

コンシューマ・デバイス論文

周期的センシングアプリケーション向け 省電力型無線センサノードの開発

安部 恵^{1,2,a)} 水野 忠則³ 峰野 博史¹

受付日 2011年8月11日, 採録日 2011年12月2日

概要: 本稿では無線センサノードの待機時消費電力の低減技術について提案する. 本稿が提案する省電力化方式を実際の試作機に実装し電氣的評価を行った. 間欠動作で 10 分に 1 回, 温度センサ, 温湿度センサ, 照度センサの 3 種類のセンサデータを親機の PAN コーディネータへ送信したときの電池寿命は計算上アルカリ単三乾電池で約 22 年と長寿命化を実現できた. これは ZigBee Alliance 団体が掲げる目標値 (アルカリ単三乾電池 2 本で電池寿命約 2 年以上) を大きく上回る結果となった. また平均消費電力は約 $25 \mu\text{W}$ と超低消費電力化を実現できていることから本提案による省電力方式の有効性が確認できた.

キーワード: 低消費電力化, センサノード, 無線センサネットワーク

Development of a Low-power Consumption Wireless Sensor Node for Periodic Sensing Applications

KEIICHI ABE^{1,2,a)} TADANORI MIZUNO³ HIROSHI MINENO¹

Received: August 11, 2011, Accepted: December 2, 2011

Abstract: In this paper, we propose techniques to develop a low-power consumption wireless sensor node for periodic sensing applications. We developed the prototype and evaluated the electrical characterization in detail. The results show that the prototype sensor node equipped with three sensors, temperature, humidity and illuminance, will work over 22 years theoretically under 10 minutes duty cycle on an AA alkaline battery. This exceeded the guideline of ZigBee Alliance substantially that the low-power devices are expected to last several years on two AA alkaline batteries.

Keywords: low power, sensor node, wireless sensor network

1. はじめに

現在, 無線センサネットワークはスマートグリッド [1], HEMS (Home Energy Management System) [2], 植物工場 [3], 環境モニタリングなどへの適用が期待されている. 無線センサネットワークにおける無線センサノードは

電池駆動である場合が多いため, メンテナンスフリーを実現するには省電力化が非常に重要である [4]. 一般的に IEEE802.15.4, ZigBee などによる無線センサネットワークのセンシング期間は電池駆動で数年以上が求められている [5]. 実際, センサネットワーク向けの無線センサノードでは, 無線通信モジュールと MCU (Micro Control Unit) のみの回路であれば要望の省電力化は可能であるが, アプリケーションに応じて, 別途, 各種・複数のセンサや周辺回路などを拡張すると無線センサノード全体の消費電力は想定以上に大きくなり, 要望の省電力で無線センサノードを動作させることは困難である.

無線センサネットワークの省電力化対策には間欠制御, 低消費電力型 MCU (Micro Control Unit) ならびに無線

¹ 静岡大学創造科学技術大学院
Graduate School of Science and Technology, Shizuoka University, Hamamatsu, Shizuoka 432-8011, Japan
² 浜松職業能力開発短期大学校電子情報技術科
Electronics Information Technology Course, Hamamatsu Polytechnic College, Hamamatsu, Shizuoka 432-8053, Japan
³ 愛知工業大学情報科学部
Faculty of Informatics Science, Aichi Institute of Technology, Toyota, Aichi 470-0392, Japan
a) k3.abe@js.jeed.or.jp

チップの開発 [6], [7], 省電力化の通信プロトコルの研究として S-MAC [8], RF Wake-Up [9] など無線センサノードの省電力化を目指した研究がある。

一般的に無線センサノードの省電力化手法として間欠制御があげられる。無線センサノードの間欠制御では、消費電力の大きな無線通信モジュールと MCU の動作中の期間をつねに短くし、待機時に MCU ならびに無線通信モジュールを長期間スリープ状態にさせることで省電力化が図れる。よって、省電力化を重点に間欠制御を行うと全体的にスリープ動作が占める割合が大きくなる。アプリケーションによっては 90%以上がスリープ状態の場合もあるため、このスリープ動作中の無線センサノードの消費電力をハードウェアの観点からさらに低減できれば大きな省電力化につながるものと著者は考えた。

そこで、本稿ではハードウェアの観点から省電力型無線通信 IEEE802.15.4 準拠の無線センサノードの間欠制御における待機時消費電力の低減技術の提案を行う。ただし、本稿ではデータセンシングの上がり方向のみを扱った周期的センシングアプリケーション向けの非ビーコンモードに適用した無線センサネットワークを想定する。

本提案方式は無線センサノードの待機時に MCU を停止モード、すなわち MCU の内部・外部クロックならびに内部タイマを停止させると同時にセンサを含む周辺回路の電源ラインをすべて遮断することでさらなる省電力化を行う。今回は無線センサノードの待機時にスリープモードよりも省電力化が図れるストップモードを採用することにした。しかし、ストップモード移行後は MCU の内部・外部クロックはすべて停止状態となるので、MCU 自身で停止状態から起床できないという問題がでてくるが、本稿ではこの対策として外付けに RTC (Real Time Clock) を追加するシステムとした。MCU がストップモードに移行する前にこの RTC に起床アラーム時間をセットしてからストップモードに入るようにし、RTC にセットしたアラーム時間が経過すると、RTC のアラーム割込み信号で MCU を起床させる方式とした。これによりストップモード状態の MCU を起床させることが可能となり、センサノードの待機時の消費電力を大きく低減できるものと考えられる。

そこで、本稿が提案する無線センサノードの待機時消費電力低減技術を実際の試作機に実装評価したところ、計算上の動作時間では ZigBee Alliance が掲げるセンサノードの電池寿命の目標値 [10] を大きく上回る省電力効果が得られ、その有効性を確認できたのでその詳細を述べる。

本稿では 2 章で研究の背景について述べ、3 章では本稿が提案する無線センサノードの待機時消費電力の低減技術の提案、4 章では省電力型無線センサノードの試作機の開発について述べ、5 章で試作開発の評価実験について論じ、6 章でまとめを述べる。

2. 研究の背景

2.1 関連研究

アプリケーションによるが一般的に ZigBee や IEEE802.15.4 を使ったセンサネットワークでは数年以上の長期的なセンシングが要求される [12]。たとえば ZigBee Alliance [10] 団体では無線センサノードの電池寿命をアルカリ単三乾電池 2 本で 2 年以上を目標としている。このため無線センサノードの省電力化は重要である。無線センサノード自体を省電力化できれば、電池寿命を延長できるだけでなく、私たちの身の回りにある太陽光、振動、ラジオ放送局の無線エネルギーなど微弱なエネルギーを回収し、2 次電池などに蓄積し、その蓄積したエネルギーで無線センサノードを駆動させることも可能になる [13]。これがエナジーハーベスティングという技術であるが、この技術を用いることでバッテリーレスの無線センサネットワーク実現にもつながる。また、無線センサノードの省電力化が実現できれば無線センサノードの動作時間が増え、センシング可能な時間帯が広がり、電池交換作業などのメンテナンス性向上あるいはメンテナンスフリーにつながる [4]。

ZigBee や IEEE802.15.4 のセンサネットワークでは間欠動作により省電力化を行う機能を持つ。無線センサノードの待機時は消費電力の大きな無線モジュールと MCU を同時に省電力化モードのスリープ状態に移行させ、全体的に無線センサノードが送受信動作している時間帯よりもスリープ時間が占める割合を大きくすることで省電力化を実現できる。

ZigBee と IEEE802.15.4 両者とも IEEE802.15.4 の物理層とメディア・アクセス (MAC) 層を採用しており、大きな違いはネットワーク層からアプリケーションインタフェース層までが ZigBee 規格のプロファイルであるか、開発者依存の独自プロファイルかの違いである [14]。

実際、ZigBee や IEEE802.15.4 の省電力型無線通信で間欠動作を行う場合は IEEE802.15.4 の MAC 層にあるビーコンモードか、非ビーコンモードの 2 通りの方法がある [15]。どのモードを使うかで間欠動作の方法が異なる。ビーコンモードの場合は PAN (Personal Area Network) コーディネータがビーコン信号を定期的送信し、他のノードはビーコン信号に同期して、割り当てた期間に通信する。PAN コーディネータに割り当てられたノードのみがチャンネルを占有して衝突が起こることなく通信が可能となる。よって、ノード間の同期をとり間欠動作と帯域保証通信が行える。しかし、センサネットワークでは数十個以上のノードが動的にネットワークに加わったり離れたりするのでノード数の把握が難しく実際に対応させることは非常に困難である。一方の非ビーコンモードでは周辺ノードと直接通信するメッシュリンクを使う場合はビーコンモードのように間欠動作により省電力化を行うことはできないが、ス

ターリンクを使う場合はセンサノードだけ間欠動作が可能である [15]. この場合、親の PAN コーディネータはつねに起きている状態となり、子のセンサノード側は待機状態とした間欠動作をとることで省電力化が可能となる. 本研究では周期的センシングアプリケーションに向いている後者の IEEE802.15.4 通信準拠による非ビーコンモードのスターリンクに着目し、これを採用することにした.

このほかに無線センサノードの省電力化を行う方法としては、MCU や無線 IC チップなどのデバイス自体の低消費電力化の研究 [7] などがある. またハードウェア設計の観点から省電力化を図ろうとすると MCU の電源電圧ならびに発振クロック周波数を下げることで MCU 自体の省電力化を行う手法 [16] があり、周辺回路は C-MOS のデジタル回路で入力容量、リーク電流などを小さくすることによって消費電力を削減する手法 [17] などがある.

以上のように無線センサノードの省電力化は回路を含めたハードウェアだけでなく、通信プロトコルやアプリケーションでの通信方式まで含めた各種要素技術を統合させることで実現が可能になるものと考えられる.

本稿では IEEE802.15.4 の MAC 層の非ビーコンモードのスターリンクでの間欠動作を利用して、ハードウェアの観点から省電力化を図る. また物理層/MAC 層の上には省電力化を意識した独自プロファイルを含むアプリケーションを搭載する形で開発を行った.

2.2 想定するアプリケーション

本稿で想定している無線センサネットワークのアプリケーションは現在本研究室で研究開発している植物 (メロンなど) の生育状況を監視するシステム [3] や、スマートハウスの中核技術である表示系 HEMS (Home Energy Management System) [2] になる. これらのアプリケーションはセンサノード側に実装された各種センサ (温度・湿度・照度・消費電力など) のセンシングデータを周期的に PAN コーディネータへ届け、センサデータを DB (Data Base) サーバで収集させるシステムである. つまり、我々が想定するアプリケーションとはセンサノードから PAN コーディネータの方向に対してセンシングデータを周期的に送信する上がり方向のみを扱った通信システムであり、センサノード側にはアクチュエータを搭載しないシステムである.

植物の生育状況を監視するシステムならびに表示系 HEMS では以下の事項が要求される.

- 1) 設置性: 自由なレイアウトで素人でも容易に設置が可能であること.
- 2) センシング周期: 1 分~30 分以内であること.
- 3) 消費電力: 半年~数年以上の電池寿命 (単三サイズ以下) であること

要求 1) は ZigBee や IEEE802.15.4 などの無線センサネッ

トワークを用いるならばこの要求はクリアできるといえる.

要求 2) のセンシング周期は構築するシステムによって異なってくるが、たとえば植物の生育状況を監視するシステムでは植物の生育速度がかなり遅いため、数秒単位の細粒度で環境情報 (温度、湿度など) を測定する必要はなく、大体数分から 30 分程度の粒度があれば十分である. このため本研究室の植物の生育状況監視システムでは 10 分の粒度で測定を行っている.

一方の表示系 HEMS では家庭内の個別家電の消費電力測定だけでなく、スマートグリッドで使用するスマートメータと連携させて電力会社側から各家庭内の電気機器の消費電力を監視したり、デマンド監視したりするなどの使い方になる. 経済産業省の「平成 21 年度スマートハウス実証プロジェクト報告書」[11] によると、スマートハウスで用いる表示 HEMS では数分から 30 分以内の粒度で測定する必要があることが要求内容として述べられている. よってこれらのアプリケーションのセンシング周期は 1 分~30 分以内であればよいと考えられる.

次に要求 3) では、これまで我々が開発してきた植物の生育状況を監視するシステムにおいて使用している無線センサノードはルネサステクノロジー製の ZigBee/IEEE802.15.4 評価用ボード [18] を使用している. このセンサノード基板には各種センサ (温度、湿度、照度センサ、モーションセンサ) が実装されている. このときの通信方式は ZigBee の非ビーコンモードで 10 分周期の間欠動作を行っているが、センサノードの消費電流を実測したところ動作時 (データ送信時) 25 mA, 待機時 (スリープ動作) 18 mA と消費電流が大きいため、アルカリ単二乾電池を使用しても約 10 日程度と長期間のセンシングができないという課題があった. この植物の生育監視システムでは最低でも半年以上の長期的なセンシングが要求されるが、現状のシステムでは本ボードに拡張した温度・湿度センサ回路基板の待機時消費電流が大きいため半年以上の長期的なセンシングを行うことは困難である.

センサノードの省電力化には無線通信モジュールと MCU のみの単純な回路であれば電池寿命を数年以上にすることは可能であるが、アプリケーションに応じて、別途、各種・複数のセンサや周辺回路などを拡張すると電池寿命が短くなるという課題がある.

以上により、本稿ではハードウェアの観点からアプリケーションの要求事項である 1)~3) と、IEEE802.15.4 準拠の非ビーコンモードのスターリンクでの省電力化を実現する無線センサノードの開発を行う. ただし、消費電力の目標値は ZigBee アライアンスが掲げる団体目標 (アルカリ単三乾電池 2 本で 2 年以上) を基準に議論する.

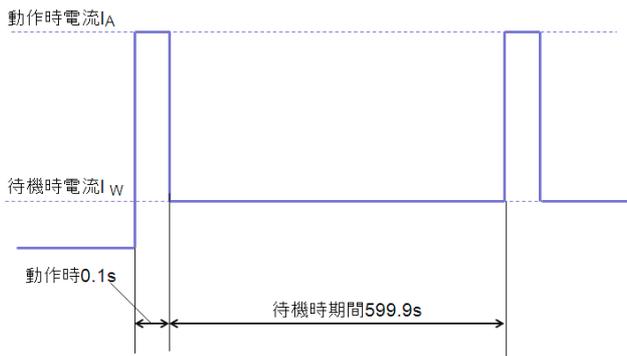


図 2 無線センサノードの動作時と待機時の消費電流波形 (10 分周期)

Fig. 2 Consumption current waveform of wireless sensor nodes in standby and operation (the cycles of 10 minutes).

- (1) 使用する電池タイプ：CR-2 (公称容量 750mAh)
- (2) センシング期間：10分周期
- (3) 各種使用デバイスの待機時と動作時の消費電流：表 1 と表 2 に示す。

今回のシミュレーションでは、無線センサノード側の各種センサの計測を行い、10分に1回の周期で上位のPANコーディネータへセンシングデータを送信するケースで分析してみた。このセンシング周期10分という数字は実際に本研究室が開発している植物の生育状況監視システムに使用している時間である。表1に示す各種電子部品の消費電力より無線センサノード全体の待機時消費電力を求めてみることにした。このとき、センサ周辺回路の電源供給ラインを遮断しない場合と遮断する場合の2つのケースを考え算出してみた。その結果、センサ周辺回路の電源ラインを遮断しないときの待機時消費電流は約5mAになるのに対し、待機時にセンサ周辺回路の電源供給ラインを遮断する本提案方式では56.4μAになり省電力効果があることが確認された。

一方、表2より無線センサノードの動作状態のときの消費電流を算出してみると約33mAになった。動作状態のときは電源ラインの遮断の有無に限らず、動作時消費電流は同じになると考えられる。

これらのパラメータ値を用いて、図2に示すセンシング周期10分、無線センサノードの動作時の期間0.1sで間欠制御を行った場合の電池の寿命を式(2)で算出してみることにした。

$$I_{ave} = \frac{(0.1 \cdot I_A + 599.9 \cdot I_W)}{600} \quad (2)$$

この電池寿命の計算に使う電池タイプ条件はCR-2 (公称容量750mAh)で、電池効率80% (終止2.7V)とした。この条件で無線センサノードの待機時の周辺回路の電源供給ラインを遮断したとき (本提案手法) と遮断しないときの無線センサノードの平均消費電流、平均消費電力、そして電池寿命を算出したものを表3に示す。無線センサノード

表 3 無線センサノードの平均消費電流、平均消費電力、電池寿命 (CR2) の分析結果 (10分周期の場合)

Table 3 Battery life, average current consumption and average power consumption of wireless sensor nodes (the cycles of 10 minutes).

待機時の周辺回路の電源供給ライン	平均消費電流	電池寿命	消費電力
遮断しない	5.0mA	120時間(5日)	15.0mW
遮断する (本提案方式)	61.4μA	9,772時間(407日)	0.184mW

ドが待機状態のときにセンサ周辺回路の電源供給ラインを遮断させたときは遮断しないときと比べて、平均消費電流および平均消費電力が約1/81倍と大きく低減され、無線センサノードの電池寿命が大幅に延びることがこの結果から分かった。

以上の分析結果から本稿が提案する無線センサノードの待機時消費電力の低減技術はきわめて有効的であると考えられる。

4. 省電力型無線センサノードの試作機の開発

本章では本稿が提案する待機時消費電力低減技術を実装した省電力型無線センサノードの試作機を開発した。以下に試作機の開発概要、試作機のハードウェアとソフトウェアの動作について解説する。

4.1 省電力型無線センサノードの試作機の開発概要

図3に開発した各種無線ノードの試作機の概要を示す。今回、開発したモジュール基板は図中の無線ノードモジュール基板を中心に、拡張用モジュールである住環境測定モジュール基板と組み合わせることで建物内の住環境情報(温度、湿度、照度、人感)を取得できる住環境測定向け無線センサノードとして、消費電力測定モジュール基板と組み合わせると家庭内およびオフィス内で使用されているパソコンおよび家電などの個々の消費電力を測定するスマートタップとして、赤外線リモコンモジュール基板と組み合わせることで、赤外線リモコン操作が可能な個別家電などをリモートコントロールできるリモコンノードとして使用できるデザインとした。これは商品化を意識し多種多様なアプリケーションに対応できるよう各種拡張モジュール基板の開発も同時に行った。

ところで、本稿が提案する無線センサノードの待機時消費電力低減機能は無線ノードモジュール基板と住環境測定モジュール基板を組み合わせたとき、すなわち住環境測定向け無線センサノードとして組み立てたときだけこの機能が使えるデザインとしている(図4)。その理由は、スマートタップであれば電源供給方式が家庭用コンセントから取るタイプのため電池寿命を意識しなくてもよいことや、またリモコンノードにおいてはリモート操作のときだけにしか通信イベントが発生しないシステムにしており、今回

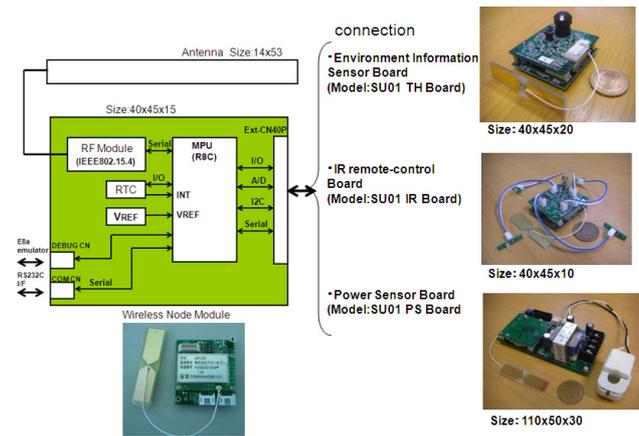


図 3 各種無線ノードの試作機の概要

Fig. 3 Overview of each wireless nodes prototype.

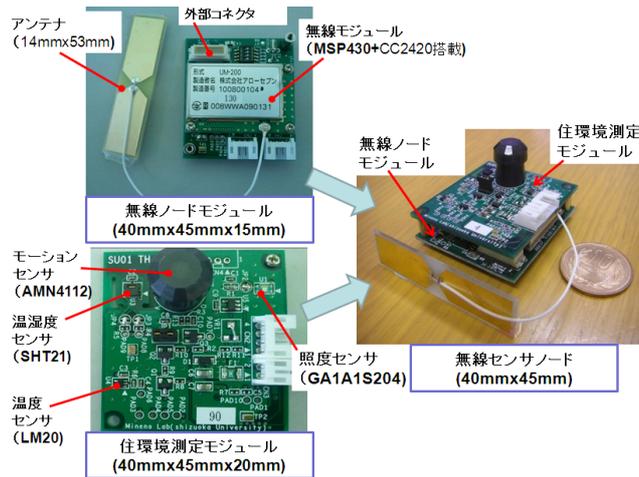


図 5 住環境測定向け省電力型無線センサノードの外観

Fig. 5 Low-power consumption wireless sensor nodes for living climate sensing.

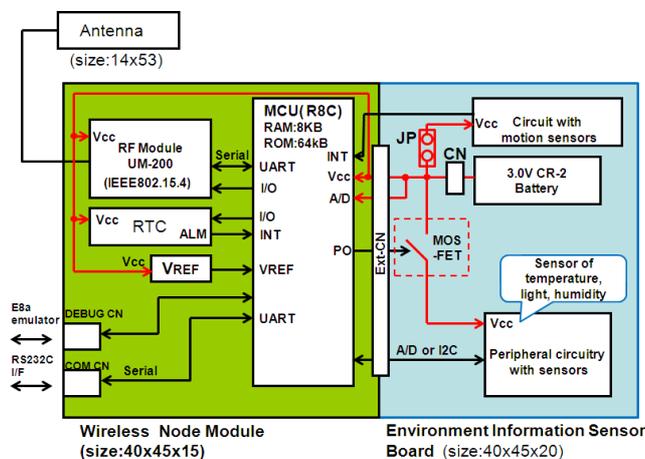


図 4 住環境測定向け省電力型無線センサノードのシステム概要

Fig. 4 System of low-power consumption wireless sensor nodes for living climate sensing.

想定したシステム仕様と異なることから、これらには本稿が提案する待機時消費電力低減機能は実装していない。したがって、本稿では住環境測定向け無線センサノード（以下、無線センサノードと呼ぶ）のシステムについてのみ説明する。

4.2 ハードウェア

無線ノードモジュール基板には、MCU にルネサステクノロジー社の 16 ビットマイコンである R8C/L36C マイコン [16] を用いて、住環境測定モジュール基板上の各種センサ（温度センサ、温度・湿度センサ、照度センサ）の計測、無線通信制御、あるいは本稿が提案する待機時の省電力化制御などを行っている。MCU の内部クロックは内蔵の高速オシレータを使い、発振周波数 9.124 MHz で動作させている。この動作周波数は無線モジュールとの通信速度で 38.4 kbps で行うときボーレートの誤差が 0% になる都合のよい値であることからこの周波数を採用した。

無線モジュールはアローセブン製の UM-200 [21] を搭載

している。この UM-200 の内部に TI 社製 MSP430 という MCU と IEEE802.15.4 (2.4 GHz) 準拠の無線通信が可能な TI 社製の型式 CC2420 という無線通信用の IC チップが内蔵されている。この無線モジュールの制御方法は上位の MCU (R8C/L36C) から UART インタフェースを介し、メーカーが用意した専用コマンドより無線モジュールを制御している。

本稿が提案する待機時の省電力制御を実現させるため外付けの RTC を搭載させているが、これも待機時に極力低消費電力化を図るため、低消費電力タイプ（消費電流 0.5 μ A 以下）の RTC を採用した。

また住環境測定モジュール基板側には、図 5 に示すように省電力タイプの温湿度センサ（センシロン製 SHT21）、照度センサ（シャープ製 GA1A1S204）、人感センサ（パナソニック電工製 AMN4112）など各種センサを実装している。モーションセンサ以外の各種センサはアナログ出力タイプのため MCU 内蔵の A/D 変換を用いて処理を行っているが、モーションセンサだけデジタル出力タイプのため MCU の割込みで処理を行わせている。このため、モーションセンサだけ人を検知することに割込みで MCU に知らせるデザインにしている。

この住環境測定モジュール基板側にセンサを含む周辺回路の電源供給ラインを ON/OFF 制御させるため、待機時漏れ電流が少ない MOS-FET を使用している。ただし、モーションセンサ回路については別途のアプリケーションにも対応させるため MOS-FET で直接 ON/OFF できない仕様になっているが、もしもモーションセンサが不要の場合は住環境測定モジュール基板上にあるジャンパ JP をオープンにすることでモーションセンサを無効にできるデザインとした。

また本モジュール基板内はすべて電源電圧 3V の電池駆動のデザインにしている。電池ホルダと本モジュール基板

とはコネクタ接続にしているため、各種電池に対応した電池ホルダ用ハーネスを用意でき、かつ電源電圧 3V であればどのタイプの電池でも扱えるデザインとした。

さらに PAN コーディネータとセンサノードの動作切換えを無線ノードモジュール基板上にある DIP スイッチ設定で行えるデザインとした。

4.3 ソフトウェア

ここでは無線センサノードの MCU (R8) のソフトウェアの処理について説明する。この無線センサノードでは親の PAN コーディネータか、子のセンサノードのどちらかで動作できるよう 2 つのプログラムを搭載しており、無線ノードモジュール基板上にある DIP スイッチの入力状態で役割を切り換えるデザインとした。電源を投入すると MCU がブートする。このとき、MCU は無線ノードモジュール基板上の DIP スイッチの入力状態を見て、起動モードが PAN コーディネータかセンサノードかを判断し、ブート完了後周辺機器機能の初期化を行う。PAN コーディネータを選択した場合は初期化完了後、PC とターミナル接続し PC のターミナルからコマンドを発行することでセンサノードを制御する処理ループに入るのに対し、センサノードを選択した場合は初期化完了後、PAN コーディネータからのコマンド待ち処理ループに入る。PAN コーディネータから計測開始コマンド (START コマンド) を受け取ると住環境測定モジュール基板上にあるモーションセンサを除いた各種センサ (温度、湿度・湿度、照度) のセンシング処理を開始させる。この処理では各種センサの計測を行い、計測したセンサデータをすべて PAN コーディネータへ送信する。データ送信完了後、MCU は無線モジュール UM200 をスリープ状態に移行させてから RTC に起床アラーム時間 (デフォルト値は 10 分) をセットし、MCU 自身をストップモード (省電力状態) に移行させ、センサノード全体を待機状態に変化させる。RTC にセットしたアラーム経過割込み信号あるいはモーションセンサに反応があった場合は MCU をストップモードから起床させる。このため RTC にセットするアラーム時間が間欠動作の周期設定となる。起床後は各種センサの計測を行い、センサの計測完了後は PAN コーディネータへセンシングデータを送信し、送信完了後は待機状態へ移行するという動作を永久的に繰り返す動作にしている。ただし、モーションセンサが不要のときは住環境測定モジュール基板側にあるジャンパ JP をオープンにすれば無効にできる。モーションセンサを無効にすると、モーションセンサからの反応でストップモードから起床せず、かつモーションセンサ回路分の消費電力を削減できる。

5. 試作機の評価実験

本章では実際に試作機として開発した省電力型無線ノード

ドモジュール基板と住環境測定モジュール基板を組み合わせた無線センサノードの動作時および待機時の消費電流などを測定し、3.2 節の分析結果との比較評価を行い、本稿で提案する待機時消費電力低減技術の有効性の確認を行った。

5.1 実験

この実験では IEEE802.15.4 規格の無線通信で、センサノードと PAN コーディネータとを 1 対 1 で通信させる形で実験を行った。このときの通信距離は約 1m である。PAN コーディネータとパソコンを UART-USB 変換ケーブルで接続し、パソコンから PAN コーディネータに対しセンシング開始のスタートコマンドを送信することで、センサノードの測定を開始させ、間欠動作のときのセンサノード側の動作時および待機時の消費電流などを測定器で直接測定することで評価を行った。

センサノードの消費電力、消費電流などの測定にはデジタルマルチメータ (型式 DL-2050/TEXO 製) を使用した。また無線センサノードの状態遷移などの所要時間の測定方法はデジタルオシロスコープ (型式 TDS2022B/Tektronix) を使って、センサノードの消費電流波形観測から求めた。

5.2 消費電力測定結果

表 4 に試作機のセンサノードの待機時および動作時の消費電流などの実測値を示す。本試作機の実測値は表 4 に示すように動作時の消費電流は 26.8mA で、待機時は 36.6 μ A である。各種電子部品のメーカーのデータシートをもとに 3.2 節のシミュレーションで分析した値では動作時の消費電流は 33mA で、待機時は 56.4 μ A であった。これらを比較すると、実測値の方がシミュレーションの分析値よりも消費電流が低く良好な結果になった。これはシミュレーションで算出する際に本センサノードで使用している各種電子部品のデータシートのパラメータの参考値として最悪値を使用したことがこのような差を生み出す原因につながったと考えられる。

ところで、センサノードが動作状態よりも待機状態に移行したときの方が消費電流を大きく低減できており、本提案方式を実装したことによる有効性が確認できた。

次に表 4 の実測値より平均消費電流を式 (2) より算出す

表 4 試作開発した無線センサノードの待機および動作時の消費電流実測値

Table 4 Measured consumption current of prototype development wireless sensor node in standby and operation.

無線センサノードの状態	電圧 [V]	消費電流 [mA]	消費電力 [mW]
待機状態 (ストップモード)	2.98	0.0366	0.109
動作状態 (送信+計測等)	3.02	26.8	80.9

表 5 モーションセンサ有無の待機時消費電流実測値

Table 5 Measured standby consumption current at the time of presence or absence of motion sensor.

モーションセンサの有無	電圧 [V]	待機時消費電流 [μ A]	消費電力 [μ W]
有り	2.98	36.6	109
無し	3.02	3.8	11

ると平均消費電流は $41 \mu\text{A}$ になる。3.2 節のときと同様使用する電池を CR-2 (公称容量 750mAh) とし、電池効率 80% (終止 2.7V) で平均消費電流を求め、そこから無線センサノードの電池寿命を算出すると、電池寿命は約 $14,634$ 時間 (609.75 日) となり、年数に換算すると約 1.67 年になった。ところで ZigBee Alliance が目標にしている無線センサノードの電池寿命はアルカリ単三乾電池 2 本で約 2 年以上である [10]。今回求めた実測値からこのアルカリ単三乾電池 (公称容量 $2,000 \text{mAh}$) に換算しなおすと、無線センサノードの電池寿命は約 4.45 年 (約 $1,626$ 日間) となり、本提案方式を用いることで ZigBee Alliance が掲げる目標値よりも大きく達成できた。

ところでモーションセンサは表 1 から明らかなように他の電子部品と比べて待機時消費電力が最も大きい。またアプリケーションによってはモーションセンサを使わないケースも考えられるため、今回はモーションセンサの有無でのセンサノードの消費電流測定を行った。その結果を表 5 に示す。モーションセンサなしのときの使用可能なセンサは温度センサ、温度・湿度センサ、照度センサの 3 タイプだけである。モーションセンサなしでセンサノードを動作させると待機時消費電流は $3.8 \mu\text{A}$ となり、モーションセンサありのときの待機時消費電流と比較すると約 $1/10$ 以下になった。動作時消費電流 26.8mA 一定とし、式 (2) よりモーションセンサなしのときの平均消費電流を求めると約 $8.27 \mu\text{A}$ になった。この値から CR2 電池で無線センサノードの電池寿命を算出すると約 7.87 年 ($2,873.6$ 日間) となった。一方、アルカリ単三乾電池では約 22 年 ($8,061$ 日間) となった。しかし、実際のアルカリ乾電池ではサイズに関係なく年月が経るうちに自己放電により容量が減少していく性質があるため、電池自体の有効期間は保存性の良い電池であっても最大 10 年程度である。したがって、計算上の動作時間が 22 年であっても、最大 10 年程度の電池寿命になると考えられる。しかし、いずれにしても ZigBee Alliance が掲げる無線センサノードの電池寿命の目標値を大きく上回る結果となり、本研究の目標を達成できたと考えられる。

またモーションセンサなしの消費電力をみると $11 \mu\text{W}$ ときわめて低消費電力になっている。次に平均消費電力 (= 平均消費電流 \times 供給電圧) を算出してみると約 $25 \mu\text{W}$ になった。このくらいの消費電力であれば太陽光や振動など

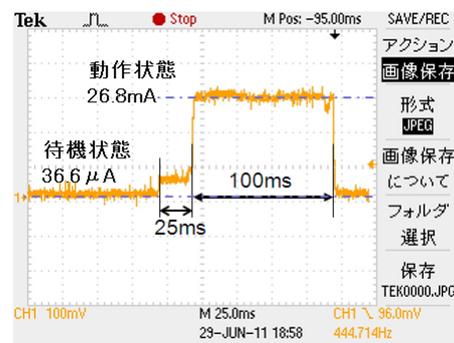


図 6 無線センサノード (試作機) の消費電流波形

Fig. 6 Consumption current waveform of prototype development wireless sensor node.

の環境エネルギーを回収して発電するエナジーハーベスティング技術を扱える領域 [25], [26] まで超低消費電力化できたと考えられる。

5.3 状態遷移の所要時間

図 6 に無線センサノードの消費電流波形を示す。この消費電流波形はセンサノードが待機状態から復帰し、各種センサの計測を行い、PAN コーディネータへセンサデータ送信、データ送信処理完了後、再度待機状態へ移行するまでの一連の動作を示している。この波形から待機状態から復帰までの時間を求めると約 25ms 要していることが分かる。復帰後センサの計測やデータ送信処理を行い待機状態に入るまでの動作状態の期間は約 100ms になっている。シミュレーションなどで算出するとき使用した動作時の期間と同じ値であることから、これまでに算出した平均消費電流、電池寿命などの値は妥当であることを裏付けている。

動作状態から待機状態へ遷移する時間は約 2.5ms であることが確認できた。

6. まとめ

本稿では無線センサノードの待機時消費電力低減技術について提案した。間欠動作で 10 分に 1 回、温度センサ、温度・湿度センサ、照度センサのセンサデータを PAN コーディネータへ送信したときの電池寿命はアルカリ単三乾電池を使用したときの計算上の動作時間は約 22 年になった。しかし、電池自体の有効期間は保存性の良い電池であっても最大 10 年程度である。今回のように計算上の動作時間が 22 年であっても、最大 10 年程度の電池寿命になると考えられる。しかし、いずれにしても ZigBee Alliance が掲げる目標値 (アルカリ単三乾電池 2 本で電池寿命約 2 年以上) を大きく上回る結果となった。また平均消費電力は約 $25 \mu\text{W}$ と超低消費電力化を実現できていることから本提案による省電力方式の有効性が確認できた。

ここまで無線センサノードの超低消費電力化ができるのであれば太陽光、放送用電波、振動などの微弱な環境エネ

ルギーを回収して発電するエネルギーハーベスティング技術を扱えるものと考えられる。以上このことから本稿が提案する技術を用いれば将来のバッテリーレス無線センサネットワーク実現につながる技術になりうると考えられる。

謝辞 本研究は、浜松地域知的クラスター創成事業（第II期）「浜松地域オプトロニクスクラスター構想」の助成を得て、「自律分散協調ユビキタスセンサネットワーク」の一環として実施したものであることを記し、ここに感謝の意を表する。

参考文献

[1] 佐藤範之, 福井 潔: Smart Energy における無線センサネットワークの活用, OKI テクニカルレビュー, 第 214 号, Vol.76, No.1 (Apr. 2009).

[2] 安部恵一, 澤田尚志, 増井崇裕, 峰野博史, 水野忠則: 無線センサネットワークを用いた簡易型表示系 HEMS の開発と評価, 情報処理学会論文誌, Vol.52, No.2, pp.585-595 (2011).

[3] Mineno, H., Obata, K., Masui, T., Abe, K. and Mizuno, T.: Development of a wireless sensor network for visualizing agricultural knowledge, *Journal of Intelligent Decision Technologies (IDT)*, Vol.4, No.4, pp.277-284, IOS Press (2010).

[4] 久保祐樹, 柳原健太郎, 野崎正典: 無線センサネットワークの省電力化技術, OKI テクニカルレビュー, 第 214 号, Vol.76, No.1 (Apr. 2009).

[5] IT 化監視制御技術協同研究委員: IT 化監視制御システムの構成技術, 電気学会技術報告, Vol.1146, pp.31-34 (Feb. 2009).

[6] Ishibashi, K., Lai, I.C.H., Takano, K. and Fujishima, M.: A Scalable Model of Shielded Capacitors Using Mirror Image Effects, *IEICE Trans. Electronics*, Vol.E90-C, No.12, pp.2237-2247 (2007).

[7] 日本電気: 低電力・高速センサネットワーク向け無線通信 LSI を開発, 入手先 (<http://www.nec.co.jp/press/ja/0802/0703.html>).

[8] Ye, W., et al.: An Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Network, *Proc. IEEE Infocom*, pp.1567-1576 (2002).

[9] 西山博仁, 徳永雄一, 武田保孝: センサノードの低消費電力方式, 三菱電機技報, Vol.80, No.9, pp.14-17 (2006).

[10] ZigBee Alliance, available from (<http://www.zigbee.org/>).

[11] 経済産業省: 平成 21 年度スマートハウス実証プロジェクト報告書 (スライド 1), 入手先 (http://www.meti.go.jp/committee/summary/0004668/005_03_00.pdf).

[12] 関山浩介, 伊達正晃, 久保祐樹: 大規模ユビキタスセンサネットワークを自己組織化する相互適応通信制御方式の研究開発, 戦略的情報通信研究開発推進制度 (SCOPE) 第 4 回成果発表会 (2009), 入手先 (http://warp.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/286615/www.soumu.go.jp/main_sosiki/joho.tsusin/scope/event/h20program.html).

[13] 川原圭博: センサネットワークのためのエネルギーハーベスティング技術, 電子情報通信学会大会講演論文集, pp.1349-1369 (2010).

[14] 原誠一郎: ZigBee の省エネのための技術的な特徴と相互接続のための仕組みについて, 入手先 (www.zbsig.org/download/20110217_alfasystems.pdf).

[15] 福永 茂, 田川忠道, 福井 潔, 谷本晃一, 菅野秀明: ユビキタスセンサネットワークの開発, 沖テクニカルレ

ビュー, Vol.71, No.4, pp.24-29 (2004).

[16] ルネサスエレクトロニクス: R8C/L35C グループ, R8C/L36C グループ, R8C/L38C グループ, R8C/L3AC グループユーザーズマニュアルハードウェア編ルネサスマイクロコンピュータ R8C ファミリー/R8C/Lx シリーズ Rev.1.00, p.165 (May 2010).

[17] Chandrakasan, A.P., Sheng, S. and Brodersen, R.W.: Low power CMOS digital design, *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, Vol.27, pp.473-484 (1992).

[18] ルネサステクノロジー: ZigBee/ IEEE802.15.4MAC 近距離無線通信ネットワーク, 入手先 (http://japan.renesas.com/applications/key_technologies/connectivity/zigbee_ieee/zigbee_ieee.jsp).

[19] センサネットワーク調査専門委員会: センサネットワークの技術動向と最新事例, 電気学会技術報告, 電気学会技術報告, (1112), 1-82, pp.8-9 (2008).

[20] ルネサスエレクトロニクス: R8C/L35C グループ, R8C/L36C グループ, R8C/L38C グループ, R8C/L3AC グループユーザーズマニュアルハードウェア編ルネサスマイクロコンピュータ R8C ファミリー/R8C/Lx シリーズ Rev.1.00, pp.148-172 (May 2010).

[21] アローセブン: 小型・低消費電力・ハイレスポンス 2.4GHz 無線モジュール, 入手先 (<http://arrow7.co.jp/product/um-200/index.html>).

[22] セイコー: ワイヤリアルタイムクロック S-35190A datasheet, 入手先 (http://datasheet.sii-ic.com/jp/real_time_clock/S35190A_J.pdf).

[23] リニアテクノロジー: 1μA 高精度シリーズ電圧リファレンス LT6656 datasheet, 入手先 (<http://www.linear-tech.co.jp/product/LT6656>).

[24] パナソニック 電工: 焦電型 MP モーションセンサ Na-Pion, 入手先 (<http://datasheet.octopart.com/AMN42121-Panasonic-datasheet-110118.pdf>).

[25] Enz, C., Scolari, N. and Yodprasit, U.: Ultra low-power radio design for wireless sensor networks, *Proc. IEEE RFIT*, pp.1-17 (Nov. 2005).

[26] 森戸 貴, 猿渡俊介, 南 正輝, 森川博之: バッテリーレス無線センサネットワークにおけるデータ収集プロトコルの設計と評価, 電子情報通信学会技術研究報告, 情報ネットワーク研究会, IN2008-157 (Mar. 2009).



安部 恵一 (学生会員)

1970年生。1995年日本工業大学大学院工学研究科修士課程電気工学専攻修了。エム・シー・エレクトロニクス(三菱商事系列)(株)第一事業部電気技術部係長, HOYA コンテニューム(株)システム製品事業部システム技術部を

経て, 現在, 独立行政法人高齢・障害・求職者雇用支援機構東海職業能力開発大学校付属浜松職業能力開発短期大学校電子情報技術科職業能力開発准教授。2009年静岡大学創造科学技術大学院自然科学系教育部情報科学専攻博士課程に進学し, 情報家電, センサネットワーク応用(省エネ, 農業等)に関する研究に従事。著書として『USB2.0 インターフェース設計術』(電波新聞社), Energy Management Systems【Chapter 11】(INTECH)がある。浜松地域テクノポリス推進機構先端精密技術研究会正会員。



水野 忠則 (フェロー)

1945年生。1969年名古屋工業大学経営工学科卒業。同年三菱電機(株)入社。1993年静岡大学工学部情報知識工学科教授。1996年情報学部情報科学科教授。2006年より創造科学技術大学院長。2011年4月より愛知工業

大学情報学部教授。工学博士。情報ネットワーク, モバイルコンピューティング, ユビキタスコンピューティングに関する研究に従事。著訳書として『コンピュータネットワーク』(日経BP), 『モダンオペレーティングシステム』(ピアソン・エデュケーション)等がある。電子情報通信学会, IEEE, ACM, Informatics Society 各会員。情報処理学会フェロー, 副会長。



峰野 博史 (正会員)

1974年生。1999年静岡大学大学院理工学研究科修士課程修了。同年日本電信電話(株)入社。NTT サービスインテグレーション基盤研究所を経て, 2002年10月より静岡大学情報学部助手。2006年九州大学大学院システム

情報科学府博士(工学)。2011年4月より, 静岡大学情報学部准教授。モバイルコンピューティング, センサネットワーク応用に関する研究に従事。電子情報通信学会, IEEE, ACM 各会員。