

# 定期情報収集型センサネットワークのためのRTS/CTS交換に基づく データ送信スケジューリング

松田 隆志<sup>†</sup> 一圓 真澄<sup>†</sup> 三上 真司<sup>††</sup> 太田 能<sup>†††</sup> 川口 博<sup>†††</sup>  
吉本 雅彦<sup>†††</sup>

<sup>†</sup> 神戸大学大学院 自然科学研究科 情報知能工学専攻 〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1

<sup>††</sup> 金沢大学大学院 自然科学研究科 電子情報科学専攻 〒920-1192 石川県金沢市角間町

<sup>†††</sup> 神戸大学 工学部 情報知能工学科 〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1

E-mail: <sup>†</sup>matsuda@cs28.cs.kobe-u.ac.jp

**あらまし** センサネットワークにおける最大の課題はシステムの可用時間を向上させることである。定期情報収集型アプリケーションにおける各センサノードのアイドル時間の割合は通信を行っている時間に比べ長くアイドル時間に消費する無駄な電力を低減することが非常に重要である。本研究では無線通信で衝突を避けるために用いられるRTS/CTSを利用したスケジューリングアルゴリズムを提案する。通信をスケジューリングすることにより、アイドル時にRF回路の電源を切ることによってノードの消費電力を削減する。さらにデータ集約もスケジューリングすることにより、衝突が減り通信トラフィックの削減を可能にする。シミュレーションから提案方式は従来方式よりシステムの可用時間が最大220%向上するという結果が得られた。

**キーワード** センサネットワーク, スケジューリング

## Data Transmission Scheduling based on RTS/CTS Exchange for Periodic Data Gathering Sensor Networks

Takashi MATSUDA<sup>†</sup>, Masumi ICHIEN<sup>†</sup>, Shinji MIKAMI<sup>††</sup>, Chikara OHTA<sup>†††</sup>,

Hiroshi KAWAGUCHI<sup>†††</sup>, and Masahiko YOSHIMOTO<sup>†††</sup>

<sup>†</sup> Graduate School of Science and Technology, Kobe University, 1-1 Rokkodai, Nada, Kobe, 657-8501

<sup>††</sup> Graduate School of Natural Science and Technology, Kanazawa University, Kakuma, Kanazawa, 920-1192

<sup>†††</sup> Faculty of Engineering, Kobe University, 1-1 Rokkodai, Nada, Kobe, 657-8501

E-mail: <sup>†</sup>matsuda@cs28.cs.kobe-u.ac.jp

**Abstract** One of challenging issues on the sensor networks is to extend lifetime of network system as a whole. In periodic data gathering applications, idle time occupies longer than transmission time in the state of a sensor node. Consequently, it is important to decrease wasteful power consumption during idle time. In this study, we propose a scheduling algorithm based on history of RTS/CTS exchange during setup phase. Scheduling the transmission during transfer phase enables each node to turn off its RF circuit during idle time. By tracing ongoing RTS/CTS exchange during data transfer phase, each node knows progress of data transfer process so that it can wait to receive packets for data aggregation. Simulation results show that system lifetime of our scheduling extends 220% longer than that of existing “power scheduling.”

**Key words** sensor network, scheduling

### 1. ま え が き

近年注目されているセンサネットワークはセンシング機能を

有するセンサノードを無線通信によってネットワーク化したものである。センサノードは通常バッテリーで動作すると考えられているが、多数のノードが分散配置されるためバッテリー交換の

回数を削減する必要がある。このためシステムの可用時間の長期化はセンサネットワークの実用化に向けての技術課題となる。システムの可用時間の拡大に対する問題点を以下に示す。

- アイドルリスニング： 実際にデータを通信していない期間に消費電力の大きい RF 回路が起動しており無駄な消費電力が発生する。各センサノードはノード自身がセンシングしたデータを送信するだけでなく、基地局から遠く離れたノードのセンシングデータを中継するため、常に受信できるように RF 回路を起動しておく必要がある。

- 衝突による再送： データ送信中に干渉などによるエラーが発生した場合、データを最初から再送する必要がある。また通信帯域を確保するために RTS/CTS 交換が必要であるが、RTS が衝突した場合にも RTS を再送するオーバーヘッドがある。

本研究では上記の問題に対し、アプリケーション層、ネットワーク層および MAC 層のクロスレイヤ設計により、システム可用時間の長期化を実現する。

本研究ではセンサネットワークのアプリケーションの一つである気候や気温などを定期的に観測するような定期情報集型アプリケーションを対象とする。本アプリケーションは各センサノードでセンシングしたデータを基地局へ収集するというものである。この場合、一度構成されたネットワークツリーを再利用し複数回にわたってデータを収集することが考えられる。そこではじめにデータ送信のタイミングを記憶、スケジューリングすることによりアイドルリスニングの時間を減らすことができる。また送信順番をネットワークレベルで決定することから、RTS/CTS の衝突も緩和されるため、再送によるオーバーヘッドも小さくなる。さらにデータ収集する度に同じ経路を使う（中継するデータが同じ）ため、データを集約しやすくデータトラフィックを削減することができる。また本研究では同期の精度に左右されるような完全な時間スケジューリングではなく、衝突回避に一般的に用いられる RTS/CTS 交換方式を利用した、ロバスト性の高い方式を提案する。

定期情報収集型アプリケーションに対応したシステムは、これまでにいくつかの研究が進められている。その中のデータ収集システム方式として LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy) がある [1]。LEACH はセンサノードの中からいくつかのノードをクラスタヘッドとして選び、そのクラスタヘッドを中心として複数のクラスタを形成する。まずクラスタヘッドでないノードは一番近くにあるクラスタヘッドにデータを送信する。そしてデータを集めたクラスタヘッドが基地局へ直接データを集約して送信する。しかし LEACH では CDMA と TDMA の両方の方式を組み合わせた複雑な MAC を用いている。

また別のデータ収集システムに power scheduling (PS) がある [2]。PS 方式は送受信する期間をスケジューリングし、送受信以外の期間は RF 回路をオフにすることにより、低消費電力化を実現している。PS 方式ではセットアップフェイズと安定フェイズの二つのフェイズをもつ。まずセットアップフェイズでは RTS/CTS 交換によって帯域を確保しデータを送受信す

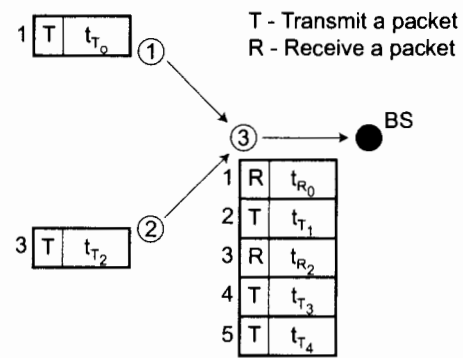


図 1 power scheduling による各ノードのリスト作成手順

る。その際送受信したノードは、データを正しく通信できたときの送受信の開始時刻をリストに記憶する。このときリストに記憶する開始時刻とは RTS を送り始めた時刻である。図 1 にソースノードが基地局へデータをマルチホップさせる場合に、各ノードが保持しているリストの様子を示す。このリストの各要素の左側のアルファベットは送信または受信を示し、また右側の数字は通信開始時刻を示している。リストの要素に T- $t_{r_0}$  とある場合、データの収集開始時刻から  $t_{r_0}$  秒後に送信する、ということを示している。次に転送フェイズでは、各データ収集期間のはじめにすべてのセンサノードの RF 回路をオフにする。ここで RF 回路をオフにすることをスリープ状態と呼ぶ。送信予定のノードはセットアップフェイズで記憶したリストの送信時刻直前に RF 回路をオンにし、RTS/CTS 交換することなくすぐにデータを送信する。送信ノードは送信が完了するとスリープ状態となる。また受信予定のノードも送信する場合と同様に、セットアップフェイズで記憶した受信時刻直前に RF 回路をオンにし、受信が完了するとスリープ状態となる。この方式では送受信以外の無駄なアイドルリスニングを削減し、システム可用時間の向上を実現している。しかし外界からの干渉や同期のずれによってデータ送信に失敗した場合、他のデータ送信と衝突する可能性がある。PS 方式では全てのノードは他のノードの通信スケジュールを知らないため、衝突が起こらないように再送することはできない。またこの方法では各センサノードにおいてデータを集約して送信することはできない。データを集約するためにはセンサノードよりバッテリーの多い、基地局と同じ役割をもつ特別なノードが必要となる。

## 2. 提案手法

本研究では、RTS/CTS 交換に基づきスケジューリングする Multi-layer Scheduling (MS) を提案する。MS 方式は PS 方式と同様にセットアップフェイズと転送フェイズをもつ。PS 方式との大きな違いは、転送フェイズでも RTS/CTS 交換しているので再送可能であることと、各センサノードでデータ集約可能であることである。以下に各状態時における動作の詳細を述べる。

### 2.1 セットアップフェイズ

MS 方式では Directed Diffusion を簡略化した Tiny Diffusion に沿ってデータを収集する。Tiny Diffusion は interest と

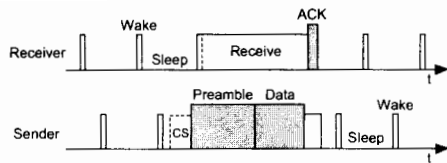


図2 LPL方式における送受信の動作

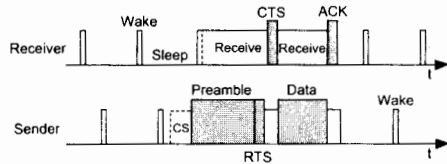


図3 LPL方式にRTS/CTS交換機能をつけた場合の送受信の動作

呼ばれるパケットをネットワーク全体にフラッディングし、各ノードは interest パケットに対応したデータを基地局に向けて送信するルーティングプロトコルである。以下に MS 方式での手順を述べる。

まず基地局がデータ収集の間隔と転送フェイズでのデータ収集回数を報せるための interest パケットをネットワーク全体にフラッディングする。interest パケットは基地局から送信ノードまでの最小ホップ数の情報を持つ。1つ目の interest パケットを受信したノードは自身のホップ数情報を interest パケットのホップ数+1 の値に更新し、周辺ノードへフォワードする。そして2つ目以降の interest パケットを受信したノードは、自分の記憶しているホップ数が interest パケットのホップ数+1 よりも大きい場合、自身のホップ数を更新し周辺ノードへフォワードする。このとき、受信ノードは最小ホップの interest パケットを送信したノードのアドレスを記憶しておく。また最小のホップ数が更新されない場合は、その interest パケットはフォワードされない。

次に interest パケットを受信したセンサノードは、interest パケットのフォワードが終わると自ノードより基地局に近いノードにセンシングしたデータを送信する。ここで自ノードより基地局に近いノードとは、先ほど記憶した最小ホップで届いた interest パケットの送信ノード中で一番早く interest パケットの届いたノードとする。また自ノードより基地局から遠くにあるノードからのデータを中継する場合にも、自分のセンシングしたデータの送信先と同じノードへ送る。

本方式では、データを送受信する際に用いるメディアアクセス方式として LPL (Low Power Listening) 方式を用いる [3]。LPL 方式は図2に示すように周期的に RF 回路を起動し、起動している短い期間だけキャリアを検知する方式である。キャリアを検知した場合はデータを受信できる状態となり、検知しなかった場合はすぐにスリープ状態となる。そのため LPL 方式は RF 回路の起動時間が短いので消費電力が小さい。センサノードが送信したい場合は、周期の長さのプリアンプを送り、目的ノードを含む周辺ノードを全てデータを受信できる状態にする。しかし従来の LPL 方式ではプリアンプ送信後すぐにデータを送信し始めるため、隠れ端末による衝突やオーバー

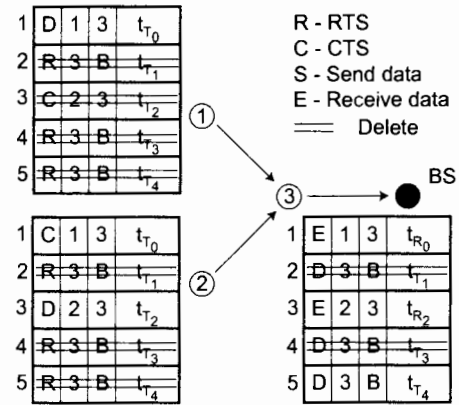


図4 提案手法でのセットアップによる各ノードのリスト

ヒアリングの問題を回避することができない。そこで帯域を確保するために従来の LPL 方式に RTS/CTS 交換の機能を加えたものを用いる。RTS/CTS を受信した周辺ノードは PAMAS (Power Aware Multi-Access protocol with Signalling) [4] のように、RTS/CTS に含まれている時間分だけスリープ状態となる。これによりオーバーヒアリングの問題を回避することができるので、消費電力も削減される。図3に LPL 方式に RTS/CTS 交換機能を加えた場合の送受信の動作を示す。

本方式ではこの MAC 層で用いられる RTS/CTS を利用して送信のタイミングを決定する。受信した RTS/CTS の種類・送信開始時刻・送信ノード及び受信ノードのアドレスと自ノードのデータ送信開始時刻を時間順にリストに保持する。また新たに要素をリストに追加する際に既に同じ要素がある場合、保存してある要素を削除し新たな要素をリストの最後に加える。これは転送フェイズにおいて、自ノードより基地局から遠くにあるノードのデータを集約して次のノードへ送るためである。またデータ送信後はスリープとなるため、それ以降の要素は削除される。図4は3個のノードの場合の各ノードが持つリストの例である。リストの各要素の一番左にあるアルファベットは RTS の受信, CTS の受信, データの送信, データの受信を示している。各要素の左から2番目と3番目にある数字はそれぞれパケットの送信ノード ID と受信ノード ID を示し、一番右の数字はそのパケットの送信または受信を開始した時刻を示している。例えばリストの要素が R-2-3-15 のとき、2番ノードが3番ノードに対しデータ収集開始から15秒後に RTS パケットを送信した、ということを示す。このリストは次のセットアップフェイズまで保持し続ける。

## 2.2 転送フェイズ

転送フェイズではセットアップフェイズで構成されたリストに基づいて各ノードが送信する。まずリストの先頭に自ノードの送信があるノードがデータの送信する。データ通信の際に送受信ノードが RTS/CTS 交換するので、RTS/CTS を受信した周辺ノードは自分のリストを更新する。そして更新されたリストの次の要素が自ノードの送信である場合、受信した RTS/CTS によるスリープの後すぐに自データの送信準備 (RTS/CTS 交換) を開始する。送信が終了したノードは次のデータ収集開始時までスリープ状態となる。このようにセットアップフェイズ

でデータを送信できた順番にデータを送信することで、衝突を抑制され円滑にデータを収集することができる。

また干渉や衝突などで RTS/CTS が受信できなかった場合には、リストが更新されないためにいつまでもデータを送信できない。そこで、リストで記憶している自分のデータを送信できた時間になってもリストが更新されない場合で、中継する全てのデータがそろっている場合はすぐにデータを送信する。またセットアップフェイズで送信した時刻になっても中継する予定のデータがそろっていない場合は、一定時間待機した後、データが全てそろっていない場合でもそれまでのデータを集約し送信する。データがそろっていない状態で送信したノードはさらに一定時間待ち、それでもデータが届かない場合はスリープ状態となる。本方式では PS 方式と異なり転送フェイズでも RTS/CTS 交換しているために、データの衝突回避が可能ため再送することができる。PS 方式では RTS/CTS 交換せずすぐにデータを送っているために、衝突回避する手段がなく再送はできない。

### 3. シミュレーション評価

シミュレータは QualNet を用いて検証した。フィールドサイズは  $100\text{m} \times 100\text{m}$  で、フィールドの中心に基地局を置き、100 個のセンサノードを一様分布に従ってランダムで配置する。各ノードの送信半径は  $20\text{m}$  とし、送信電力は  $800\mu\text{W}$ 、受信電力は  $500\mu\text{W}$ 、スリープ時の消費電力は  $0.5\mu\text{W}$  とする。バッテリーサイズは  $500\text{mJ}$  とする。パケットのヘッダサイズは  $32\text{bytes}$  とする。LPL のキャリアを検知する周期は  $50\text{ms}$  とする。データの収集間隔は  $900\text{s}$  とする。集約はパケットのヘッダを統一して送るヘッダ集約を利用する。また基地局はデータを 10 回収集するごとに interest パケットをフラッディングし経路を再構成するものとする。

図 5 に MS 方式、PS 方式、スケジューリングなしの場合における時間ごとの稼働ノード数を示す。パケットのペイロードサイズは  $16\text{bytes}$  である。この図から PS 方式が MS 方式を上回っている時間があることがわかる。しかし通常基地局周りのセンサノードが先にバッテリー切れとなるため、この時間以降は基地局にデータはほぼ届かないと考えられる。そこで本研究でのライフタイムは最初のノードがバッテリー切れを起こすまでの時間とする。MS 方式のライフタイムは、スケジューリングなしに対して約 3.5 倍、PS 方式に対しては約 2 倍伸びていることがわかる。この一番の要因として、パケットのペイロードサイズに対してヘッダサイズが大きくパケットの集約による消費エネルギーの削減効果が大きいと考えられる。またスケジューリングにより送信終了後すぐに RF 回路の電源をオフにできることもその要因の一つであると考えられる。しかし本検討で用いている LPL は常に RF 回路の電源をオン・オフする間欠動作しているため、スケジューリングしていない場合でもアイドル時間のほとんどはスリープ状態になっている。そのため送信終了後すぐに RF 回路の電源をオフにする効果はデータ集約による効果ほどはないと考えられる。

次に、ペイロードサイズを変化させた場合の結果をを図 6 に示す。図 6 から、ペイロードサイズが小さいほど MS 方式が効

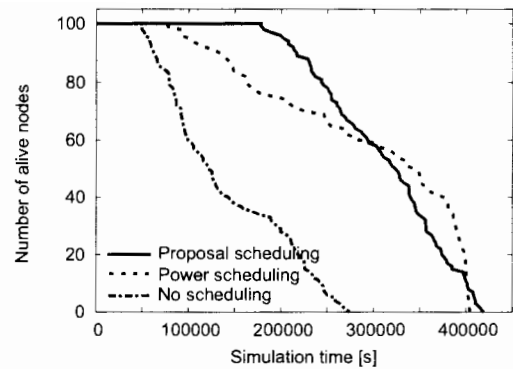


図 5 従来手法と提案手法のライフタイムの比較

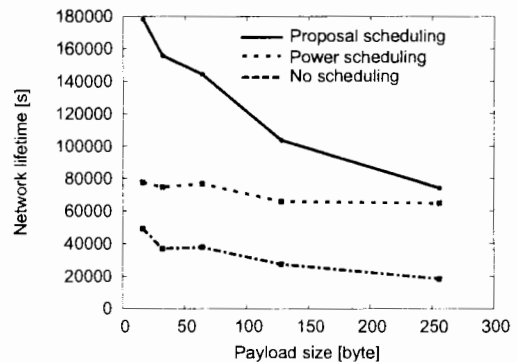


図 6 ペイロードサイズを変化させた場合のライフタイムの比較

果があることがわかる。またペイロードサイズが大きくなるにつれ、MS 方式と PS 方式との差はなくなることがわかる。これはペイロードサイズが大きくなるにつれヘッダ集約の効果が小さくなるからである。しかしセンサネットワークでは、実際のセンシングしたデータのサイズは小さく、ペイロードサイズとヘッダサイズはほとんど変わらないことが多いため、MS 方式は効果があるといえる。

### 4. あとがき

本研究では、RTS/CTS 交換に基づいたスケジューリング方式を提案し、シミュレーションにより検証した。提案方式と従来方式との比較から、送信タイミングを制御することにより、システムのライフタイム向上することを示した。また、スケジューリングにデータ集約を加えることにより、従来手法に比べ最大で約 2 倍のシステム時間向上が得られることを示した。

### 文 献

- [1] W. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks," Proc. the Hawaii Conference on System Sciences, Jan 2000.
- [2] M. L. Sichitiu, "Cross-Layer Scheduling for Power Efficiency in Wireless Sensor Networks," Proc. IEEE INFOCOM 2004, March 2004.
- [3] J. Hill, D. Culler, "Mica: A Wireless Platform for Deeply Embedded Networks," IEEE Micro, November/December 2002.
- [4] S. Singh, M. Woo and C. S. Raghavendra, "PAMAS: Power Aware Multi-Access protocol with Signalling for Ad Hoc Networks," Proc. the ACM/IEEE Conference on Mobile Computing and Networking, October 1998.