ID を復号する。そして、復号した ID と自身に割り当てられたウェイクアップ ID が一致する場合に、AP のスリープを解除する。提案方式では、STA 側に新たなハードウェアを追加する必要がなく、既存の端末装置であってもソフトウェアのアップデートにより AP のオンデマンドウェイクアップ機能を実現でき、コスト面での優位性を持つ。本稿では、この無線 LAN フレーム長を用いたオンデマンドウェイクアップ方式について、試作したウェイクアップ受信機ハードウェアモジュールを紹介し、通信特性の評価結果を示す。評価結果から、提案方式の実現可能性について考察する。

2. 関連研究

超低消費電力で通信の可能なウェイクアップ信号を用い、必要に応じて通信相手のスリープを解除した後に、データ通信を行なうオンデマンド型のウェイクアップ方式は、主にセンサーネットワークを対象にして研究されてきた4)。オンデマンド型のウェイクアップ方式では、低い消費電力で動作可能なウェイクアップ信号送受信の無線通信装置を、起動する側、起動される側、両方の端末に対して付加する必要がある。Sparse Topology and Energy Management (STEM) 5)では、データ通信と同じ無線機をもうひとつ、ウェイクアップ制御用として各々の端末に搭載する。データ通信用の無線機をスリープ状態に保ったまま、ウェイクアップ制御用の無線機でウェイクアップ信号のやり取りを行なう。ウェイクアップ制御用の無線機には、間欠的に起動とスリープを繰り返すスリープスケジューリングプロトコルを実装することで、省電力化を実現している。しかし、高速なデータ通信を行なうものと同じハードウェアをウェイクアップ制御用として用いることは性能的に冗長であり、コスト面で不利である。そこで、ウェイクアップ制御のための通信に特化した、低消費電力で受信待ち受け可能なウェイクアップ制御用の無線機も提案されてきている。これらの多くは、On Off Keying (OOK) といった伝送レートは低いながらも処理がシンプルで、低い消費電力で信号処理が可能な変復調方式を、ウェイクアップ信号に適用している。6)7)8)では、信号増幅器および検波方法を改良することで、低い消費電力を実現した OOK の無線機ハードウェアの提案を行なっている。9)では、OOK をベースにしたウェイクアップ信号用の無線機に加え、Bloom フィルタを利用したウェイクアップ ID の付与方法と、そのマッチング処理までを考慮した無線機ハードウェアの提案を行なっている。

無線 LAN の省電力化に関する研究も多く行なわれているが、それらの省電力化のターゲットはバッテリー駆動を前提とするモバイル端末などの STA である。IEEE802.1110)にも Power Saving Mode が定義されているが、これは STA のスリープ/ウェイクアップを AP がマネジメントするものであり、AP の消費電力を削減する効果はない。11)は、PDA 端末に無線 LAN とは別に微弱無線モジュールを追加することで、センサーネットワークと同様にオンデマンドな PDA 端末の起動を実現している。STA のオンデマンド起動を実現するものであるが、AP のオンデマンド起動へも適用可能な技術である。しかし、ウェイクアップ信号を送信する端末に対してもハードウェアの追加が必要である点は筆者らの提案方式と異なる点である。12)では、無線 LAN 端末にセンサーモジュール (MOTE) を付加し、センサーモジュールにより無線 LAN 信号のレベルを検知することで端末のウェイクアップを行なう方式を提案している。しかし、信号レベルを検出するのみで、ウェイクアップすべき端末を識別するための情報の伝送は行なっておらず、非所望の信号によってもウェイクアップしてしまうことが問題となる。

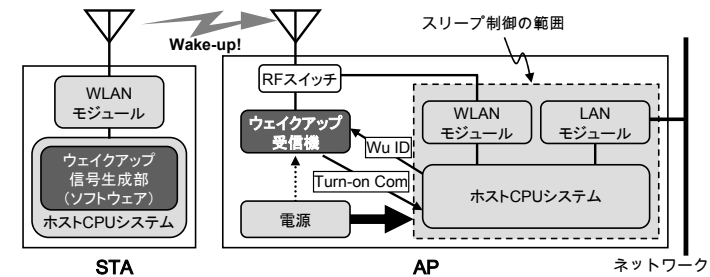


図 1 システム構成図
Fig. 1 System configuration

AP の省電力化をターゲットとした研究は少ないが、プロトコルベースの方式 13)が提案されている。13)では、高密度で配置された AP をクラスタリングし、AP の通信カバレッジを減らすことなく無駄な AP をスリープさせることでネットワークの省電力化を図っている。この方式は、ネットワーク化された AP の省電力を実現するもので、個別の AP の省電力化を実現するものではない。また、端末による AP のリモート起動は導入されておらず、大きな省電力効果は期待できない。

3. 無線 LAN 信号を使ったオンデマンドウェイクアップ

筆者らは、必要に応じて STA が無線 LAN 信号を用いてスリープ中の AP を起動し、無線 LAN による接続を行なう、AP のオンデマンドウェイクアップ方式を提案してきている 3)。図 1 に提案システムの構成を示す。AP はスリープモード時には、ウェイクアップ受信機以外の無線 LAN 通信モジュールも含めた装置の大部分の機能を停止することで省電力化を図る。この際、ビーコンなど無線 LAN の管理フレームの送信も行わない。ウェイクアップ受信機は、自局宛のウェイクアップ信号を受信すると、起動コマンドをホストシステムに対して送出し、AP 全体のスリープを解除する。STA は、ウェイクアップ信号により所望の AP の起動した後、無線 LAN のアソシエーション手順を踏んで AP へと接続する。ウェイクアップ信号の送出は、無線 LAN フレームのペイロードと伝送レートを制御することで行なうため、STA のウェイクアップ信号生成部はソフトウェアとして実現可能である。

無線 LAN 信号を用いたウェイクアップ信号伝送の概略を図 2 に示す。各々の AP のウェイクアップ ID は、ESSID のハッシュ値を基に、固定長としたものを用いる 14)。ESSID の代わりに BSSID を用いても良い。ウェイクアップ ID の生成方法は共有されており、ESSID が分かれば AP と STA 両方において共通の ID が生成可能である。STA において AP への接続の必要が生じると、STA は接続先 AP のウェイクアップ ID を伝

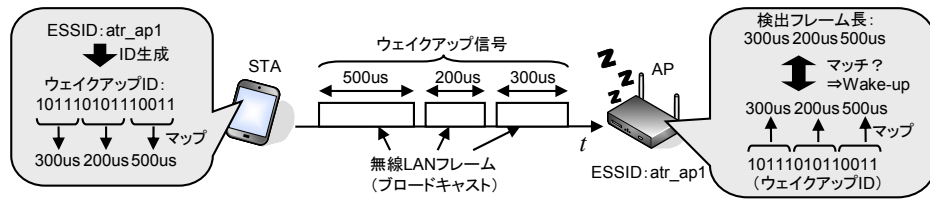


図 2 ウェイクアップ信号伝送の概要
Fig. 2 An overview of wake-up signal transmission

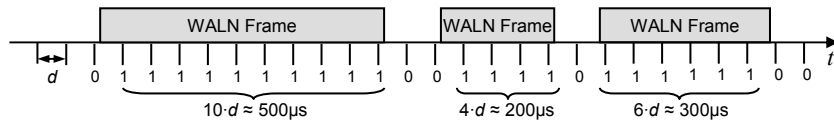


図 3 フレーム長検出例
Fig. 3 An example of frame detection

送するためのウェイクアップ信号を生成する。ウェイクアップ信号は、無線 LAN 信号のフレーム長の組み合わせにより表現され、STA はビット列とフレーム長の対応を示すテーブルを基に、ウェイクアップ ID をフレーム長の組み合わせへと変換する。図 2 の例では、15 ビットのウェイクアップ ID を、3つのフレーム長 (300 μ s, 200 μ s, 500 μ s) へと変換している。STA は、無線 LAN 信号のペイロードと伝送レートを調整し、300 μ s, 200 μ s, 500 μ s それぞれに最も近いフレーム長の無線 LAN フレームを生成し、続けて送出する。AP に実装されたウェイクアップ受信機は、無線 LAN フレームを包絡線検波し、無線 LAN 信号のフレーム長を検出する。AP では、STA 同様、自局の ESSID からウェイクアップ ID を生成し、フレーム長へと変換しておく。受信したフレーム長の組み合わせが、自局のウェイクアップ ID を表すフレーム長の組み合わせとマッチした場合に、起動コマンドにより AP 全体の起動を行なう。

ウェイクアップ受信機は、無線 LAN 信号に対し、処理負荷の大きい通常の無線 LAN 信号としての復号は行なわず、包絡線検波を用いた復号を行なう。ウェイクアップ受信機では、包絡線に対し一定周期のビット判定を行ない、1 の連続数をカウントすることでフレーム長を取得する。図 3 に、フレーム長の取得の概要を示す。

4. 試作ウェイクアップ受信機モジュール

4.1 試作機の概要

提案したオンデマンドウェイクアップ方式を評価するため、ウェイクアップ信号の受信機モジュールを試作した。試作機の機能ブロック図を図 4 に、写真を図 5 に示す。

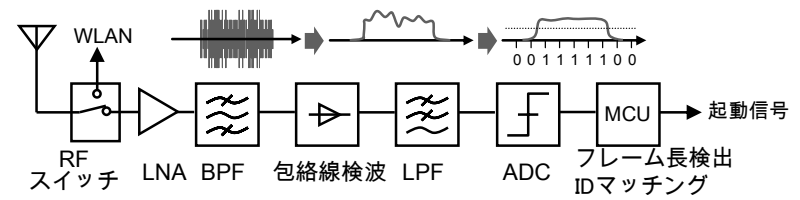


図 4 試作ウェイクアップ受信機機能ブロック図
Fig. 4 A function block diagram of wake-up receiver

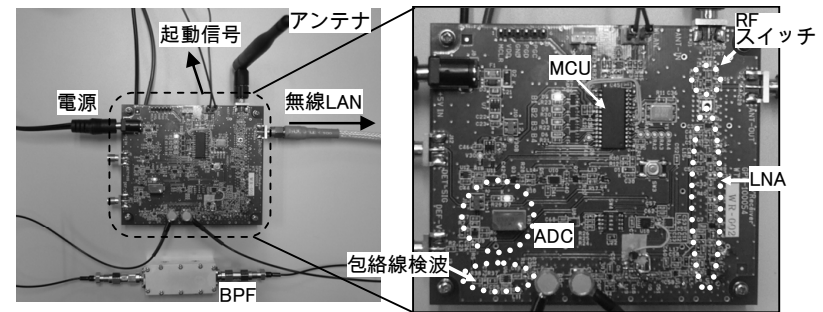


図 5 試作ウェイクアップ受信機
Fig. 5 Develop wake-up receiver prototype

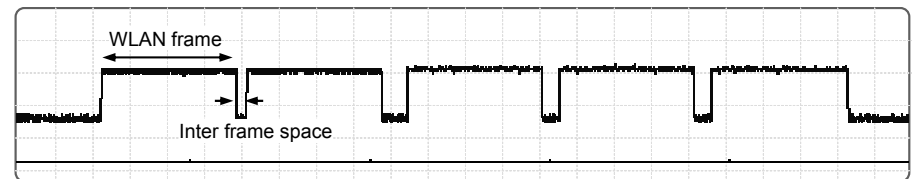


図 6 受信無線 LAN フレームの包絡線
Fig. 6 Envelope of received WLAN frames

試作機では、無線 LAN モジュールと共有するアンテナからの入力信号を、まずはローノイズアンプ (LNA) により増幅する。続いて、増幅した信号をバンドパスフィルタ (BPF) に通し、無線 LAN のひとつの周波数チャンネル内の信号のみを取り出す。提案方式では、ウェイクアップ信号の送信周波数チャンネルを予めひとつ決めておき、BPF の通過帯域は固定する。試作機におけるウェイクアップ信号の通信チャンネルは、

2.4GHz 帯の 13 チャンネル（中心周波数 2.472GHz，帯域幅 20MHz）とした。BPF は、チェビシェフフィルタを用いた。包絡線検波器では、BPF を通過した信号の包絡線を取得する。無線 LAN 信号を包絡線検波すると、変調方式に起因した時間軸での電力レベルのばらつきが生じ、ビット判定によるフレーム長の検出時に誤りが発生しやすい。このため、包絡線にローパスフィルタ（LPF）をかけることで、包絡線を平滑化する。アナログ-デジタル変換器（ADC）では、平滑化され入力された包絡線の電圧値に対し、固定閾値による判定を行なう。閾値より高ければ High を、低ければ Low を出力する。マイクロコントローラ（MCU）では、High および Low の入力を一定周期で識別し、1 もしくは 0 のビット値へと変換し、内部における処理を行う。MCU では、連続する 1 の入力を逐次カウントし、カウント値をフレーム長として扱う。入力ビットが 1 から 0 になるのをトリガとし、カウント数が自局のウェイクアップ ID を表すフレーム長に該当するかを判定する。自局のウェイクアップ ID を表す複数のフレーム長が連続して検出されれば、自局宛のウェイクアップ信号を受信したと見なし、ホストシステムの起動信号を出力する。

試作したウェイクアップ受信機において、LPF と ADC の間の区間にて取得した、受信無線 LAN 信号の包絡線波形を図 6 に示す。無線 LAN 信号は、ペイロードが 1 バイトの UDP パケットを 802.11b（伝送レート 1Mbps）のブロードキャストにより、連続して 5 つ送出したものである。各々のフレームの PLCP ヘッダまで含めたフレーム全体の長さは 712 μ s である。

4.2 基本特性評価

基本特性評価として、試作機におけるビット誤り率の測定を行なった。提案方式では包絡線の電圧値が、閾値を超えていれば 1 を、下回っていれば 0 を判定する。閾値は固定値として与えられるため、提案方式では二種類のビット誤りを考慮しなければならない。ひとつは、信号が送信されている際に 1 と判定すべきところを 0 と判定する誤りである。もうひとつは、信号が送信されていない際に 0 と判定すべきところを 1 と判定する誤りである。前者の誤り率を $p(0|1)$ 、後者をと $p(1|0)$ 表す。後者の $p(1|0)$ は、判定閾値が固定であるため一定値となる。一方、前者の $p(0|1)$ は、受信信号の強度により異なる値となる。試作機においては、 $p(1|0)$ が 10^{-2} 、 10^{-3} 、 10^{-4} となるよう判定閾値を決定し、それぞれの判定閾値における $p(0|1)$ の値の評価を行なった。PC に装着した無線 LAN カード（NEC WL54AG）と試作機を同軸ケーブルにより有線接続し、PC から 802.11b（1Mbps）によって送信した無線 LAN 信号に対し、試作機におけるビット判定誤りを測定した。同軸ケーブル上に可変アッテネータを配し、抵抗値を変えることで、試作機における受信信号強度を調整した。測定ではそれぞれ、50000 サンプルについてビット判定を行なった。

測定の結果得られた $p(0|1)$ を図 7 に示す。横軸は、試作機における受信信号の強度を示す。 $p(1|0)$ を小さくするには、ビット判定の閾値は高い値にする必要がある。この

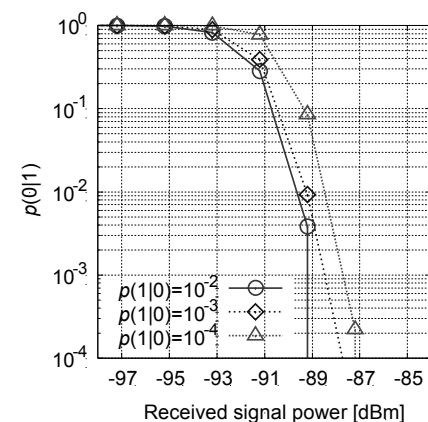


図 7 受信信号強度に対する試作機のビット誤り特性

Fig. 7 Bit error rate of wake-up receiver prototype v.s. Received signal strength

ため、 $p(1|0)$ が小さいほど、 $p(0|1)$ は大きくなり、両者はトレードオフの関係にある。 $p(1|0)=10^{-4}$ の場合、無線 LAN 信号の受信電力が約 -89dBm において、 $p(0|1)$ はおよそ 10^{-1} である。一方、 $p(1|0)=10^{-2}$ の場合、同じ受信電力において、 $p(0|1)$ は 10^{-2} よりも小さな値となる。今回の測定では、-87dBm より大きな受信電力においては、信号が送信されているにも関わらず 0 と判定する判定誤りは発生しない結果となった。

4.3 フレーム長検出

前項で測定したビット誤り率を基に、試作機におけるフレーム長検出の誤り率について解析を行う。フレーム長を正しく検出するための条件は、フレーム送出前の直前の 0 を正しく検出し、フレーム送出期間中は誤りなく連続的に 1 を検出、フレーム送出が終了した直後の 0 を正しく検出することである。同期を行わずに信号の検出を行うことに起因する検出フレーム長の誤差や、LPF によってもたらされる包絡線の鈍りに起因する検出フレーム長の誤差に関する議論は次項にて行うものとし、本項では特別に考慮しない。ある無線 LAN フレームが送出された際、検出されるべき 1 の連続数を n とする。このとき、 n が正しく検出されない誤り率は、下式で表わされる。

$$\text{Error Ratio} = 1 - (1 - p(1|0))^2 (1 - p(0|1))^n \quad (1)$$

前項で示したビット誤り率を基にし、上式によって得られるフレーム長の検出誤り率を図 8 に示す。 n は 21 もしくは 200 とした。これはビット判定周期を 10 μ s とすれば、前者はおよそ 220 μ s、後者はおよそ 2010 μ s のフレームが送出された際に検出されるカウント数である。受信信号の強度が上がり、ビット誤り率が減るに従って、フレ

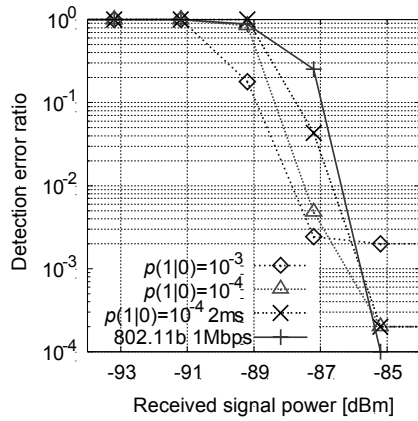


図 8 受信信号強度に対するフレーム長検出誤り率

Fig. 8 Detection error rate of frame length v.s. Received signal power

ーム長の検出誤りも減少する。しかし、高い値の受信信号の強度が得られても、 $p(1|0)=10^{-3}$ では 9×10^{-3} 、 $p(1|0)=10^{-4}$ では 9×10^{-4} よりも低い値には検出誤り率は減少しない。これは、受信信号強度が高い場合は、固定値で与えられる0を1と誤る誤り率 $p(1|0)$ が、フレーム長検出の誤りに対して支配的になるためである。受信電力が -87dBm 付近では、 $p(1|0)=10^{-3}$ の場合よりも $p(1|0)=10^{-4}$ の場合の方が誤り率は大きい。しかし、0を1と誤る誤りが支配的となる受信電力が大きいケースにおいては、 $p(1|0)=10^{-4}$ の場合の方が低い誤り率を達成できる。フレーム長の長い $n=200$ の場合では、より多くの連続する1を誤りなく検出する必要があるため、 $n=21$ の場合よりも誤り率は高くなる。しかし、0を1と誤る誤りが支配的となる受信電力が大きいケースにおいては、 $n=21$ とほぼ同じ検出誤り率となる。

比較のために、試作機の代わりに送信側と同じ無線LANカードを搭載したPCを設置し、通常の無線LANによる通信を行った場合の packets 誤り率を測定した結果を図8内に記載する。送信パケットはペイロードサイズ1byteのUDPパケットを、試作機の測定の際と同様に802.11b(伝送レート1Mbps)のブロードキャストにて送信した。受信電力が高い -85dBm 付近においては、パケット誤り率はフレーム長検出誤りよりも低くなっているが、受信電力が -87dBm 以下においては、パケット誤り率はフレーム長検出誤り率よりも大きくなる。パケット誤り率 10^{-2} を達成できるエリアを通信エリアと定義すると、試作機により 10^{-2} 以下のフレーム長検出誤りを達成できるエリアは、通常の無線LANの通信エリアよりも広いといえる。無線LANが通信可能なエリア内であれば、提案の無線LAN信号を用いたAPのウェイクアップを高い確率で実

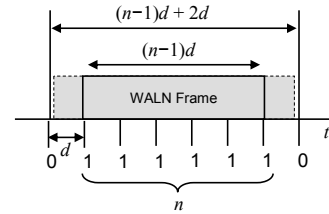


図 9 フレーム長検出誤差

Fig. 9 Frame length detection error caused by asynchronous bit detection

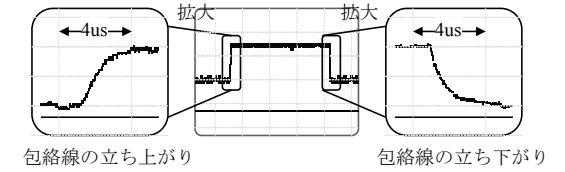


図 10 包絡線の立ち上がりとしち下がり

Fig. 10 Decay of envelope amplitude

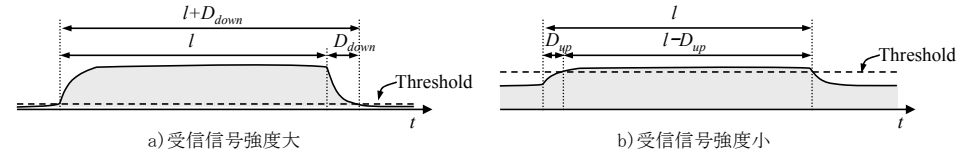


図 11 包絡線の鈍りに起因するフレーム長検出誤差

Fig. 11 Frame length detection error caused by decay of envelope amplitude

現できることが確認された。

4.4 フレーム長検出の誤差を考慮したウェイクアップ信号の設計

提案方式では、ビット判定によりフレーム長を取得するため、フレーム長はビット判定周期に応じた粒度でしか測定することができない。また、受信信号に対する同期は取らず、非同期にて包絡線に対してビット判定を行うため、これによって生じる誤差もフレーム長測定の粒度に影響する。ビット判定の周期を d 、検出されたカウント数を n とすると、実際のフレーム長(包絡線が閾値を超えていた時間長) l は、最大で $2d$ の誤差があることを考慮しなくてはならない(図9)。このため、 $2d$ より細かい粒度でのフレーム長の測定は困難である。ウェイクアップ信号として用い、異なるビット列を表現する無線LANフレーム同士は、少なくとも $2d$ 以上、フレーム長が異なるように配慮しなければならない。

加えて、LPFによって包絡線の平滑化を行っているため、図10に示すような包絡線の立ち上がりとしち下がりの部分に鈍りが生じる。この信号の鈍りによって、フレーム長の検出粒度はさらに劣化する。フレーム長が最も長く検出されてしまうのは、受信信号の強度が大きく、包絡線の立ち下がりへの鈍りによって、フレーム送出終了から判定閾値を下回るまでの時間に遅延が生じる場合である。この遅延時間 D_{down} とすると、このケースでは包絡線の立ち上がりによる遅延の影響は無視できるほど小さいと

考えられるため、包絡線が閾値を超えている時間は $(l+D_{down})$ となる (図 11a)). 一方、フレーム長が最も短く検出されるのは、受信信号の強度が小さく、包絡線の立ち上がりの鈍りによって判定閾値を超えるまでの時間に遅延が生じる場合である。この遅延時間 D_{up} とすると、このケースでは包絡線の立ち上がりによる遅延の影響は無視できるほど小さいと考えられるため、包絡線が閾値を超えている時間は $(l-D_{up})$ となる (図 11b)). 上述の非同期でビット判定を行なうために生じる誤差と併せて考えると、カウンタ数 n が検出されたとしても、実際に送出されたフレーム長 l は、 $(n-1)d-D_{down} \leq l < (n-1)d+2d+D_{up}$ の範囲のいずれかの値であるとしか断定ができない。よって、この LPF による信号の鈍りまで考慮すると、 $2d+D_{up}+D_{down}$ より細かい粒度でのフレーム長の測定は困難であり、ウェイクアップ信号として用いる無線 LAN フレーム同士が、少なくとも $2d+D_{up}+D_{down}$ 以上、フレーム長が異なるよう、ウェイクアップ信号を設計しなければならない。

厳密な D_{up} と D_{down} の値の取得と、LPF を最適化した際の D_{up} と D_{down} の値の検討に関しては今後の課題とするが、試作機の LPF と ADC の間の区間で取得された包絡線を確認すると、現状の試作機における D_{up} と D_{down} は、いずれも $4\mu\text{s}$ 以下と推定することができる。 D_{up} , D_{down} をそれぞれ $4\mu\text{s}$, ビット判定周期 d を $8\mu\text{s}$ とした場合、フレーム長検出の粒度は、最大で $2d+D_{up}+D_{down}=24\mu\text{s}$ であり、ウェイクアップ信号を構成する無線 LAN 信号は、それぞれ $24\mu\text{s}$ 以上、異なる長さとする必要がある。 $24\mu\text{s}$ ごとの異なるフレーム長によってウェイクアップ信号の伝送を行なうものとし、ウェイクアップ信号伝送に使用するフレーム長の最小値を $712\mu\text{s}$, 最大値を $2248\mu\text{s}$ とする。この際、ひとつの無線 LAN 信号により、伝送可能なビット数は、6 ビットである ($(2248-712)/24 = 1536 = 2^6$)。ウェイクアップ ID を 18 ビットとすれば 3 つの無線 LAN フレームの伝送によって、また、30 ビットであれば 5 つの無線 LAN フレームの伝送によって、それぞれウェイクアップ信号の伝送が可能である。

5. おわりに

必要に応じて STA が無線 LAN 信号を用いてスリープ中の AP を起動し、無線 LAN による接続を行なう、AP のオンデマンド起動方式を実現するウェイクアップ受信機ハードウェアの試作を行ない、評価結果を示した。試作機の無線 LAN 信号に対するビット誤り率を測定し、無線 LAN 信号のフレーム長検出誤り率の解析を行なった。試作機において 10^{-2} 以下のフレーム長検出誤り率を達成することができるエリアは、同じく 10^{-2} のパケット誤り率を達成する無線 LAN (802.11b) の通信エリアよりも大きく、無線 LAN と同等以上の通信エリアにおいて、AP のオンデマンド起動が高い確率で可能であることを示した。また、フレーム長を検出する際の誤差要因についての検討を行い、試作機を用いた際は、ビット判定周期を $8\mu\text{s}$, ウェイクアップ信号伝送

に使用するフレーム長の最小値を $712\mu\text{s}$, 最大値を $2248\mu\text{s}$ とした場合、ひとつの無線 LAN フレームで 6 ビットの情報を伝送可能であることを示した。

謝辞 本研究経費の一部に総務省地球温暖化対策 ICT イノベーション推進事業 (PREDICT) 「無駄な消費電力量を削減する Radio On Demand Networks の研究開発」を利用した。

参考文献

- 1) A.P. Jardosh, K. Papagiannaki, E.M. Belding, K.C. Almeroth, G. Iannaccone, B. Vinnakota, "Green WLANs: On-demand WLAN Infrastructures," Mobile Networks and Applications archive, Vol. 14 (6), pp.798–814k, Dec. 2009.
- 2) 伊藤哲也, 近藤良久, 阪田史郎, 池永全志, 四方博之, "無駄な消費電力量を削減する Radio-On-Demand Networks 概要," 電子情報通信学会 2011 年総大会, B-6-132, 2011 年 3 月.
- 3) 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, pp.123-128, 2011 年 3 月.
- 4) I. Demirkol, C. Ersoy, and E. Onur, "Wake-Up Receivers for Wireless Sensor Networks: Benefits and Challenges," IEEE Wireless Communications, vol. 16, no. 4, pp. 88–96, August 2009.
- 5) C. Schurgers, V. Tsiatsis, S. Ganeriwal, M.B. Srivastava, "Optimizing sensor networks in the energy-latency-density design space," IEEE Transactions on Mobile Computing, 1(1), pp.70–80, 2002.
- 6) B. Otis, Y.H. Chee, J. Rabaey, "A 400 μW -RX, 1.6mW-TX super-regenerative transceiver for wireless sensor networks," Proc. IEEE ISSCC 2005, pp. 396–606, Feb. 2005.
- 7) N.M. Pletcher, S. Gambini, J.M. Rabaey, "A 2GHz 52 μW Wake-Up Receiver with -72dBm Sensitivity Using Uncertain-IF Architecture," Proc. IEEE ISSCC 2008, pp.524–633, Feb. 2008.
- 8) D.C. Daly, A.P. Chandrakasan, "An Energy-Efficient OOK Transceiver for Wireless Sensor Networks," IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol. 42, No.5, pp.1003–1011, 2007.
- 9) S. Ishida, T. Takiguchi, S. Saruwatari, M. Minami, H. Morikawa, "Evaluation of a Wake-up Wireless Module with Bloom-Filter-Based ID Matching," Proc. APSITT 2010, pp.1–6, June 2010.
- 10) IEEE 802.11, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, 1999.
- 11) E. Shih, P. Bahl, M. Sinclair, "Wake on wireless: an event driven energy saving strategy for battery operated devices," Proc. ACM MobiCom 2002, September 2002.
- 12) N. Mishra, K. Chebrolu, B. Raman, A. Pathak, "Wake-on-WLAN," Proc. Intl Conf on the World Wide Web (WWW), pp.761–769, 2006.
- 13) P. Lieberman, "Wake-on-LAN technology," http://www.liebssoft.com/index.cfm/whitepapers/Wake_On_LAN.
- 14) 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, pp.135-140, 2011 年 3 月.