

クラスタツリー無線センサネットワークのための 適応的同期制御による低遅延化方式

甲斐 成美¹ 小室 信喜¹ 阪田 史郎¹

概要：無線センサネットワークにおいて，低消費電力化は重要な課題である．また，防犯・防災など，アプリケーションによっては低遅延，高配信率化も同じく重要である．無線センサネットワーク向けの標準通信プロトコルである IEEE 802.15.4 のビーコンモードでは，低消費電力化を達成するためにビーコンという同期信号と，BO, SO という Duty Cycle に関するパラメータを用い，同期とスリープ制御を行なっている．このビーコンによる同期のタイミングと，Duty Cycle によって，電力，遅延，配信率に関する性能は大きく影響を受ける．本稿では，IEEE 802.15.4 ビーコンモードにおいて，トポロジに応じた適切なクラスタリングと，アクティブ期間のスケジューリングを行うことにより，低消費電力，低遅延，高配信率を実現する方式を提案する．シミュレーションによる性能評価を行い，提案方式の有効性を示す．

Adaptive Synchronization Control for Low Latency in Cluster-Tree Wireless Sensor Networks

NARUMI KAI¹ NOBUYOSHI KOMURO¹ SHIRO SAKATA¹

1. はじめに

近年，無線通信機能の発達や無線端末の小型化などにより，センサネットワークに関する研究が盛んに行われている．センサネットワークの応用例として，環境モニタリング，防犯・防災，ホームオートメーション，スマートグリッド向けスマートメータリングなどが挙げられる．

無線センサネットワーク向けの通信プロトコルとして IEEE 802.15.4[1] がある．代表的な無線センサネットワークの Zigbee[2] で採用されている IEEE 802.15.4 は物理層，MAC 層のプロトコルであり，ビーコンモードとノンビーコンモードの2つのモードがある．ノンビーコンモードでは，親子関係を構築したノード間においても同期を取らないが，状況に応じてリンク品質の安定した経路を使用することができる．その反面，親ノードは常にアクティブ状態を維持する必要があるため，子ノードは送信するデータが発生した時点で送信を開始でき低遅延であるが，消費電力は非常に大きくなる．一方，ビーコンモードでは親子関係

を構築したノード間で，ビーコンにより同期を取りながら，間欠動作を周期的に行う．親ノードがアクティブになっている期間に，子ノードが親ノードに向けデータを送信する．ビーコンモードでは，親ノードもスリープできるため，消費電力を抑えることができる．

IEEE 802.15.4 ビーコンモードにおいて，ビーコンスケジューリングの方法として，TD (Time Division) 方式と BOP (Beacon-Only Period) 方式がある．TD 方式は，各ノードはアクティブ期間を排他的に保持するため，衝突を抑制することができるが，ノードの数によって，Duty Cycle の上限が定まる．BOP 方式は，全ノードが同時にアクティブ状態になるため，Duty Cycle の制限はなく，遅延も少ない．しかし，同時にアクティブ状態になる分，衝突発生も多くなる．どちらの方式も，トラフィックが増加すると，電力，遅延，配信率などの性能が低下する．

本稿では，IEEE 802.15.4 ビーコンモードにおいて，トポロジに応じた適切なクラスタリングと，アクティブ期間のスケジューリングを行うことにより，低消費電力，低遅延，高配信率を実現する方式を提案する．シミュレーション評価により，提案方式の有効性を示す．

¹ 千葉大学大学院 融合科学研究科
Chiba University, Chiba-city, Chiba 263-8522, Japan

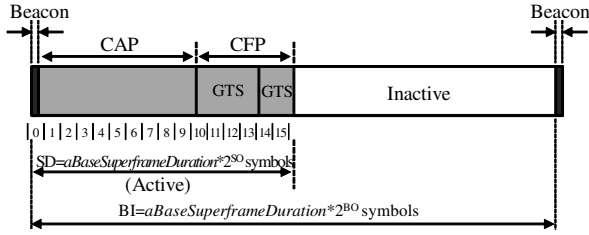


図 1 IEEE 802.15.4 スーパーフレーム構造.

2. IEEE 802.15.4

2.1 IEEE 802.15.4 ビーコンモードの特性

図 1 に IEEE 802.15.4 ビーコンモードにおけるスーパーフレームの構造を示す. 本稿では, アクティブ期間が CAP (Contention Access Period) のみで構成するスーパーフレームを想定する.

ビーコンモードでは, 式 (1),(2) により BI (Beacon Interval) と SD (Superframe Duration) を決定する.

$$BI = aBaseSuperframeDuration \times 2^{BO} \quad (1)$$

$$SD = aBaseSuperframeDuration \times 2^{SO} \quad (2)$$

$$(0 \leq SO \leq BO \leq 14)$$

ここで, $aBaseSuperframeDuration = 960[symbols] = 15.36[msec]$ である. これより, BO , SO が大きいほど, BI , SD がそれぞれ大きくなるのが分かる. BI が小さいほど, 単位時間にアクティブになる回数が増え, 遅延を抑制することができる. また, SD が大きいほど, 1 回のスーパーフレームで送信できるフレーム数を増やすことができる.

物理層と MAC 層に IEEE 802.15.4 を採用した ZigBee では, シンクノード (IEEE 802.15.4 におけるコーディネータ) と中継ノード (同, ルータ) は FFD (Full Function Device) で構成される. ここで, FFD とは中継機能を有し, 子ノードを複数持つことができるノードである.

また, IEEE 802.15.4 ビーコンモードでの Duty Cycle は式 (3) で表すことができる. BO と SO の差が小さいほど, Duty Cycle が大きくなる.

$$\begin{aligned} DutyCycle &= \frac{ActivePeriod}{ActivePeriod + SleepPeriod} \\ &= \frac{SuperframeDuration}{BeaconInterval} \\ &= \frac{2^{SO}}{2^{BO}} \end{aligned} \quad (3)$$

2.2 IEEE 802.15.4b

マルチホップトポロジにおいてビーコンモードを動作させるために, 2 つのビーコンのスケジューリング方式が Task Group 15.4b によって定義されている [3], [4].

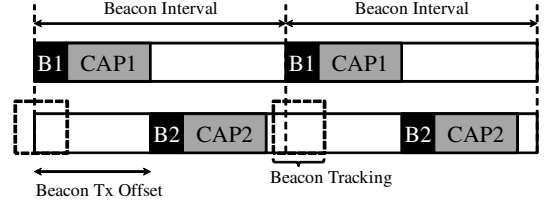


図 2 TD 方式.

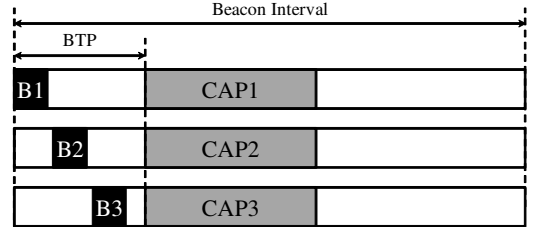


図 3 BOP 方式.

2.2.1 TD (Time Division) 方式

ビーコンスケジューリング方式の一つに, TD (Time Division) 方式がある. 図 2 のように各 FFD のスーパーフレームを完全にずらすことによって, ビーコンの衝突を防いでいる. 各 FFD ごとにアクティブ期間を保持するため, データの衝突も起こりにくい.

しかし, ノード数により Duty Cycle が制限される問題がある. 複数の FFD が存在する場合に, 複数の FFD が同じ時刻に SD を有したとする. この場合, ビーコンの衝突が発生する可能性がある. ビーコンの衝突により, ノード間で同期が取れなくなり, 通信ができなくなる. そこで, ビーコンの衝突を避けるために, 各 FFD がそれぞれの SD を保持する必要がある. このとき, 式 (4) を満たすように BO , SO を定める必要がある.

$$2^{BO-SO} \geq \text{Number of FFDs} \quad (4)$$

また, トポロジの規模とビーコンスケジューリングの方法によって, 大幅な遅延が発生する可能性がある.

2.2.2 BOP (Beacon-Only Period) 方式

もう一つに, BOP (Beacon-Only Period) 方式がある. 図 3 のように, BTP (Beacon Transmission Period) と呼ばれる, 全 FFD がビーコンを送信する期間を設けている. その BTP の中で, 各 FFD がビーコンを送信する BTS (Beacon Transmission Slot) をスケジューリングする. BTP の後, 全ノードが同時にアクティブ期間となる.

この方式においては, ビーコンスケジューリング方法による遅延は発生しないため, 上り/下り双方で低遅延となる. また, 親子関係のノード以外とも通信が可能となるため, メッシュトポロジに対応することができ, 冗長性・信頼性が高められる. しかし問題点として, 全ノードが同時に送信を行う可能性があるため, 高トラフィック時に衝突が多発する可能性がある.

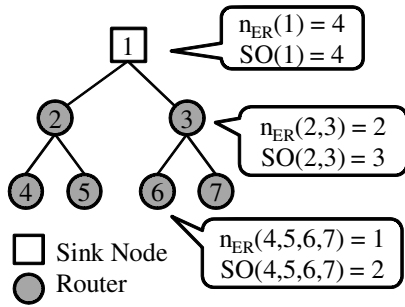


図 4 適応的アクティブ期間制御：SO 割り当て.

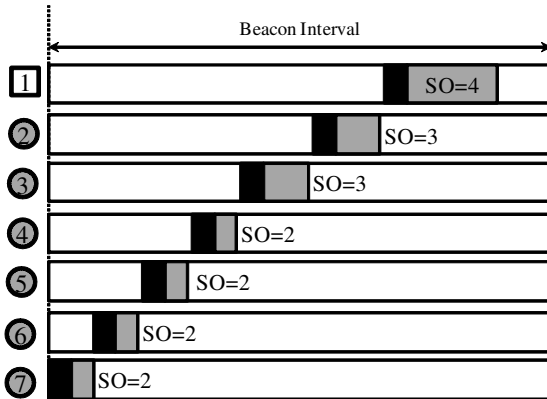


図 5 適応的アクティブ期間制御：ビーコンスケジューリング.

3. 従来研究

3.1 適応的アクティブ期間制御

TD 方式では、全てのパケットが収集されるシンクノードにおいても、シンクノードから最も遠い末端の中継ノード（以下、エッジルータ）においても、アクティブ期間の長さは変わらない．それによって、シンクノード周辺での輻輳が発生する問題がある．

この問題を解決するために、著者らが提案した、適応的アクティブ期間制御方式がある [5]．この方式では、各 FFD（ノード番号 i ）の配下にあるエッジルータ数 $n_{ER}(i)$ によって、各 FFD(i) の SO の値 $SO(i)$ を決定する．例えば、2 分木 3 ホップのトポロジであれば、図 4 のように $SO(i)$ が決定される．そして図 5 のような上り階段状にビーコンスケジューリングを行う．トラフィック負荷が高い場合にも、低遅延・低消費電力を達成するが、トポロジによってはシンクノードへの割り当てが大きい過ぎ、エッジルータに十分な SO を与えられないことがあるため、最適ではない．

3.2 E-BOP

BOP 方式での衝突を抑制するための方式に、E-BOP がある [6]．図 6 に動作を示す．ビーコンの送信は BOP 方式を用いるが、BTP の後の DTP (Data Transmission

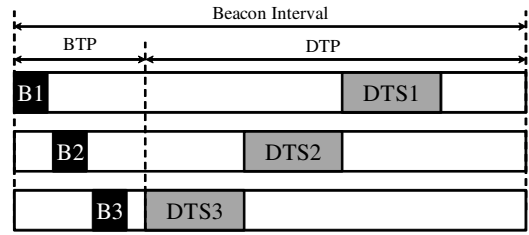


図 6 E-BOP.

Period) において、各ノードに DTS (Data Transmission Slot) を割り当てる．

BOP 方式によって、ビーコンによる下り方向の迅速な制御を可能にしつつ、TD 方式のように、ノードごとにアクティブ期間を排他的に保持することができる．しかし、Duty Cycle は TD 方式と同様なため、高トラフィック負荷時には性能が低下する．

4. 提案方式

本稿では、IEEE 802.15.4 を用いたクラスタツリー無線センサネットワークにおいて、高トラフィック時にも低遅延・高配信率・低消費電力を達成する方式を提案する．本方式では、ビーコンスケジューリングに BOP 方式を用いることにより、低遅延を達成する．さらに、その低遅延を保ったまま、衝突を抑制するようクラスタリングを行い、クラスタごとにアクティブ期間をずらして割り当てる．本方式で提案する、クラスタリングと Duty Cycle スケジューリングの動作について、以下に説明する．

4.1 クラスタリング

トポロジが定まり、静的またはルーティングプロトコルによって動的にノード間の親子関係が結ばれた後、クラスタリングを行う．末端のセンサノードからシンクノードへの経路に含まれるノードは、必ず一つの同じクラスタに属するようにする．そのため、各センサノードはそれぞれ 1 つのクラスタに属するが、中継ノードとシンクノードは複数のクラスタに属することになる．これにより、シンクノードに近いノードほど多くアクティブ期間が割り当てられるため、従来研究 [5] と同様の効果が得ることができる．

クラスタリングのために、パラメータ H を定義する． H は、シンクノードからクラスタを分割するノードまでのホップ数を表す． H の上限は、ネットワークにおけるシンクノードからエッジノードまでのホップ数の最大値である． $H = 1$ の時、シンクノードの 1 ホップ隣のノードの下に接続されるノード群が同じクラスタになる．例えば 2 分木 3 ホップのトポロジにおいては、 $H = 1$ の時、図 7(a) のように 2 つのクラスタにクラスタリングされる．同様に $H = 2$ の時は、図 7(b) のように 4 つのクラスタにクラスタリングされる．

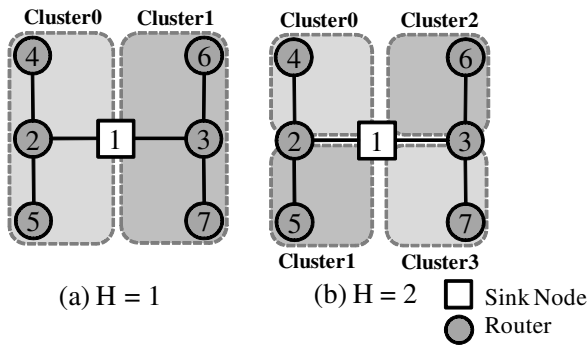


図 7 提案方式：クラスタリング (2 分木 3 ホップ).

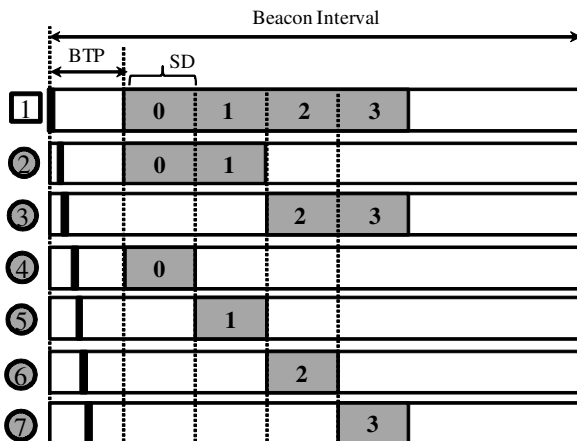


図 8 提案方式:Duty Cycle スケジューリング (2 分木 3 ホップ, $H=2$).

4.2 Duty Cycle スケジューリング

クラスタリング後、クラスタ間で衝突が起こらないよう、E-BOP のようにクラスタごとにアクティブ期間をずらすため、Duty Cycle スケジューリングを行う。Duty Cycle スケジューリングには、クラスタ番号と SO の値を用いる。クラスタ番号 i のクラスタは、BTP 終了後、 $i \times SD[msec]$ 待ってからアクティブ期間を開始する。

例えば 2 分木 3 ホップのトポロジで $H = 2$ の時 (図 7(b)), 各ノードのアクティブ期間は図 8 のようにスケジューリングされる。

5. シミュレーション評価

5.1 シミュレーション条件

提案方式の有効性を評価するため、ネットワークシミュレータ QualNet[7] の Ver.5.0.2 による評価を行った。本稿では、提案方式と、IEEE 802.15.4 ノンビーコンモード、ビーコンモードの TD 方式と BOP 方式を比較対象とする。

シミュレーションにおいて、2 分木の 3 ホップと 4 ホップのクラスタツリートポロジを用いる。シンクノードエリアの中心に、中継ノードとセンサノードを配置する。各エッジルータには 5 台のセンサノードが接続される。2 分木 3 ホップトポロジは、60[m] 四方のエリアに、中継ノード 6 台、センサノード 20 台が配置される。また、2 分木

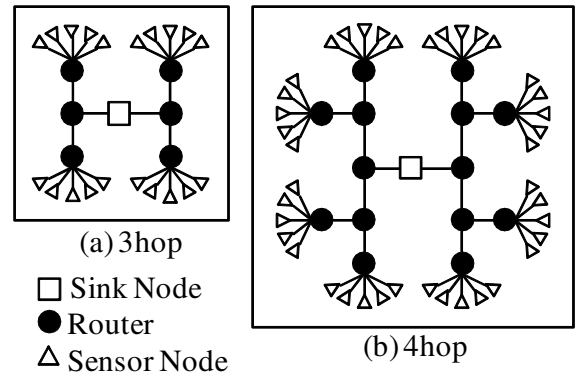


図 9 ネットワークトポロジ.

表 1 シミュレーション諸元

Parameter	Value
Simulation Time	3600[sec]
Beacon Order	6
BTP Slot Duration	1[ms]
BTP Slot Number	20
Data Frame Size	30[bytes]
Offered Load	1~30[pps]

4 ホップトポロジは、90[m] 四方のエリアに、中継ノード 14 台、センサノード 40 台が配置される。図 9 に、トポロジを示す。送信範囲とキャリアセンス範囲は等しく、隠れ端末が存在するものとする。

提案方式におけるクラスタについて、1 つのクラスタには 1 つのエッジルータを含むものとし、2 分木 3 ホップトポロジでは $H = 2$ で 4 クラスタ、2 分木 4 ホップトポロジでは $H = 3$ で 8 クラスタに分割する。提案方式とビーコンモードの BO は全て 6 とする。提案方式とビーコンモードの TD 方式において、2 分木 3 ホップトポロジの時は $SO = 1, 3$ 、2 分木 4 ホップトポロジの時は $SO = 1, 2$ を評価する。また、ビーコンモードの BOP 方式においては、どちらのトポロジにおいても $SO = 1, 3, 5$ を評価する。

表 1 にシミュレーション諸元を示す。Offered Load は、シンクノードへ向けられた全ノードからのフローの、単位時間あたりのパケット数 [pps(packet per second)] を表すものとする。評価指標は、end-to-end の平均到達遅延、パケット配信率、全ノードの総消費電力とする。

5.2 シミュレーション結果

5.2.1 平均到達遅延

2 分木 3 ホップと 2 分木 4 ホップトポロジにおける、Offered Load に対する平均到達遅延の結果をそれぞれ図 10, 11 に示す。

TD 方式は SO が小さいほど遅延が小さい。これは、 SO が小さいほどセンサノードのアクティブ期間からシンクノードのアクティブ期間までの時間が短いからである。しかし、アクティブ期間が短い分、1 度のビーコン周期で送

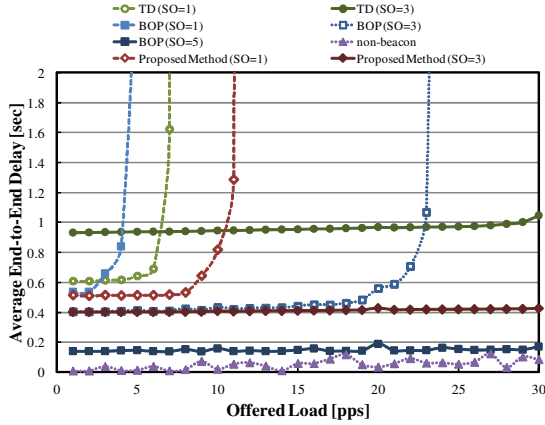


図 10 平均到達遅延 (2 分木 3 ホップ).

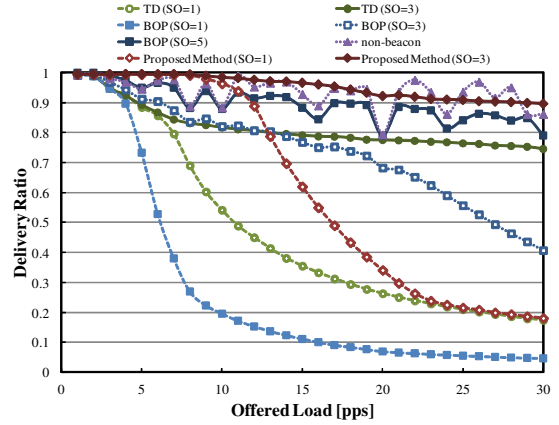


図 12 配信率 (2 分木 3 ホップ).

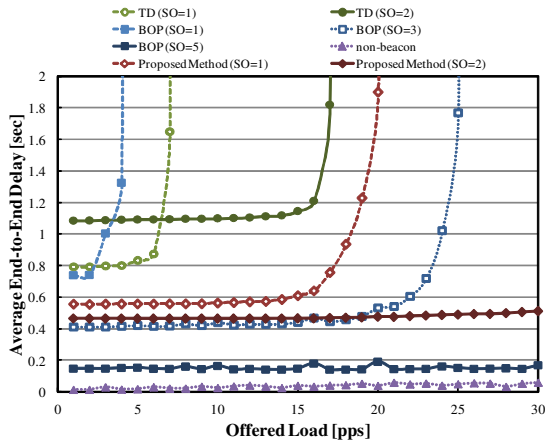


図 11 平均到達遅延 (2 分木 4 ホップ).

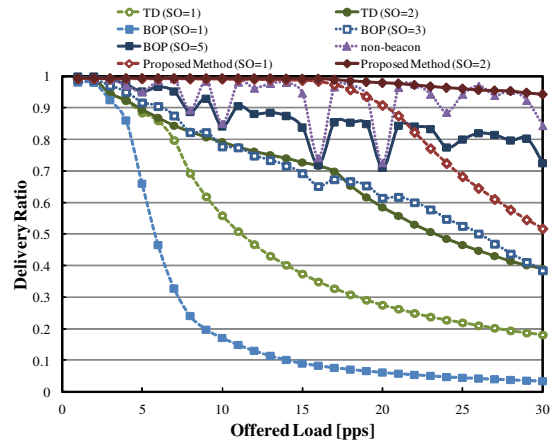


図 13 配信率 (2 分木 4 ホップ).

りきれの packets の数は少ないため輻輳が発生しやすく、遅延が急激に増大する。

一方 BOP 方式は、SO が大きいほど遅延が小さい。これは、アクティブ期間が長くなる分、全ノードの送信機会が増えるためである。TD 方式と同じ SO でも、アクティブ期間のスケジューリングによる遅延が発生しないため、BOP 方式の方が低遅延である。TD 方式と同様に SO が小さいほど遅延の増加が早い、TD 方式よりも衝突が多発するため、より早く遅延が増大する。

ノンビーコンモードでは、送信要求があってから即時に送信できるため、常に 0.1[sec] 前後と、最も低遅延である。

提案方式は、BOP 方式と同程度の遅延で、遅延の増加は TD、BOP 方式よりも遅い。これは、TD 方式よりも各ノードに十分な長さのアクティブ期間を保持しつつ、クラスタリングによって BOP 方式よりも衝突の発生が少なくなるからである。

5.2.2 配信率

2 分木 3 ホップと 2 分木 4 ホップトポロジにおける、Offered Load に対する配信率の結果をそれぞれ図 12, 13 に示す。

低トラフィックにおいては、全ての方式において配信率 0.9 以上を保っている。遅延の増大と同様に、SO が小さいほどトラフィックの増加により衝突が発生するため、配信率も低下する。同じ SO においては、BOP 方式、TD 方式、提案方式の順で配信率の低下が大きい。

ノンビーコンモードは、ほとんどの場合において高配信率であるが、ノードごとの packet 送信タイミングによっては、衝突を繰り返し、配信率が低下することがある。BOP 方式の SO = 5 でも同様である。

提案方式は、他の方式に比べ、安定して高い配信率を達成している。特に 2 分木 3 ホップにおける SO = 3、2 分木 4 ホップにおける SO = 2 は、30[pps] の高トラフィック時にも、0.9 前後の配信率を保っている。

5.2.3 総消費電力

2 分木 3 ホップと 2 分木 4 ホップトポロジにおける、Offered Load に対する総消費電力の結果をそれぞれ図 14, 15 に示す。図には Offered Load が 0[pps] の時も載せている。これは、送受信は行われず、ノードのセットアップ時に行うアソシエーションと、アイドル状態で消費する、最低限の電力を表す。

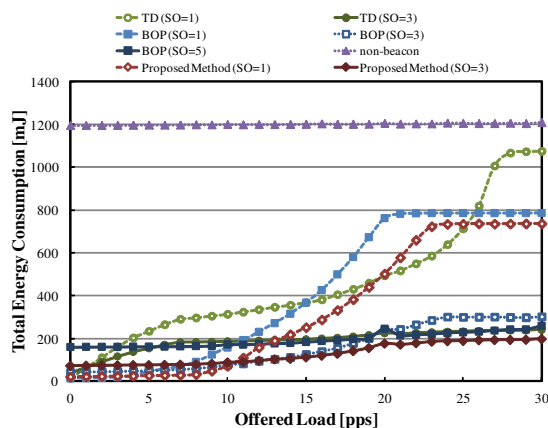


図 14 総消費電力 (2 分木 3 ホップ).

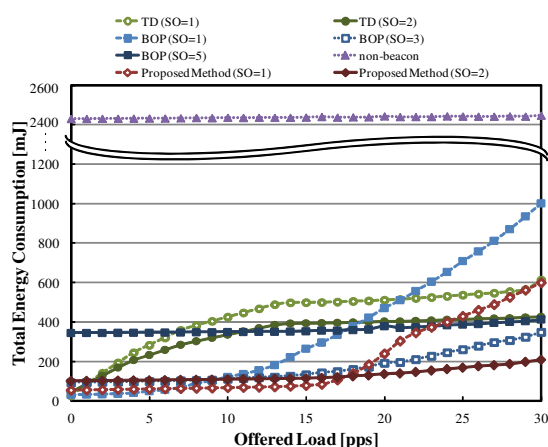


図 15 総消費電力 (2 分木 4 ホップ).

ビーコンモードでは、低トラフィック時には、SO が小さいほどアクティブ期間が短い分低消費電力で、トラフィック増加とともに電力も増加する。

TD 方式では、まずシンクノード周辺の輻輳により中継ノードの電力が増加する。中継ノードが、親ノードのアクティブ期間を最大限に使うようになった後、センサノードからエッジルータへの通信で輻輳が発生し、再び電力が増加する。それ以上は、全ノードがアクティブ期間を最大限に使うため、消費電力は一定になる。

BOP 方式では、トラフィック増加とともにネットワーク全体で輻輳が発生し、電力が増加する。TD 方式と同様に、ある一定トラフィック以上になると、消費電力は一定になる。

ノンビーコンモードでは、全ノードが常にアクティブ状態であるため、消費電力は膨大である。トラフィックの増加にともなって、ごくわずかに電力増加するが、ほぼ変わらない。

提案方式は、BOP 方式と同じ特性を持つ。しかし、クラスタリングにより衝突を抑制するため、同じ SO の BOP 方式よりも消費電力が減少している。

以上の結果をまとめると、ノンビーコンモードは低遅延・高配信率を達成するが、消費電力が膨大である。一方ビーコンモードでは、低トラフィック時は低消費電力であるが、遅延が発生する。トラフィックが増加すると、輻輳が発生し、急激に遅延と消費電力が増加、配信率が低下する。

ビーコンモードにおいて、SO を大きくすれば輻輳は抑制できるが、TD 方式では FFD の数により Duty Cycle に上限があり、SO を十分に大きくできない。BOP 方式では、SO を大きくしてもネットワーク全体で衝突が多発し、配信率が低下する。

そこで提案方式では、BOP 方式と同程度の遅延を維持しつつ、衝突の発生ををクラスタリングにより抑制したため、トラフィックが増加しても、低遅延・高配信率・低消費電力を達成した。特に、ホップ数が大きくノードが多い 2 分木 4 ホップにおいて有効性が大きく、他の手法が衝突により配信率が低下している中で、高配信率を維持した。

6. おわりに

本稿では、無線センサネットワーク IEEE 802.15.4 において、クラスタツリーネットワークのトポロジに応じた適切なクラスタリングと、Duty Cycle スケジューリングを行うことにより、高トラフィック時にも低遅延・高配信率・低遅延を達成する方式を提案した。シミュレーションによる性能評価を行い、提案方式の有効性を示した。

今後は、最適なクラスタリングと Duty Cycle スケジューリングのために、多様なトラフィックやトポロジに対する、TD 方式と BOP 方式それぞれの定量的な評価を行うことが課題である。さらに、従来研究 [5] のように、クラスタ内でのアクティブ期間の長さをトラフィックに応じて適応的に変更する手法を提案し、評価を行う。

参考文献

- [1] IEEE 802 Working Group, "Standard for Part 15.4: Wireless Medium Access Control and Physical Layer Specifications for LR-WPANs," Sept. 2006.
- [2] "ZigBee Specification 2006," <http://www.zigbee.org>
- [3] IEEE 802.15 WPAN Task Group 4b, <http://grouper.ieee.org/groups/802/15/pub/TG4b.html>
- [4] B. C. Villaverde, R. D. P. Alberola, S. Rea, and D. Pesch, "Experimental Evaluation of Beacon Scheduling Mechanisms for Multihop IEEE 802.15.4 Wireless Sensor Networks," International Conference on Sensor Technologies and Applications, 2010.
- [5] N. Kai, S. Sakata, N. Komuro, "Dynamic Active Period Control achieving Low Energy Consumption and Low Latency in Multi-hop Wireless Sensor Networks," International Symposium on Autonomous Decentralized Systems, Mar. 2013.
- [6] S. Takagawa, M. N. Shirazi, J. Cheng, R. Miura, "E-BOP: A simple and efficient enhancement of ZigBee's BOP protocol," International Conference on Computing, Networking and Communications, Jan. 2012.
- [7] "QualNet," <http://www.scalable-networks.com/>