

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 1 日現在

機関番号：32619

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010 ～ 2011

課題番号：22760265

研究課題名（和文） グリーンネットワークに向けた超低消費電力ウェイクアップインタフェースの研究

研究課題名（英文） An Ultra-Low power Wakeup Device for Energy-efficient Networks

研究代表者

南 正輝（MINAMI MASATERU）

芝浦工業大学・工学部・准教授

研究者番号：70365550

研究成果の概要（和文）：

本研究ではネットワークの低消費電力化に向けて、ブルームフィルタを ID マッチングに用いる、ウェイクアップインタフェースの研究を行った。本機構は、通信デバイスの受信待機電力の削減に効果を発揮するものであり、現行の省電力無線通信デバイスを想定したシミュレーションにより、デバイス数が数個から 10 個程度の場合において、有効に機能することが確認できた。

研究成果の概要（英文）：

A low-power wakeup device was designed in this research. A Bloom filter based ID matching was employed for reducing the energy consumption of the device. Assuming general wireless communication devices, the simulation results showed that the wakeup device was capable of reducing energy consumption of idle listening when a network had less than ten wireless communication devices.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2011 年度	1,500,000	450,000	1,950,000
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：

工学

科研費の分科・細目：

電気電子工学・通信・ネットワーク工学

キーワード：

ネットワーク，ウェイクアップ，グリーン

1. 研究開始当初の背景

ネットワーク機器の急速な普及を背景に、これら機器が消費する電力の急増が問題となっていた。しかしながら、従来のネットワークは連続的な接続性の確保と大容量化に向けた設備の拡充に焦点が当てられており、ネットワークの消費電力問題を解決するための根本的な技術の開発は行われていなかった。

ネットワークの省電力化において最も高い省電力効果を実現する方法は、通信を行っていないときに通信機器をスリープさせ、必要となときに高速にウェイクアップさせることであるが、現行のネットワークでは TCP/IP の遅延感性により、ソフトウェアレベルでの工夫のみではこのような機能を実現することはできない。このため、TCP/IP に対する影響を最小限に抑えつつ、ネットワ

ーク内にスリープ／ウェイクアップ機能を実現するための革新的な通信ハードウェア技術が求められていると考え、本研究を行うこととなった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、ネットワークのグリーン化を最高レベルで実現するための超低消費電力かつ超高速のウェイクアップ機構の実現である。具体的には現行のネットワークの消費電力的ボトルネックの問題の本質に立ち、すべてのネットワーク機器にウェイクアップ機構を具備させることにより、高速性と省電力性を兼備するネットワーキング技術の確立を目的とした。ネットワークに超低消費電力超高速ウェイクアップ機構を導入することにより、消費電力の増加が問題となりつつあるネットワーク機器の劇的なグリーン化を実現することが可能となる。また、同機能を端末機器に導入することで、携帯端末やセンサネットワークなどのバッテリー駆動機器の動作時間を大幅に延長することも可能となる。さらに、消費電力の軸で現行のネットワークを捉えなおすことにより、消費電力を評価指標とした新たなアルゴリズムの開発やサービスの発展も期待できる。

しかしながら、現在のネットワークのグリーン化技術は TCP/IP の遅延敏感性の制約から、省電力効果が最も高いスリープ／ウェイクアップ機能をネットワーク内に具備させることができていない。これに対し、本研究では超低消費電力かつ超高速なウェイクアップ機構をハードウェアレベルで実現することで、ネットワーク内のあらゆる機器にスリープ／ウェイクアップ機能を具備させることを目的とした。本研究では超低消費電力かつ超高速なウェイクアップ機構を実現するためのキーテクノロジーとして、確率的データ構造を用いた複数 ID 対応の ID マッチング機構を中心に据え、ウェイクアップ機構の半導体チップレベルでの実現と性能評価、ウェイクアップ機構をネットワークに導入した場合のインパクト評価、およびウェイクアップを前提とした場合における現行ネットワークの消費電力ボトルネックの明確化を行うこととした。さらに、消費電力的な観点から現行のネットワークアーキテクチャを捉え直し、将来のネットワークのあり方に対して新たな知見と示唆を与えることも目標とした。

3. 研究の方法

ウェイクアップ機構の実現に向け、初年度（平成 22 年度）は超低消費電力・超高速ウェイクアップ機構における ID マッチング機構の設計や複数 ID 対応など、基礎部分の研究開発と初期的評価を中心に進めた。

まず、超低消費電力かつ超高速なウェイクアップを実現するためには ID マッチング部の省電力化と高速化が必須となる。さらに、ID マッチング機構におけるエラーにより、サービスの応答性が損なわれないようにする必要はある。このため、ID の誤検出による誤ウェイクアップに関しては偽陽性であってもよいが、ID の検出ミスによるウェイクアップミスは発生しないようにする必要はある。このような要求要件を満足させる ID マッチング機構として、ブルームフィルタ（ハッシュ関数の一種）を応用した確率的データ構造の利用を検討し、この機構を回路レベルで設計した。

次に、現在の通信機器は、複数の通信インタフェースを備えていること、および、同一の通信インタフェースであっても、ポート番号の様に、サービス毎に識別子が付与される場合もあることなどを考慮し、このような複数 ID 環境にウェイクアップ機構を適用するための拡張を行った。これに向けて、ハッシュを利用した確率的データ構造が複数の ID を一つの ID に縮退させることができる点に着目し、複数 ID 環境でもウェイクアップ可能となるように、ID マッチング機構を拡張した。

さらに、ウェイクアップ機構全体の回路設計と評価を行う目的で、東京大学大規模集積回路設計センター（VDEC）が提供するツール類を用いて、ウェイクアップ機構の回路レベルでの評価を行った。特に、ウェイクアップ機構が有効に働く範囲を明確化するため、確率的データ構造を用いた ID 空間に対する回路規模および消費電力の増加を評価した。

第二年度（平成 23 年度）は、具体的なアプリケーションとして、ヘルスマonitoring システムを想定し、ウェイクアップ機構による省電力効果の評価をさらに進めた。また、無線ネットワークのみならず、有線ネットワークへの適用も視野に入れ、ウェイクアップ機構の応用範囲拡大を模索した。

4. 研究成果

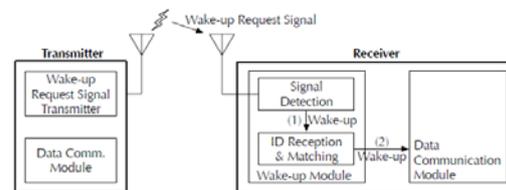


図 1：システム構成

本研究では図 1 に示すような構成のシステムを設計した。このシステムのポイントは、ウェイクアップ機構の消費電力を十分低くすることが可能であれば、データ通信に用いられる通信モジュールをウェイクアップ

機構により電源投入することで、データ通信用の通信モジュールの受信待機電力を削減できる点にある。このとき、前提条件は、ウェイクアップ機構の受信待機電力が十分小さいこととなるため、ウェイクアップ機構自体の低消費電力化をどのように図っていくかが重要となる。ウェイクアップ機構も1種の受信機であるため、その消費電力は特にフロントエンドの回路が支配する。したがって、そのフロントエンド回路の動作時間を可能な限り短くするために、図2に示すような、ブルームフィルタを用いたIDマッチング機構を設計した。

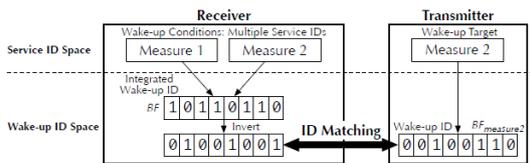


図2: ID マッチング部の構成

この機構のポイントは、ブルームフィルタを用いることで、シフトレジスタ等を用いた単純なIDマッチング回路にくらべ、高速なIDマッチングを実現できる点にある。また、ブルームフィルタ自体が持つ、複数IDの縮退を可能とする特徴により、複数のIDに対応してウェイクアップしなくてはならない場合においても、有効に機能する。

この機構を、VDECが提供するツール類を用い、図3に示すようなレイアウトで設計を行い、回路レベルでのシミュレーションを通じて、ウェイクアップ機構の評価を行った。ウェイクアップ機構のデジタル部の消費電力は、シミュレーションレベルで約240μWであり、アナログ部は受信待機時に12.4μW、受信時に310.3μWとなった。

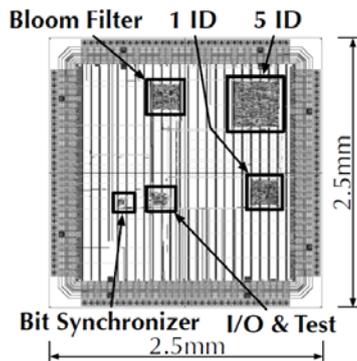


図3: チップレイアウト

このようなウェイクアップデバイスをネットワークに適用し、ウェイクアップ機構が有効に働く範囲を調査した。この評価においては、IPv6等への適用も視野に入れ、ID長

を128bitとし、ヘルスマonitoringのような応用サービスを想定してシミュレーションを行った。

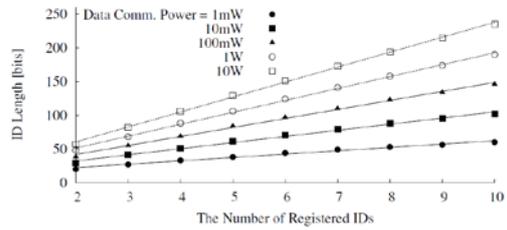


図4: 平均受信待機電力が最小となるID長

図4はウェイクアップ機構に登録するID数に対して、データ通信モジュールの平均受信待機電力が最小となるID長のシミュレーション結果である。この結果から、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ことを示している。そこで、そのようなID長を用いた場合に、ブルームフィルタ方式が、従来のIDマッチング方式である複数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。

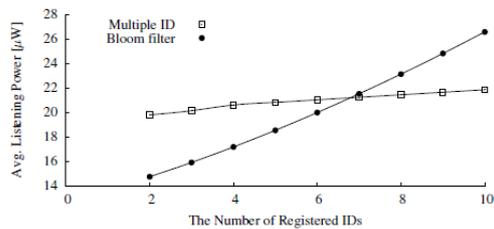


図5: 登録ID数に対する平均受信待機電力

図5に平均受信待機電力が最小となるID長を用い、汎用のデータ通信モジュール(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。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。

そこで、どのような場合にブルームフィルタ方式が優位となるかを調べる目的で、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。

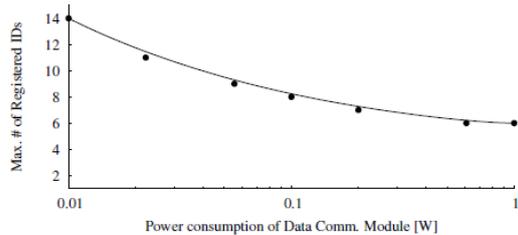


図 6：本方式が優位となる ID 数の範囲

図 6 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、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。例えば、ヘルスマニタリングなどへ適用する場合、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。このような場合には、図 6 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のが分かる。

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、予想の範囲ではあるが、ヘルスマニタリングの具体的な応用として、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、この程度の数のモニタリングにおいては、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 数および使用するデータ通信モジュールの消費電力が定めれば、ブルームフィルタ方式における ID 長およびハッシュ関数の個数を決定することができる。このとき、図 6 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ことが確認できた。

本研究では、このブルームフィルタによるウェイクアップ機構を、ヘルスマニタリング等の小規模無線ネットワークだけではなく、比較的大規模な有線ネットワークへの適用も視野に入れた。しかしながら、無線センサネットワークのような応用分野が明確な対象に

比べ、有線ネットワークの省電力化はその目的や応用サービスが依然として明確ではなく、また、それらを明確にすることも十分にはできなかった。このため、技術先行型の研究に陥ってしまうことを危惧し、TCP/IP との親和性などを含め、有線ネットワークへのウェイクアップ機構の適用については、研究を見送った。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① 石田繁巳, 瀧口貴啓, 猿渡俊介, 南正輝, 森川博之, “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,” 電子情報通信学会論文誌, Vol. J94-B, No. 10, pp. 1397-1407, 2011.

[学会発表] (計 2 件)

- ① S. Ishida, T. Takiguchi, S. Saruwatari, M. Minami and H. Morikawa “Implementation of Bloom-Filter-Based ID Matching for Wake-up Wireless Communication,” Internet of Things 2010 Conference (Poster Session), Royal Park Hotel, Tokyo, Japan, Nov. 30, 2010.

- ② S. Ishida, T. Takiguchi, S. Saruwatari, M. Minami and H. Morikawa, “Evaluation of a Wake-up Wireless Module with Bloom-Filter-Based ID Matching,” 8th Asia-Pacific Symposium on Information and Telecommunication Technologies, Damai Beach Resort, Kuching, Sarawak, Malaysia, June 16, 2010.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

南正輝 (MINAMI MASATERU)

芝浦工業大学・工学部・准教授

研究者番号：70365550