

ブルームフィルタを用いたウェイクアップ型通信システム

石田 繁巳^{†a)} 瀧口 貴啓[†] 猿渡 俊介[†] 南 正輝[†]
 森川 博之[†]

A Bloom Filter Based Wake-Up Communication System

Shigemi ISHIDA^{†a)}, Takahiro TAKIGUCHI[†], Shunsuke SARUWATARI[†],
 Masateru MINAMI[†], and Hiroyuki MORIKAWA[†]

あらまし ウェイクアップ型通信方式は必要ときに通信相手をウェイクアップさせることで省電力な通信を実現する方式である。ウェイクアップ型通信方式においては、ウェイクアップを実現する機構の低消費電力化をどこまで進めることができるかが重要となる。本研究ではこの機構の消費電力が、ウェイクアップに用いられるIDの空間構造に影響されることに着目し、ID空間構造にブルームフィルタを用いるウェイクアップ型通信方式を設計する。設計した方式はチップレイアウトレベルのシミュレーションにより評価され、消費電力の側面から本方式が有効となる領域が存在することが示される。

キーワード 省電力通信, ウェイクアップ型通信, ブルームフィルタ

1. ま え が き

スマートフォン等の携帯端末の重要なアプリケーションとして、ヘルスマニタリングサービスが期待されている。そのようなサービスにおいては、身体各处に配置されたセンサからの情報を携帯端末で集約・利用する形態が一般的である。このとき、センサ及び携帯端末はバッテリー駆動になることから、センサと端末双方の省電力化が求められる。一般に、このような系においては、通信の消費電力が支配的要因の一つとなることが知られている [1]~[4]。

これに対し、各種省電力 MAC (Medium Access Control) 技術 [5]~[7] の開発が行われている。省電力 MAC では受信待機電力の削減が重要となる。原理的には送受信端末間の時刻同期が確立できれば TDMA (Time Division Multiple Access) により受信待機電力を削減可能である。しかしながら、この場合には送受信端末間の時刻同期機構が別途必要となる。一方、CSMA (Carrier Sense Multiple Access) をベースにする方式では、通信の非同期性から、受信待機時間が

必要となる。このとき、通信発生時に、必要な端末のみをウェイクアップさせる技術が確立できれば、時刻同期の機構を必要とせずに、受信待機電力の削減が可能となる。

このような要請に対し、ウェイクアップ型通信技術が研究されている [8]~[15]。図 1 に示すように、ウェイクアップ型通信技術はスリープ状態にある受信機を送信機からの信号でウェイクアップさせる技術である。送信機はウェイクアップ要求信号送信モジュールと従来のデータ通信モジュール (微弱無線モジュール等) から構成される。データ通信時には、通信したい端末に対応する ID が含まれるウェイクアップ要求信号を、通信したい端末に対して送信する。

受信機はウェイクアップ要求信号を検出するウェイクアップモジュールと従来のデータ通信モジュールから構成される。ウェイクアップモジュールは信号検出回路 (信号の有無を検出する回路) と ID 受信比較回路 (復調・復号・ID 比較) により構成される受信機であり、信号検出回路は常時動作して受信待機する。ウェイクアップモジュールはウェイクアップ要求信号を検出すると ID 受信比較回路をウェイクアップさせ、ID が自端末宛であればデータ通信モジュールをウェイクアップさせて通信を開始する。

文献 [10] ではウェイクアップモジュールにパッシブ

[†] 東京大学先端科学技術研究センター, 東京都 RCAST, The University of Tokyo, 4-6-1 Komaba, Meguro-ku Tokyo, 153-8904 Japan
 a) E-mail: ishida@mlab.t.u-tokyo.ac.jp

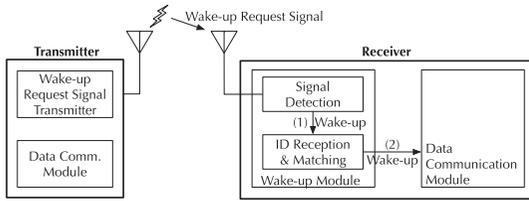


図1 ウェイクアップ型通信技術の概要
Fig. 1 Overview of a wake-up communication technology.

型 RFID を利用することで、ウェイクアップモジュールの受信待機電力をゼロにしている。しかしながら、この方式ではウェイクアップ要求信号の送信に大きな電力が必要となり、送受信側双方の低消費電力化が必要となるヘルスマニタリングサービスのシナリオには適さない。

送信側の電力的負担を下げるためには、受信側で信号増幅等を行う必要がある。このような場合、受信側のウェイクアップモジュールをバッテリー駆動することを認めた上で、その省電力化をどこまで進めることができるかが重要となる。

これに向けて、省電力な信号検出回路の研究が行われている [14]~[16]。例えば文献 [16] では MOSFET を用いたダイオード検波回路において、MOSFET に間欠的にバイアス電圧を印加してしきい値電圧の影響を低減することで $0.14 \mu\text{W}$ で動作する信号検出回路が報告されている。この消費電力はバッテリーの自己放電に相当する電力 (1,000 mAh の Ni-MH バッテリで約 $15 \mu\text{W}$) をはるかに下回る値である。

一方、省電力な ID 受信比較回路の研究も進められており、復調及び復号に関して、省電力な手法が報告されている [17],[18]。これらの研究では、消費電力の小さいリングオシレータを使用したスーパヘテロダイン受信回路や、PWM を用いることで発振回路を不要とした復号回路によって省電力な動作が実現されている。ここで、ID 受信比較回路では、ID 長によって復調系及び復号系の動作時間が決まるため、ID 空間の設計が低消費電力化において重要となる。しかしながら、筆者らが調査した範囲では、これまでのところウェイクアップ型通信技術のための ID 空間の設計について論じた研究は報告されていない。

このような観点から、筆者らはウェイクアップ型無線通信技術における ID 空間の設計について、消費電力の側面から研究を進めている。本論文では ID 空間

構造にブルームフィルタ [19] を適用し、ID 受信比較回路の低消費電力化と送出されるウェイクアップ要求信号の削減を行う手法を示す。

ブルームフィルタはデータセットを効率良く表現可能なデータ構造であり、ハッシュを利用することで ID 長を短縮することができる。また、ブルームフィルタでは複数の ID を一つの ID に縮退させることが可能であり、サービスに対して ID を付与することで、回路規模を大きくすることなく、サービスごとに必要となるデバイスをウェイクアップさせることが可能である。これによりウェイクアップ時に送出されるウェイクアップ要求信号数を削減することができる。

例えば、ヘルスマニタリングにおいて、モニタリングしたい疾患ごとに ID を用意し、各疾患のモニタリングに必要なセンサ群に同一の ID を設定することで、単一 ID で複数のセンサを同時にウェイクアップさせることが可能となる。また、一つのセンサが複数の疾患のモニタリングで使用される可能性があるため、各センサには複数 ID を設定できることが好ましい。ブルームフィルタを用いることで小規模な回路で、これを実現することが可能となる。

しかしながら、ブルームフィルタはハッシュを用いたデータ構造であるため、データ通信モジュールの誤ウェイクアップによる電力消費を原理的に防止することができない。そこで本論文では、ウェイクアップモジュール単体での消費電力の評価に加え、データ通信モジュールの誤ウェイクアップも考慮した評価を行い、本手法の有効範囲を明らかにする。

本論文の構成は以下のとおりである。2. ではブルームフィルタを用いたウェイクアップ型通信の具体的な実現方式について説明する。3. ではチップレイアウトレベルのシミュレーションによってウェイクアップモジュールの消費電力と実装回路面積の評価を行うとともに、データ通信モジュールの誤ウェイクアップを考慮した受信待機電力の評価を行う。

2. ブルームフィルタを用いたウェイクアップ型通信

本章ではブルームフィルタ [19] について説明し、これをウェイクアップ型通信における ID 比較に適用する方法について述べる。

2.1 ブルームフィルタ

ブルームフィルタはデータセットを表現するデータ構造であり、ある要素がデータセットの中に含まれて

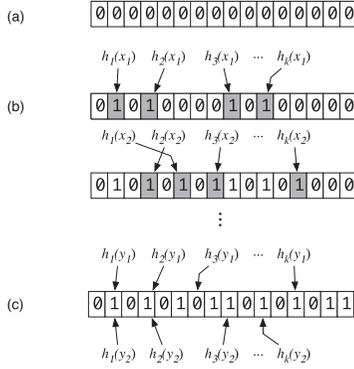


図2 ブルームフィルタの例：(a) 要素が入っていない場合，(b) 要素の追加，(c) メンバ判定
Fig. 2 Example of a Bloom filter: (a) empty, (b) adding an element, (c) a membership query.

いるかどうかというメンバ判定を少ないビット数かつ少ない計算量で行うことができる。

図2にブルームフィルタの例を示す。ブルームフィルタは m ビットのビット列 $BF = \{b_0, \dots, b_{m-1}\}$ であり、要素が何も入っていない初期状態は図2(a)のように0である。図2(b)にブルームフィルタへの要素の追加例を示す。要素の追加には、 $0 \sim m-1$ の範囲の整数をハッシュ値として出力する k 個の独立したハッシュ関数 $H = \{h_1, \dots, h_k\}$ を用いる。追加する要素を x_1 とすると、ハッシュ関数群 H の各ハッシュ関数に要素 x_1 をキーとして入力し、 k 個の独立したハッシュ値 $h_i(x_1)$ ($1 \leq i \leq k$) を得る。ハッシュ値 ($0 \sim m-1$) がブルームフィルタの各ビットを示すものとして、これら k 個のハッシュ値 $h_i(x_1)$ ($1 \leq i \leq k$) が示すビット $b_{h_i(x_1)}$ ($1 \leq i \leq k$) を1にセットすることで要素 x_1 がブルームフィルタに追加される。複数の要素を追加する場合には、 k 個のハッシュ値を計算してハッシュ値が示すビットを1にセットする操作を各要素について繰り返す。すなわち、 n 個の要素をもつデータセット $S = \{x_1, \dots, x_n\}$ を表すブルームフィルタ BF はビット $b_{h_i(x_j)}$ ($1 \leq i \leq k, 1 \leq j \leq n$) が1である m ビットのビット列である。

要素 y がブルームフィルタ BF に含まれているかどうかというメンバ判定は、ハッシュ関数群 H を用いて要素 y から得られた k 個のハッシュ値が示すビットが、ブルームフィルタ BF において全て1であるかどうかによって行われる。図2(c)にメンバ判定の例を示す。要素 y_1 から得られたハッシュ値 $h_3(y_1)$ が示すビット $b_{h_3(y_1)}$ は1でないため、要素 y_1 はブルームフィルタ

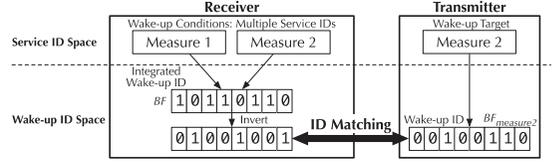


図3 ブルームフィルタを用いた ID 比較
Fig. 3 ID matching using a Bloom filter.

BF に含まれていないと判定される。一方、要素 y_2 から得られた k 個のハッシュ値 $h_i(y_2)$ ($1 \leq i \leq k$) が示すビット $b_{h_i(y_2)}$ ($1 \leq i \leq k$) は全て1であるため、要素 y_2 はブルームフィルタ BF に含まれていると判定される。一般に、各ビットについて演算を行う以下の式を満たす場合に要素 y はブルームフィルタ BF に含まれていると判定される。

$$\overline{BF} \cdot BF_{test} = 0 \quad (1)$$

ここで、 BF_{test} は要素 y から作成された要素数1のブルームフィルタである。

ブルームフィルタを用いたメンバ判定では、要素が含まれていないにもかかわらず含まれていると判定される偽陽性判定が発生する。これは、図2(c)に示す例において、各ハッシュ値 $h_i(y_2)$ が示す各ビットが要素 y_2 を追加した際に1にセットされたのか、他の要素を追加した際に1にセットされたのかを判別できないためである。ブルームフィルタを用いてメンバ判定を行う際は偽陽性判定の影響を考慮することが重要となる。

2.2 ID 比較へのブルームフィルタの適用

ID 比較はウェイクアップモジュールに登録されたID群にウェイクアップ要求信号に対応するIDが含まれているかどうかの判定であり、ブルームフィルタを用いたメンバ判定によりID比較を行うことができる。図3にブルームフィルタを用いたID比較を示す。ここでは“Measure 1”または“Measure 2”というID(サービスID)の指定によってウェイクアップを行う例を示す。なお、このサービスIDが構成する空間は、サービスに必要な十分な大きさをもつようにする(後述の評価では128bitのID空間)。また、この例では、サービス名をIDとしているが、実際のヘルスマニタリングにおいて、他のユーザのデバイスとの識別を明確に行いたい場合には、グローバルユニークなIDとするなどが考えられる。サービスIDの割当方については、今後の課題とする。

ID 比較においては、ウェイクアップの条件となる二つのサービス ID “Measure 1”, “Measure 2” を要素とするブルームフィルタ BF を作成し、 BF をビット反転した \overline{BF} をウェイクアップモジュールに登録する。 BF はウェイクアップの条件を表す ID であり、本論文では BF を統合ウェイクアップ ID と呼ぶ。

ID 比較では、統合ウェイクアップ ID に加えて、ウェイクアップさせる対象を表す ID (ウェイクアップ ID) $BF_{measure2}$ を用いる。ウェイクアップ ID はウェイクアップさせる端末に対応するサービス ID “Measure 2” から作成されたブルームフィルタである。送信端末はウェイクアップさせる対象を表す “Measure 2” というサービス ID を保持しているものとし、サービス ID “Measure 2” からウェイクアップ ID $BF_{measure2}$ を作成して、 $BF_{measure2}$ を含むウェイクアップ要求信号を送信する。

$BF_{measure2}$ を含むウェイクアップ要求信号を受信したウェイクアップモジュールは、受信したウェイクアップ ID $BF_{measure2}$ とビット反転した統合ウェイクアップ ID \overline{BF} を用いて式 (1) によりメンバ判定を行う。メンバ判定の結果、統合ウェイクアップ ID の中に “Measure 2” というサービス ID が含まれていると判定された場合、ウェイクアップモジュールはデータ通信モジュールをウェイクアップさせて通信を行う。

ID 比較において偽陽性判定が発生した場合は、通信対象でない端末のデータ通信モジュールが誤ウェイクアップする。誤ウェイクアップしたデータ通信モジュールは通信の必要性を判断するために受信待機を一定時間行う必要があるため電力を消費する。

3. 評価

ブルームフィルタを用いたウェイクアップ型通信技術が消費電力の側面で有効となる範囲を示す目的で、シミュレーションにより評価を行った。シミュレーションにおいては、ウェイクアップモジュール単体での消費電力及び実装回路面積を評価する。また、ウェイクアップモジュールとデータ通信モジュールを組み合わせた場合の消費電力を、誤ウェイクアップの影響を考慮して評価する。

ウェイクアップモジュールは、ウェイクアップ要求信号の信号検出と復調を行うアナログ回路と、復号と ID 比較を行うデジタル回路から構成される。評価に用いたウェイクアップモジュールのアナログ回路は文献 [20] で設計したものを用いる。通信周波数は距

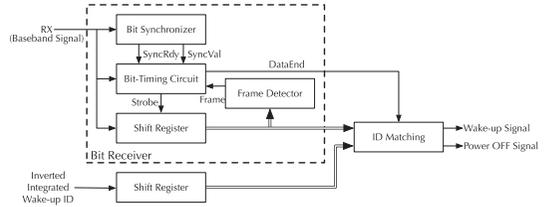


図 4 ウェイクアップモジュールのデジタル回路のブロック図

Fig. 4 Block diagram of a digital circuit of the wake-up module.

離による電波の減衰が比較的小さい 950 MHz 帯とした。変調方式は ASK とし、ダイオード検波回路や非同期な復号回路といった小規模な回路を利用する。また、符号化方式はマンチェスタ符号とし、ポーレートは 40 kBaud である。

ウェイクアップモジュールのデジタル回路は Verilog HDL [21] を用いて設計を行った。図 4 にウェイクアップモジュールのデジタル回路のブロック図を示す。デジタル回路は受信ビット同期回路、受信ビットタイミング維持回路、受信データ用シフトレジスタ、フレーム検出回路、ID 比較回路、及びビット反転した統合ウェイクアップ ID を登録するための ID 登録用シフトレジスタの六つの回路ブロックから構成される。受信ビット同期回路は受信信号とビット同期を行い、受信ビットタイミング維持回路に対してシンボル周期と同期完了信号を出力する。受信ビットタイミング維持回路はシンボル周期の情報をもとに受信ビットのタイミングを維持するとともに、受信ビット数のカウントを行う。受信データ用シフトレジスタは維持されたタイミングを用いて受信データを 1 ビットずつ格納する。フレーム検出回路は格納されたデータの中から、ID に対応するビット列の先頭を検出する。ID 比較回路は、フレーム検出回路出力と受信ビットタイミング維持回路からのビットカウント数の情報を用いて、受信データから ID を抽出・比較する。

3.1 消費電力と実装回路面積

ブルームフィルタを用いたウェイクアップモジュール (ブルームフィルタ方式) の消費電力と実装回路面積を評価する目的で、複数のサービス ID を別々のレジスタに保持して各 ID とビットごとの完全一致比較を行う複数 ID 方式との比較を行った。

まず、ブルームフィルタ方式と複数 ID 方式で共通に用いられるアナログ回路部分について消費電力の評

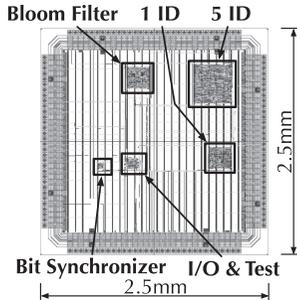


図5 デジタル回路のチップレイアウト
Fig.5 Chip layout of the digital circuit.

評価を行った。アナログ回路の消費電力は HSPICE [22] を用いたシミュレーションにより求めた。シミュレーション結果より、アナログ回路の消費電力は、受信待機時に $12.4 \mu\text{W}$ 、信号受信時は $310.3 \mu\text{W}$ となった。受信待機時の消費電力は信号検出に用いる低周波増幅回路が支配的であり、信号受信時は復調に用いる高周波増幅回路が支配的となる。なお、アナログ回路については実装スキルの観点でチップレイアウトレベルの設計までを行えなかったため、実装回路面積の評価までは行っていない。類似のアナログ回路は文献 [16] で $0.11 \mu\text{m}$ CMOS プロセスによって実装されており、実装面積はチップ写真とその縮尺から約 0.19mm^2 であることが読み取れる。これより、本論文のアナログ回路も 0.19mm^2 程度で実現できる可能性があると推定される。なお、本論文では文献 [16] とは異なり $0.18 \mu\text{m}$ CMOS プロセスで回路設計を行っているが、アナログ回路の実装面積においては微細化によるスケールアップの影響はあまり大きくないため [23]、プロセスルールの相違は考慮していない。

一方、デジタル回路部分については、ブルームフィルタ方式と複数 ID 方式のそれぞれを Verilog HDL で設計し、登録されている ID 数に対する消費電力と実装回路面積を比較した。まず、設計したデジタル回路を Design Compiler [24] と Astro [25] を用いて論理合成・配置配線を行い、 $0.18 \mu\text{m}$ トリプルウェル 1-Poly 5-Metal CMOS プロセスのチップレイアウトを得た。図 5 にデジタル回路のチップレイアウトを示す。チップサイズは $2.5 \text{mm} \times 2.5 \text{mm}$ である。複数 ID 方式については登録 ID 数が 1 個と 5 個の場合のレイアウトを示しており、その他の登録 ID 数については別チップ上へのレイアウトを行った。なお、受信ビット同期回路についてはブルームフィルタ方式と複数 ID 方式

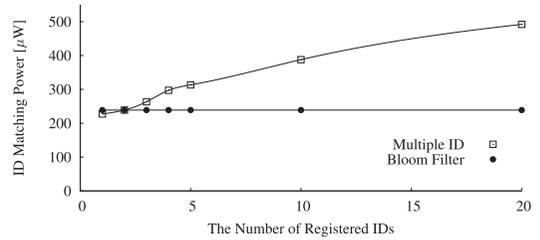


図6 登録されている ID 数に対するデジタル回路の消費電力
Fig.6 Power consumption of the digital circuit as a function of the number of registered IDs.

で共通であるため、独立にレイアウト設計を行った。チップ試作時に使用するための入出力回路とテスト用回路についても実装を行った。得られたチップレイアウトを SPICE ネットリストに変換し、HSIM [26] を用いて消費電力を評価した。回路面積については配置配線ツールの Astro から取得した。クロック周波数は 855kHz 、電源電圧は $0.18 \mu\text{m}$ プロセスで広く使用されている 1.8V とした。また、ヘルスマonitoringなどのセンサネットワークにおいても IPv6 を用いた通信に関する研究が行われているため [27]~[29]、IPv6 を用いたシステムにもウェイクアップ型通信技術を適用できるように ID 長は 128 bit とした。128 bit の ID として IPv6 アドレスを用いることでウェイクアップ型通信を実現できる。なお、個々の端末に割り当てられた IPv6 アドレスだけでなく、マルチキャスト IPv6 アドレスを割り当てることで、1. で述べたヘルスマonitoringの例のようなサービス単位のウェイクアップも実現できる。

図 6 に、登録されている ID 数に対するデジタル回路部分の消費電力を示す。ブルームフィルタ方式の消費電力は $238.8 \mu\text{W}$ であり、複数 ID 方式において、一つの ID を保持する場合 ($227.8 \mu\text{W}$) とほぼ同等である。登録されている ID 数を増加させると、複数 ID 方式では ID を保持するレジスタを増やす必要があるために消費電力がほぼ線形に増加するが、ブルームフィルタ方式では ID の縮退が可能であるために一定の消費電力となる。

受信待機時はアナログ回路のみが動作してデジタル回路は電源 OFF であり、ID 受信時はアナログ回路とデジタル回路の両方が動作する。アナログ回路の消費電力は受信待機時 $12.4 \mu\text{W}$ 、ID 受信時 $310.3 \mu\text{W}$ であるから、ブルームフィルタ方式におけるウェイク

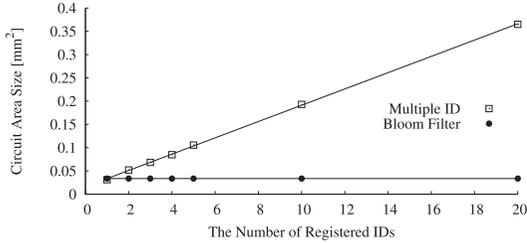


図7 登録されている ID 数に対するデジタル回路の実装回路面積

Fig. 7 Power consumption of the digital circuit as a function of the number of registered IDs.

アップモジュール全体の消費電力は、ID 長が 128 bit の場合、受信待機時は $12.4 \mu\text{W}$ 、ID 受信時は $549.1 \mu\text{W}$ となる。

図7に登録されている ID 数と実装回路面積の関係を示す。ブルームフィルタ方式の回路面積は 0.0337 mm^2 であり、複数 ID 方式でレジスタ数が 1 の場合の 0.0312 mm^2 とほぼ同じである。複数 ID 方式では、消費電力の評価結果と同様の理由により、ID 数が増加するにつれ、回路面積もほぼ線形に増加するが、ブルームフィルタ方式では回路面積は増加しない。アナログ回路の実装回路面積を仮に 0.19 mm^2 とした場合、複数 ID 方式は登録されている ID 数が 10 を超えるとアナログ回路を上回る実装回路面積となる。

3.2 受信待機電力

前節においてモジュール単体でのブルームフィルタ方式の優位性が示されたが、ブルームフィルタ方式では誤ウェイクアップの発生を本質的に回避できない。特にウェイクアップモジュールに比べて消費電力の大きいデータ通信モジュールと組み合わせて使用した場合、誤ウェイクアップの影響により、全体の消費電力の観点で優位性が保てないおそれがある。そこで、誤ウェイクアップを考慮した上で、ブルームフィルタ方式が複数 ID 方式に対して消費電力の側面で優位となる範囲を求めた。

これに向けて、まず、ID 長に対する誤ウェイクアップ率を求めた。その後、求めた誤ウェイクアップ率を用い、ID 長に対する平均受信待機電力（単位時間当たりの誤ウェイクアップを考慮してウェイクアップモジュールとデータ通信モジュールの両方の受信待機電力を加算したもの）を評価した。この結果、平均受信待機電力が最小となる ID 長が存在することが分かった。この ID 長はウェイクアップ要求信号の受信頻度

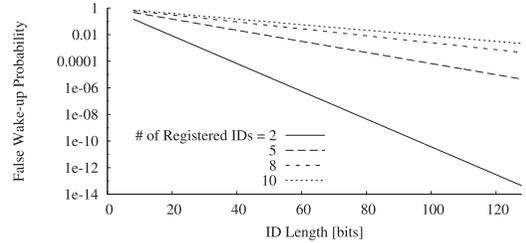


図8 ID 長に対する誤ウェイクアップ率

Fig. 8 False wake-up probability as a function of the ID length.

により変化する可能性がある。そこで、ウェイクアップ要求信号の受信頻度（単位時間当たりの要求信号受信回数）と、平均受信待機電力が最小となる ID 長の関係を調べた結果、その ID 長は受信頻度により変化しないことが分かった。そこで、平均受信待機電力が最小となる ID 長を用い、複数 ID 方式に対して、ブルームフィルタ方式が消費電力の側面で優位となる ID 数の範囲を求めた。以下では、これら一連の評価について詳述する。

(a) 誤ウェイクアップ率

ランダムな ID を含むウェイクアップ要求信号を受信した場合、ブルームフィルタ方式ではブルームフィルタの特性によって定まる確率で誤ウェイクアップが発生する。誤ウェイクアップ率は ID 長 m 、統合ウェイクアップ ID に含まれているサービス ID 数 n 、及びウェイクアップ ID 生成時のハッシュ関数の個数 k から算出できる。ハッシュ関数の個数 k により誤ウェイクアップ率 p を最小化することが可能であり、最小化された誤ウェイクアップ率 p とそのときのハッシュ関数の個数 k は以下となる [30]。

$$p = (1 - e^{-kn/m})^k \quad (2)$$

$$k = \frac{m}{n} \log_e 2 \quad (3)$$

図8に ID 長に対する誤ウェイクアップ率を示す。図中では登録されている ID 数を変化させた場合の結果も示している。なお、ハッシュ関数の個数は各登録 ID 数、ID 長において式 (3) により算出している。図より、ID 長の増加とともに誤ウェイクアップ率は減少することが分かる。また、登録されている ID 数が多い場合には偽陽性判定が増加し、ID 長の増加に伴う誤ウェイクアップ率の減少率が小さくなる。

(b) ID 長に対する平均受信待機電力

次に、(a) で求めた誤ウェイクアップ率を用い、デー

タ通信モジュールの消費電力までを含めた平均受信待機電力を求めた。平均受信待機電力の評価では、ランダムな ID を含むウェイクアップ要求信号を受信し、ウェイクアップ要求信号の受信回数に対して (a) で求めた誤ウェイクアップ率で誤ウェイクアップが発生するものとした。

平均受信待機電力を求める際、データ通信モジュールがスリープ状態から復帰して通信が開始されるまでの遅延時間はモジュールごとに異なることが予想される。IEEE 802.11g モジュールのスリープ状態からの復帰時間は数百ミリ秒程度であるため、データ通信モジュールが誤ウェイクアップした場合には復帰時間の相違の影響を吸収するために復帰時間の 10% 程度に相当する 10 ミリ秒間受信待機してからスリープ状態に戻るものとした。なお、平均受信待機電力の評価では誤ウェイクアップ時のデータ通信モジュールの動作時間に消費電力を乗じた消費エネルギーを算出しているため、データ通信モジュールの受信待機時間を変化させた場合についてはデータ通信モジュールの消費電力を変化させることで等価的に評価できる。

評価においてはウェイクアップモジュールの消費電力とデータ通信モジュールの消費電力が必要となる。ウェイクアップモジュールのデジタル回路部分の消費電力は ID 長にほぼ比例する。ID 長が 128 bit のときの消費電力 238.8 μ W であることから、ID 長が l [bits] のときの消費電力は $238.8 \times l/128$ [μ W] であるとした。

データ通信モジュールの消費電力は、1 mW から 10 W まで変化させた。参考として、市販のデータ通信モジュールの消費電力を調査したところ、データシートに消費電流が明記されている Abicom 社の SDM3100 [31] (IEEE 802.11a/b/g モジュール) で受信待機電力が 610.5 mW である。

なお、この評価においてはウェイクアップ要求信号の受信頻度は 1 秒当たり 2 回とした (受信頻度を变化させた場合の評価については後述)。また、SN 比が高い環境における通信を想定し、ウェイクアップ要求信号に通信エラーは発生しないものとした。

図 9 に ID 長を変化させた場合の平均受信待機電力を示す。ここでは、一例として、データ通信モジュールに SDM3100 を想定し、データ通信モジュールの消費電力を 610.5 mW としている。図より、登録されている ID 数ごとに平均受信待機電力が最小となる ID 長が存在することが分かる。ブームフィルタ方式で

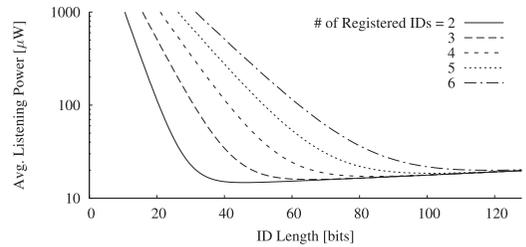


図 9 ID 長に対する平均受信待機電力

Fig. 9 Average listening power as a function of the ID length.

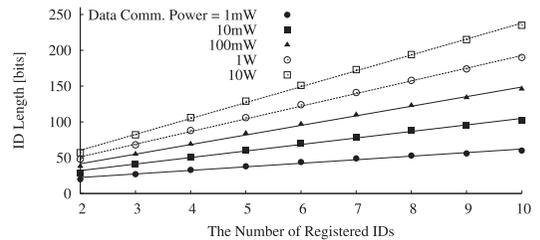


図 10 平均受信待機電力が最小となる ID 長

Fig. 10 ID length minimizing average listening power.

は、ID 長の増加とともに誤ウェイクアップ率が小さくなるため、ID 長の増加に伴い、平均受信待機電力は減少する。しかしながら、ID 長がある程度以上長くなると ID 受信時間が増加するため、平均受信待機電力も増加に転ずる。登録されている ID 数が多い場合には誤ウェイクアップ率が大きくなり、平均受信待機電力も大きくなる。なお、データ通信モジュールの消費電力を 1 mW から 10 W まで変化させた場合も同様の結果が得られている。

次に、平均受信待機電力が最小となる ID 長が、登録されている ID 数に対してどのように変化するかを求めた。図 10 に、データ通信モジュールの消費電力ごとの結果を示す。図より、平均受信待機電力が最小となる ID 長は登録されている ID 数に対してほぼ線形に増加する。また、データ通信モジュールの消費電力によって平均受信待機電力が最小となる ID 長も変化する事が分かる。

このグラフを用いれば、サービスで必要となる ID 数とデータ通信モジュールの消費電力が与えられた場合、平均受信待機電力が最小となる ID 長を決定することができる。しかしながら、この ID 長はウェイクアップ要求信号の受信頻度によって変化する可能性がある。これは、受信頻度が高い場合に、ウェイクアッ

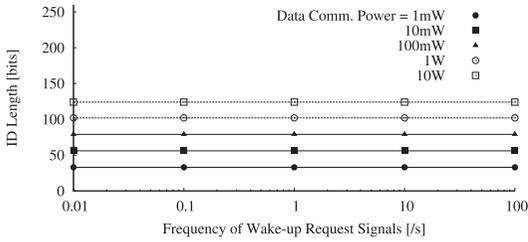


図 11 ウェイクアップ要求信号の受信頻度に対する平均受信待機電力が最小となる ID 長

Fig. 11 ID length minimizing average listening power as a function of the frequency of wake-up request signals.

プロモジュールの動作頻度が高くなり、これが平均受信待機電力に影響する点に起因する。そこで、受信頻度により平均受信待機電力が最小となる ID 長が変化するか否かについて確認を行った。

図 11 にウェイクアップ要求信号の受信頻度に対する平均受信待機電力が最小となる ID 長を示す。ここでは、一例として、登録されている ID 数を 4 個としている。図より、平均受信待機電力が最小となる ID 長は、ウェイクアップ要求信号の受信頻度によっては変化しないことが確認できる。これは、平均受信待機電力において、ウェイクアップモジュールが高頻度で動くために消費される電力よりも、誤ウェイクアップによってデータ通信モジュールが消費する電力が支配的となるためである。この結果、ウェイクアップモジュールの消費電力に起因する平均受信待機電力が最小となる ID 長の変化が 1 ビット以内に収まり、ウェイクアップ要求信号の受信頻度の影響を受けなくなる。なお、登録されている ID 数を 2~10 と変化させた場合についても同様の結果が得られている。

(c) ブルームフィルタ方式の優位性

(b)の結果より、サービスで必要となる ID 数とデータ通信モジュールの消費電力が与えられた場合、平均受信待機電力が最小となる ID 長を決定することができる。そこで、その ID 長を用いた場合に、ブルームフィルタ方式が複数 ID 方式に対して消費電力の側面で優位性を示せる ID 数の範囲を求めた。

図 12 に平均受信待機電力が最小となる ID を用い、データ通信モジュールに SDM3100 を想定した場合の平均受信待機電力を示す。図より、登録されている ID 数が 6 以下であれば複数 ID 方式よりも小さな平均受信待機電力となることが分かる。これは、この範囲においてはブルームフィルタ方式の ID 長が複数 ID 方

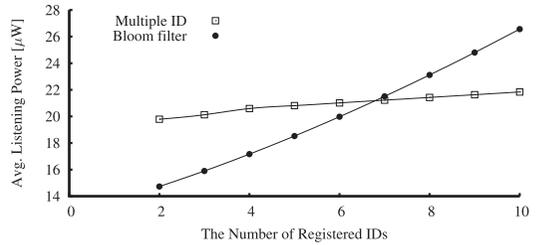


図 12 登録されている ID 数に対する平均受信待機電力
Fig. 12 Average listening power as a function of the number of registered IDs.

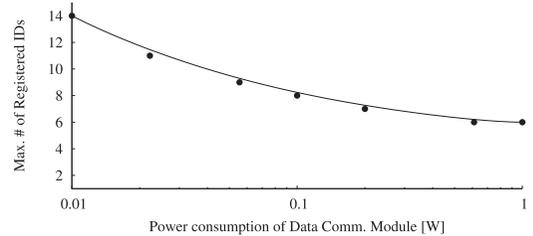


図 13 データ通信モジュールの消費電力に対するブルームフィルタ方式が優位となる ID 数の範囲

Fig. 13 Useful range of Bloom-filter-based ID matching as a function of power consumption of data communication module.

式よりも短くなるためである。しかしながら、登録されている ID 数が 7 以上の場合には、ブルームフィルタ方式の ID 長が複数 ID 方式よりも長くなり、平均受信待機電力において優位性を保てなくなる。

次に、データ通信モジュールの消費電力を変化させた場合に、ブルームフィルタ方式が優位となる ID 数を求めた。図 13 より、データ通信モジュールの消費電力が小さいほど、ブルームフィルタ方式が優位となる ID 数が大きくなるのが分かる。データ通信モジュールの消費電力が小さい場合、図 10 より、平均受信待機電力が最小となる ID 長が短くなる。この結果、ウェイクアップモジュールの消費電力が低くなり、ブルームフィルタ方式が優位となる。

1. で述べたヘルスマonitoringの例では Bluetooth などの近距離無線通信モジュールを用いてデータを収集するため、データ通信モジュールの消費電力は数十 mW である。したがって、図 13 より登録 ID 数が 10 個程度まではブルームフィルタ方式が優位となることが分かる。モニタリングしたい疾患に対して ID を付与するためにセンサ数と ID 数の間に直接の関係はなく、10 個の ID でも多数のセンサに対応することが可能である。しかしながら、ヘルスマonitoringでは

ユーザの要求が多様であるため、登録 ID 数が 10 個あれば十分であるのかどうかを判断することができない。登録可能な最大 ID 数は多ければ多いほど好ましいと考えられる。

使用される登録 ID 数の範囲を判断できないため、ブルームフィルタ方式が優位となる範囲を明らかにすることがまず重要となる。図 13 に示したようにブルームフィルタ方式が優位となる範囲が存在するため、ヘルスマモニタリングのユーザ層によってはブルームフィルタ方式によって受信待機電力を削減できる。また、データ通信モジュールの消費電力が小さくなるとともにブルームフィルタ方式が優位となる最大登録 ID 数が増加していくため、データ通信モジュールの省電力化とともにブルームフィルタ方式によって受信待機電力を削減できる範囲も増加すると考えられる。なお、筆者らの予想の範囲では生活習慣病として分類されている糖尿病、脳卒中、心臓病、脂質異常症、高血圧などの疾患のみをモニタリングするユーザは少なからず存在すると考えられ、ブルームフィルタ方式によって受信待機電力を削減できる場合が十分に存在すると考えている。

アプリケーションの要件から最大登録 ID 数及び使用するデータ通信モジュールの消費電力が定まれば、図 10 と式 (3) を用いてブルームフィルタ方式における ID 長及びハッシュ関数の個数を決定することができる。図 10 より最大登録 ID 数及びデータ通信モジュールの消費電力を用いて ID 長を決定し、式 (3) より最大登録 ID 数と ID 長を用いてハッシュ関数の個数を決定できる。図 13 に示されたブルームフィルタ方式が優位となる範囲であれば、ブルームフィルタ方式を用いることで低受信待機電力のウェイクアップ型通信システムを実現できる。

4. む す び

本論文ではウェイクアップ型通信技術における低消費電力な ID 空間の設計において、ID 空間の構造にブルームフィルタを適用する手法について述べた。ブルームフィルタを用いることで、低消費電力かつ小規模な回路構成でウェイクアップモジュールを構築できることを示した。また、データ通信モジュールの誤ウェイクアップによる影響を考慮したシミュレーションにより、ブルームフィルタ方式が複数 ID 方式に対して優位となる条件を明確化した。今後はアナログ回路を含め、本手法の実装・評価を進めるとともに、信頼性

の面から ID 空間の構造について再考する予定である。また、ウェイクアップ型通信方式と、その上位レイヤの通信プロトコルの関係も明確にする必要があると考えている。

謝辞 本研究の一部は科学技術振興機構 (JST) の戦略的創造研究推進事業 (CREST) の支援、及び東京大学大規模集積システム設計教育研究センターを通しケイデンス株式会社、シノプシス株式会社の協力で行われたものである。

文 献

- [1] M. Stemm and R.H. Katz, "Measuring and reducing energy consumption of network interfaces in hand-held devices," IEICE Trans. Commun., vol.E80-B, no.8, pp.1125-1131, Aug. 1997.
- [2] W. Ye, F. Silva, and J. Heidemann, "Ultra-low duty cycle MAC with scheduled channel polling," Proc. ACM SenSys, pp.321-334, Oct./Nov. 2006.
- [3] V. Raghunathan, T. Pering, R. Want, A. Nguyen, and J. Peter, "Experience with a low power wireless mobile computing platform," Proc. Int. Symp. Low Power Electronics and Design, pp.363-368, Aug. 2004.
- [4] T. Pering, Y. Agarwal, R. Gupta, and R. Want, "CoolSpots: Reducing the power consumption of wireless mobile devices with multiple radio interfaces," Proc. ACM MobiSys, pp.220-232, June 2006.
- [5] W. Ye, J. Heidemann, and D. Estrin, "An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks," Proc. IEEE INFOCOM, vol.3, pp.1567-1576, June 2002.
- [6] J. Polastre, J. Hill, and D. Culler, "Versatile low power media access for wireless sensor networks," Proc. ACM SenSys, pp.95-107, Nov. 2004.
- [7] T. Dam and K. Langendoen, "An adaptive energy-efficient MAC protocol for wireless sensor," Proc. ACM SenSys, pp.171-180, Nov. 2003.
- [8] E. Shih, P. Bahl, and M. Sinclair, "Wake on wireless: An event driven energy saving strategy for battery operated devices," Proc. ACM MobiCom, pp.160-171, Sept. 2002.
- [9] N. Mishra, K. Chebrolu, B. Raman, and A. Pathak, "Wake-on-WLAN," Proc. Int. Conf. World Wide Web (WWW), pp.1-9, May 2006.
- [10] E.S. Hall, D.K. Vawdrey, and C.D. Knutson, "RF rendez-blue: Reducing power and inquiry costs in bluetooth-enabled mobile systems," Proc. IEEE IC-CCN, pp.640-645, Oct. 2002.
- [11] N. Mishra, D. Golcha, A. Bhadauria, B. Raman, and K. Chebrolu, "S-WOW: Signature based wake-on-WLAN," Proc. Int. Conf. Communication Systems Software and Middleware, pp.1-8, Jan. 2007.
- [12] J. Ansari, D. Pankin, and P. Mähönen, "Radio-

- triggered wake-ups with addressing capabilities for extremely low power sensor network applications,” *Int. J. Wireless Information Networks*, vol.16, no.3, pp.118–130, Sept. 2009.
- [13] L. Gu and J.A. Stankovic, “Radio-triggered wake-up capability for sensor networks,” *Proc. IEEE Real-Time and Embedded Technology Application Symp.*, pp.27–36, May 2004.
- [14] S. Mark and G. Boeck, “Ultra low power wakeup detector for sensor networks,” *Proc. SBMO/IEEE MTT-S Int. Microwave and Optoelectronics Conf.*, pp.865–868, Oct. 2007.
- [15] B. Doorn, W. Kavelaars, and K. Langendoen, “A prototype low-cost wakeup radio for the 868 MHz band,” *Int. J. Sensor Networks*, vol.5, no.1, pp.22–31, Feb. 2009.
- [16] T. Umeda and S. Otaka, “ECO chip: Energy consumption zeroize chip with a 953 MHz high-sensitivity radio wave detector for standby mode applications,” *Proc. IEEE Custom Integrated Circuits Conf.*, pp.663–666, Oct. 2007.
- [17] N.M. Pletcher, S. Gambini, and J. Rabaey, “A 52 μ W wake-up receiver with -72 dBm sensitivity using an uncertain-IF architecture,” *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol.44, no.1, pp.269–280, Jan. 2009.
- [18] P. Le-Huy and S. Roy, “Low-power wake-up radio for wireless sensor networks,” *Mobile Networks and Applications*, vol.15, no.2, pp.226–236, April 2010.
- [19] B.H. Bloom, “Space/time trade-offs in hash coding with allowable errors,” *Commun. ACM*, vol.13, no.7, pp.422–426, July 1970.
- [20] 石田繁巳, 鈴木 誠, 森戸 貴, 森川博之, “低受信待機電力無線通信のための多段ウェアイクアップ機構,” *信学技報*, IN2007-218, March 2008.
- [21] IEEE Standards Association, “IEEE standard for Verilog hardware description language (IEEE 1364-2005),” <http://standards.ieee.org/>, April 2006.
- [22] Synopsys, “HSPICE: The gold standard for accurate circuit simulation,” <http://www.synopsys.com/>
- [23] G. Gielen and W. Dehaene, “Analog and digital circuit design in 65 nm CMOS: End of the road?,” *Proc. Conf. Design, Automation and Test in Europe*, vol.1, pp.37–42, March 2005.
- [24] Synopsys, “Design Compiler Ultra,” <http://www.synopsys.com/>
- [25] Synopsys, “Astro: Advanced physical optimization, placement and routing solution for system-on-chip designs,” <http://www.synopsys.com/>
- [26] Synopsys, “HSIM: Hierarchical full-chip circuit simulation and analysis,” <http://www.synopsys.com/>
- [27] J.H. Kim, R. Haw, and C.S. Hong, “Development of a framework to support network-based mobility of 6LoWPAN sensor device for mobile healthcare system,” *Int. Conf. Consumer Electronics (ICCE) Dig. Tech. Papers*, pp.359–360, Jan. 2010.
- [28] D. Singh, S. Singh, M. Singh, H.-P. Kew, D.-U. Jeoung, U.S. Tiwary, and H.-J. Lee, “IP-based ubiquitous sensor network for in-home healthcare monitoring,” *Proc. Int. Multimedia, Signal Processing and Communication Technologies*, pp.201–204, March 2009.
- [29] H. Cao, V. Leung, C. Chow, and H. Chan, “Enabling technologies for wireless body area networks: A survey and outlook,” *IEEE Commun. Mag.*, vol.47, no.12, pp.84–93, Dec. 2009.
- [30] A. Broder and M. Mitzenmacher, “Network applications of bloom filters: A survey,” *J. Internet Math.*, vol.1, no.4, pp.485–509, April 2003.
- [31] AboCom, “SDM3100: 802.11a/g/b SDIO wireless LAN module,” product spreadsheet, <http://www.abocom.com.tw/>
(平成 23 年 2 月 14 日受付, 5 月 1 日再受付)



石田 繁巳 (学生員)

平 18 芝浦工大・工・電子卒。平 20 東大・新領域・基盤情報修士了。現在、同大・工・電気系工博士課程在学中。無線センサネットワーク、省電力無線通信に関する研究に従事。IEEE 学生員。



瀧口 貴啓

平 21 東大・工・電子情報工卒。執筆当時、東大・工・電気系工修士課程。省電力無線通信に関する研究に従事。



猿渡 俊介 (正員)

平 14 電通大・情報工卒。平 16 東大・新領域修士了。平 19 同大・新領域博士了。科博。平 17~20 学振特別研究員, 平 19~20 イリノイ大学客員研究員, 現在, 東大・先端研・助教。無線センサネットワークの研究に従事。本会論文賞受賞。ACM, IEEE, 電子情報通信学会, 情報処理学会各会員。



南 正輝 (正員)

平 8 芝浦工大・工・電子卒. 平 10 同大工・電気工修士了. 平 13 東大・工・電子情報工博士了. 工博. 平 18 スイス・ローザンヌ連邦工科大学客員研究員. 平 15~19 芝浦工大・工・准教授. 平 20~22 東大・先端研・准教授. 現在, 芝浦工大・工・准教授.

本会論文賞 (2 回), 学術奨励賞各受賞. IEEE, 情報処理学会各会員.



森川 博之 (正員:フェロー)

昭 62 東大・工・電子卒. 平 4 同大大学院博士了. 平 9~10 コロンビア大学客員研究員. 平 14~18 情報通信研究機構モバイルネットワークグループリーダー兼務. 現在, 東大・先端研・教授. ユビキタスネットワーク, 無線ネットワーク, モバイルコンピューティング, フォトニックインターネット等の研究に従事.

本会論文賞 (3 回), 情報処理学会論文賞, ドコモモバイルサイエンス賞, 志田林三郎賞, 情報通信功績賞等受賞. 本会編集理事, 情報ネットワーク研究専門委員会専門委員長, ユビキタスセンサネットワーク研究専門委員会専門委員長, 通信ソサイエティ英文論文誌編集長, 東京支部長等.