

バッテリー駆動無線センサネットワークにおける低遅延省電力マルチホップ技術

久保 祐樹 中嶋 純
野崎 正典

無線センサネットワークの研究はHEMS(Home Energy Management System)、遠隔検針、などへの応用が期待されている。HEMSへの応用では無線センサ端末(以下ではノードと呼ぶ)の設置容易性を高めるために、電池駆動させることが重要であり、電池で数年間動作するレベルの省電力化が要求される。遠隔検針では電源の確保が可能な場合もあるが、各家庭に1台のノードが配置されると考えると、ネットワーク全体の消費電力は無視できない大きさになるため、ノードの消費電力を小さくする仕組みは非常に重要になる。

ノードにおける電力は、大部分が無線デバイスを駆動させるために消費されている。一般的な無線デバイスは受信、送信、受信待機、スリープの4つの状態を持っており、無線デバイスはパケットの送信時、受信時だけでなく、受信待機時においても受信中とほぼ同じ電力を消費している。従って、通信を行っていない状態でも多くの電力を消費しており、無線デバイスはスリープ状態になることで初めて消費電力を抑えることが可能となる。当然、スリープ状態ではパケットを受信できないため、ノードが無秩序にスリープを行っては通信が成立しない。そこで、ネットワークの接続性を維持したままノードが自律的にスリープを行う仕組みが考えられている。しかし、従来のセンサネットワークのプロトコルではスリープするノードをネットワークの末端の中継を行わないノードに限定したものであった。そのため、中継を行うルータノードには電源を準備する必要があった。これからのセンサネットワークには、さらなる省電力化を実現するためにルータノードに関してもスリープする仕組みが必要となると考える。

本稿では無線マルチホップネットワークのルータノードの省電力化を実現する省電力マルチホップ技術に関し、従来技術と我々の開発した技術(TURTLE)を説明し、その省電力効果の比較評価実験を実施した結果について報告する。

省電力マルチホップ技術の研究動向

従来の省電力マルチホップ技術の研究は、同期型と非

同期型に分類できる。同期型ではS-MACと呼ばれる方式が広く知られている。S-MACは無線回路をアクティブにしている時間をネットワーク全体で同期させ、アクティブ状態でのみ通信を行うことで、パケット送信時に送信先ノードがスリープしていることが無いようにしている。しかし、同期型の手法は同期から外れた時の処理や、複数の同期スケジュールが競合するような境界ノードの処理の複雑性が課題であるといえる。

非同期型の方式ではB-MAC、X-MAC¹⁾、TICERと呼ばれる方式がある。それぞれの方式で少しずつ異なる点はあるが、基本的な動作原理は図1に示すとおりである。受信ノードは間欠的に受信待機を行い、間欠受信しているノードに対して、送信ノードがデータを送る時は、連続してパケットを送信するポーリング動作を行うことで、最大で間欠周期時間のパケットを連続で送信すればスリープしているノードにデータ送信を行えるというものである。

同期型、非同期型でどちらが優れているかは、発生するトラフィック特性によって異なるため一概に言うことはできないが、概ね非同期型の方が高い省電力化を実現できており、同期が不要という点でスケラビリティも優れている。IEEE802.15.4eで標準化されているCSLという方式も、非同期型の方式に基づいた方式である。

非同期型の手法の課題として、送信先ノードが受信待機状態になるまで送信が完了できないために発生する遅延がある。以降この遅延をスリープ遅延と呼ぶ。スリープ遅延は間欠動作の周期に比例して大きくなり、長寿命化のために間欠周期を延ばすことは、スリープ遅延を増加

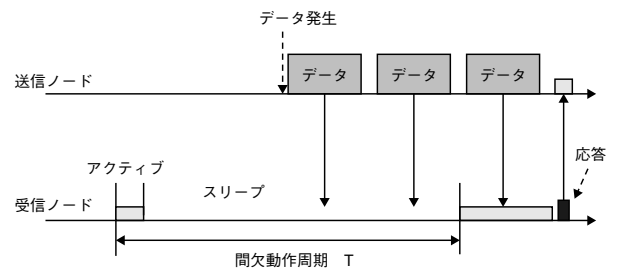


図1 間欠受信型省電力方式の通信動作

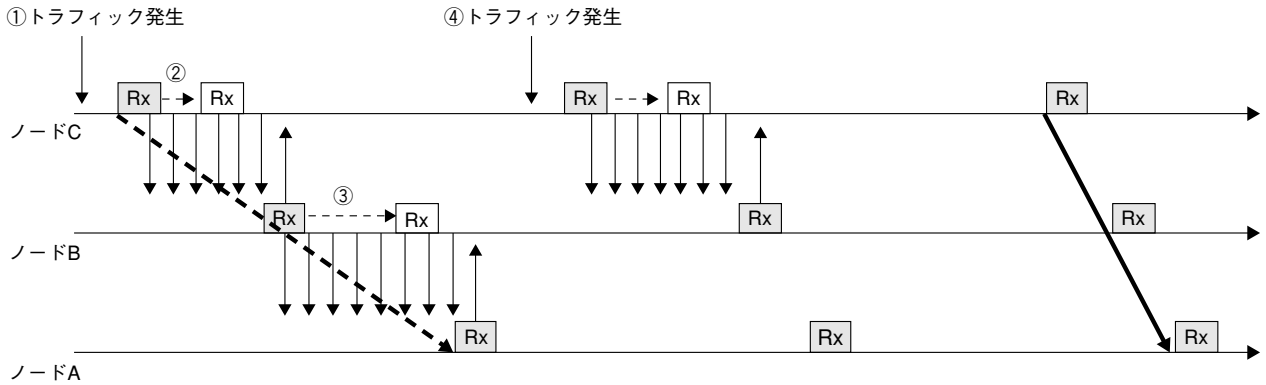


図2 TURTLEの動作

させてしまうことになる。スリープ遅延の発生中はノードがパケットを送信している時間であるため、電力消費の面からもスリープ遅延は望ましくない。つまり、スリープ遅延を小さくすることができれば、低遅延化と省電力化同時に実現することが期待できる。

開発方式：TURTLE

従来の省電力方式のスリープ遅延を低減する方式としてTURLTE²⁾ (Time adjUsted Receiving Technique with Low Energy consumption)を開発した。TURTLEはX-MACをベースにした方式である。X-MACでは、各ノードが間欠受信タイミングを調整するという考え方はなかったが、TURLTEでは、各ノードが自律的に間欠受信のタイミングを制御することによって、スリープ遅延を減らすことを特徴としている。TURTLEは各ノードからシンクノードへの上り通信が支配的なデータ収集型を想定しており、上り通信でのスリープ遅延を削減し、同時に高い省電力化を実現する。タイミング制御を行う上で、GPSや基地局を用いた時刻同期や、分散的な時刻同期プロトコルは用いず、ノードは個々に持ったローカルなタイマのみを用いて間欠受信タイミングを制御する。TURTLEはタイミング制御という同期型の側面を有しているが、非同期で動作する方式を基本としているため、タイミング制御がずれた場合にも同期外れの例外処理を行う必要が無い。また、ネットワーク全体で同期するわけではなく、2ノード間の局所的な同期であるため、スケラビリティの点においても問題は起こらないという特長がある。

マルチホップ環境での、TURTLEの動作を図2で説明する。図2はノードCで発生したデータパケットがノードAに中継される場合を示したものである。初期状態では間欠受信のタイミング制御は完了していない。ノードCで送

信データが発生すると(図2中の①)、ノードBにパケット送信を行う。ノードCはノードBの間欠受信タイミングまでパケットを送信し続けると、ノードBから応答を受信できる。このときにノードCは自身の間欠受信のタイミングをノードBの直前になるようにシフトする(図2中の②)。次に、ノードBは中継のためにノードAに対してパケットを送信する。ノードBも、この時点ではノードAと同期が取れていないが、ノードAへパケットを送信完了するとノードCからノードBへの中継時と同様に、自身の間欠受信のタイミングをノードAの直前になるようにシフトする(図2中の③)。この結果、ノードBの間欠受信タイミングが変更されたため、先ほどノードCがノードBに同期したタイミングは崩れてしまう。しかし、この状態で再びノードCでデータパケットが発生すると(図2中の④)、再びノードCはノードBに同期する。以降はノードCからノードAへの中継では最小のスリープ遅延での送信が可能になり、送信先の受信待機までパケットを送信し続ける時間が小さくなるため、消費電力も小さくできる。

このように、TURTLEでは低遅延化を行う経路に一定数のパケットが流れることで、間欠受信タイミングを形成する。パタン形成の収束に必要なパケット送信数はネットワークの最大ホップ数に依存している。しかし、ネットワークの規模が大きくなってもホップ数は10から20ホップ程度と考えると、ネットワーク規模の増加でTURTLEの同期の収束性に問題が起こることは考えにくいと言える。

性能評価

開発方式の有効性の検証として、950MHz帯の無線デバイスを備えた省電力センサノード(エコセンサS)を用いて、性能評価試験を行った。エコセンサSの外観を図3(次ページ)に、エコセンサSの仕様を表1(次ページ)に示す。



図3 エコセンサS外観

表1 エコセンサS仕様

機能	仕様
使用無線	950MHz (ARIB STD-T961.1版)
無線出力	最大8dBm
アンテナ	モノポール(λ/4)
MAC	IEEE802.15.4d(省電力マルチホップ拡張)
NWK	Many to One方式
インタフェース	デジタル(入力×2,出力×2),アナログ(入力×3) UART×1 (いずれも外付けIF装置にて実現)
電源	外部電源(USB)または単3電池×2本
サイズ	筐体:99×68.5×31mm(アンテナ等突起物を除く) 外付けI/F基板:60mm×40mm

エコセンサSはMAC層にIEEE802.15.4dを採用しており、IEEE802.15.4dをベースにTURTLEを実装している。また省電力化のためにはNWK層でルーティングのために発生する制御パケットが少ないことも非常に重要になる。そのためルーティング方式には、任意のノード間のP2Pの経路構築は行わずに、基地局となるノードとセンサノード間の通信に限定した経路制御のみを行うことで制御パケットを削減したMany To Oneと呼ばれる方式を採用し、さらに独自に制御パケット削減の改良を加えたルーティング方式³⁾を採用している。この方式は独自方式ではあるが、現在センサネットワークのNWK層の標準として注目されている6LoWPAN⁴⁾、ROLL⁵⁾の一部であるMesh Underと呼ばれる標準の枠組みで動作させることを検討中である。

評価実験はエコセンサSを10台使用し、ノード1がツリーの根になり、最大で4ホップのマルチホップネットワークが構築されるように配置した。図4にトポロジを図示する。この配置を用いて、省電力機能なし(HPR)、X-MAC(LPR)、TURTLE(TUT)を切り替え、消費電力、遅延の測定を行った。ただし、根となるノード1に関して

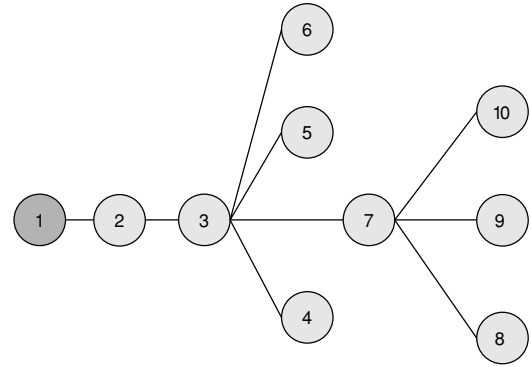


図4 実験時のネットワークトポロジ

は常に省電力動作を行っていない。これは、トラフィックが集中する根のノードがスリープを行うと、収容できるトラフィックが大きく減ってしまうためである。その他のパラメータとして、間欠受信の周期は1000ms、トラフィックの発生は各ノードからそれぞれ1分ごとに1パケットとした。

消費電力、デューティ比に関する測定結果を表2に示す。消費電力はノードの電池電圧の変化を実測し、その変化量から推定した値である。デューティ比は無線デバイスがアクティブ状態(受信、送信、受信待機)の時間とスリープ状態(スリープ)していた時間の割合をソフトウェアで測定した値であり、小さい値ほどスリープしていた時間が長いことを示す。表2を見ると常にアクティブ状態のHPRと比較してLPRは約20分の1以下、TUTは約70分の1以下の消費電力で動作できていることがわかる。LPRとTUTを比較すると、どちらも最も消費電力の大きいノードはノード3である。トラフィックはノード2により集中するが、ノード2は常にアクティブ状態のノード1に送信している。省電力動作を行うノードが存在する場合には、あ

表2 消費電力、デューティ比

ID	消費電力 (mW)				
	002	003	004	007	010
HPR	72.75	77.03	74.13	76.12	79.39
LPR	0.83	3.29	1.39	1.25	2.83
TUT	0.76	1.06	0.7	0.99	0.66

ID	デューティ比 (%)				
	002	003	004	007	010
HPR	100	100	100	100	100
LPR	1.14	4.27	1.87	1.64	3.56
TUT	1.04	1.37	0.94	1.30	0.83

て先ノードが省電力ノードである場合に、送信に必要な消費電力が高くなるため、トラフィックの最も集中するノード2よりも、トラフィックもある程度多く、かつ送信先が省電力ノードあるノード3の消費電力が最も高くなる。ノード3の消費電力は、LPRで3.29mW、TUTでは1.06mWであり、TUTは3分の1の消費電力となっている。また、LPRはもっとも消費電力の小さいノード2と比較して、ノード3は4倍近い消費電力となっているのに対して、TUTでは最も消費電力の小さいノード10と比較してノード3の消費電力は約1.6倍である。つまりLPRではノード3は他のノードと比較して著しく寿命が短くなる。平均で比較するとTUTはLPRの2分の1の消費電力であるが、ネットワークの全ノードが動作している状態でなくなった時をネットワークの寿命と考えるとTUTではLPRよりも約3倍長寿命化が実現できていると見ることがもできる。

図5にホップ数と遅延の関係を示す。スリープを行わないHPRでは、スリープ遅延が発生しないため、遅延は非常に小さく1ホップあたり約10~20msの遅延で転送できている。LPRではホップあたり約500msの遅延が発生しており、省電力化と引き換えに大幅な遅延の悪化が起きていることがわかる。この500msの遅延は、間欠受信の周期を1秒と設定したことに起因する。通常スリープ遅延は間欠周期の2分の1となる。省電力化のために間欠受信周期を延長すると、さらに遅延が増加することになる。TUTでは最初の1ホップではLPRと同様に500msの遅延が発生するが、それ以降の中継ではホップあたり平均50msの遅延となっている。これはTUTTLEの同期の仕組みによって、上りの中継に最適となるように間欠受信タイミングがノード間で50msオフセットしたタイミングとなっているためである。

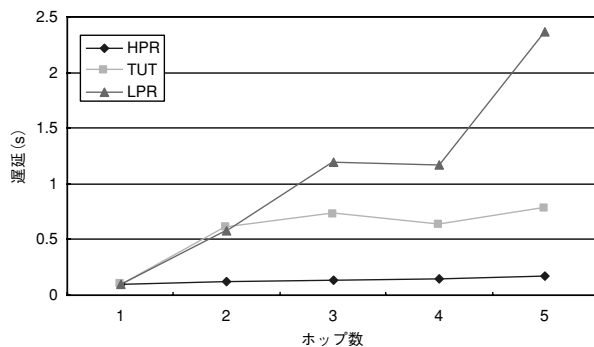


図5 ホップ数と上り送信の遅延

まとめ

本稿では、マルチホップ無線センサネットワークにおいて、ルータノードの省電力化実現の従来技術を解説し、従来技術におけるスリープ遅延に関する問題に対して、スリープ遅延を削減することで、省電力化を実現する方式TURTLEを提案した。提案方式を950MHz帯で動作する無線ノードに実装を行った評価実験によって、TURTLEではネットワークで最も負荷がかかるノードの消費電力を従来方式の3分の1以下にでき、遅延に関してもホップあたりの遅延を500msから50msに削減できることを示した。TURTLEは、データ収集型の無線センサネットワークにおいて遅延と消費電力の面で高い効果を発揮できる。しかし、消費電力を考慮せず常にスリープを行わないノードだけで構成したネットワークと比較すると、通信性能の悪化分はまだ大きい。今後はこの差をより小さくする取り組みを行っていく予定である。 ◆◆

参考文献

- 1) M.Buettner, G.Yee, E.Anderson and R.Han : "X-MAC: a short preamble MAC protocol for duty-cycled wireless sensor networks", ACM SenSys, pp.307-320, 2006.
- 2) 久保祐樹, 柳原健太郎, 野崎正典, 福永茂, 中井敏久 : データ収集型センサネットワークに適した低遅延省電力無線マルチホップ通信, 電子情報通信学会論文誌 (B), J92-B (8), pp.1225-1235, 2009年
- 3) 野崎正典, 西村弘志, 久保祐樹, 柳原健太郎, 福永茂 : 950MHz帯における大規模・高信頼ルーティング方式の開発と評価, 信学技報, USN2010-24, pp.15-20
- 4) IPv6 over Low power WPAN, <http://tools.ietf.org/wg/6lowpan/>
- 5) Routing Over Low power and Lossy networks, <http://tools.ietf.org/wg/roll/>

筆者紹介

久保祐樹 : Yuki Kubo 研究開発センタ システム技術研究開発部 無線ネットワーク技術チーム
 中嶋純 : Jun Nakashima 研究開発センタ システム技術研究開発部 セキュアネットワーク技術チーム
 野崎正典 : Masanori Nozaki 研究開発センタ システム技術研究開発部 無線ネットワーク技術チーム