

発電レートが不均一な環境発電型無線センサネットワーク に対応した高効率クラスタ制御方式

前本 大輝 森 香津夫 眞田 耕輔 小林 英雄

三重大学大学院工学研究科 〒514-8507 三重県津市栗真町屋町 1577

E-mail: maemoto@com.elec.mie-u.ac.jp, {kmori, k.sanada, koba}@elec.mie-u.ac.jp

あらまし 環境発電機能を備えたノードを使用したクラスタ型無線センサネットワークでは、消費電力の抑制とネットワーク寿命の長期化のために、環境発電ノードの発電量を考慮したクラスタリング方式の研究が行われている。しかし、発電レートが地理的に偏る環境では、クラスタヘッド(CH)が高発電レート領域に偏って配置され、孤立センサノードの増加によりデータ収集率が低下する問題がある。この問題に対してEHGAFが検討されているが、小領域毎に選出されるCH間の通信負荷分散において発電レートの違いが考慮されていない。そのため発電量が異なるにも関わらず各CHでの消費電力量は同一となり残余電力量に偏りが生じ、ネットワーク寿命が短くなる問題がある。本稿では、CHが自身の推定消費可電力量をもとにクラスタサイズを制御し低発電レート領域にあるCHにおける通信負荷を軽減して、残余電力量の偏りを抑えるクラスタ制御方式、およびチャネルアクセス競合を緩和するバックオフ窓制御を提案する。性能評価により、提案方式のネットワーク性能がEHGAFと比較して向上することを示す。

キーワード WSN, 環境発電, MU-MIMO, 不均一な発電レート, クラスタサイズ制御

Energy-Harvesting Aware Clustering Scheme for Wireless Sensor Networks under Non-uniform Energy Harvesting Conditions

Daiki MAEMOTO, Kazuo MORI, Kosuke SANADA and Hideo KOBAYASHI

Graduate School of Engineering, Mie University 1577 Kurimamatiya-cho, Tsu-shi, Mie, 514-8507, Japan

E-mail: nomura213@com.elec.mie-u.ac.jp, {kmori, k.sanada, koba}@elec.mie-u.ac.jp

Abstract In cluster-based energy harvesting wireless sensor networks (EH-WSNs), clustering schemes considering harvesting power at energy harvesting nodes have been studied for reducing power consumption and prolonging network lifetime. However, the data collection rate would degrade in the EH-WSNs with geographical non-uniform energy-harvesting rate since isolated sensor nodes (SNs) increase due to concentration of cluster heads (CHs) at high energy-harvesting rate area. The EHGAF has been proposed to suppress the performance degradation, however, this scheme results in non-uniform residual power between CHs caused from equal consumed power due to no consideration of difference in the energy-harvesting rate among CHs selected at small areas. This non-uniform residual power leads to short network lifetime. This paper proposes a clustering control scheme to reduce non-uniform residual power between the CHs. In the proposed scheme, each CH controls its cluster size based on its estimated available consuming power so as to reduce its communication load when locating at the area with low energy-harvesting rate. Adaptive back off window control is also proposed to suppress the contention for channel accesses. The simulation results show that the proposed scheme improves the network lifetime compared with the EHGAF.

Keywords WSN, energy harvesting, non-uniform energy harvesting rate, cluster size control

1. まえがき

無線センサネットワーク(Wireless Sensor Network, WSN)は、広範囲に配置されたセンサノード(Sensor Node, SN)と呼ばれる無線センサ端末がマルチホップ通信を行い、センター装置であるシンクノード(Sink node, SINK)にデータを伝送することによって形成されるネットワークである。WSNは森林や農地の環境モニタリングなどに使用されており今後様々な応用が期待されている[1]。一般に、SNはバッテリー駆動でありバッテリー交換

が困難な場所に設置される場合があるため、省電力化によるバッテリー寿命ひいてはネットワーク寿命の延長が必要となる。これを実現するために、環境発電機能を有した環境発電ノード(Energy Harvesting Node, EHN)を使用した環境発電型 WSN(Energy Harvesting-Wireless Sensor Network, EH-WSN)が研究されている[2][3]。EH-WSNでは、EHN自体が環境発電により電力を回復することによって、ネットワーク寿命の延長が期待されている。しかしEH-WSNでは、主に太陽光

発電を利用しているため、発電によって得られる電力量は小さくかつ不安定である。そのため EH-WSN では、発電量に応じた省電力化動作が必要となる。

EH-WSN における省電力化手法の 1 つとして、小領域(クラスタ)毎に分けられたノードから選出された代表ノード(Cluster Head, CH)がクラスタ内のデータを収集し、集約して SINK に転送するクラスタ型ネットワーク技術がある。クラスタ型ネットワークでは通信距離を削減できるため、各ノードの消費電力量を抑制することができる。しかし、扱うデータ量が多くなる CH に通信の電力負担が集中してしまう問題がある。そのため通信の電力負担を全ノードで分担するために、CH を変更してクラスタ構造を再構成するクラスタリングが一定周期(ラウンド)毎に行われる必要がある。

EH-WSN におけるクラスタリング技術として現在検討されている方法の 1 つに、WSN 用のクラスタリング技術である Geographic Aware Fidelity (GAF)[4]を EH-WSN に拡張した Energy Harvesting Geographic Aware Fidelity (EHGAF)[5]がある。EHGAF ではネットワークエリアを仮想的に格子状の小領域に分割し、小領域毎に CH を選出するクラスタリング方式である。この方式では、CH の選出基準として各 EHN の推定残余電力量を用いているため、推定残余電力量が多い EHN を CH に選出することができる。そのため CH の電力枯渇によるネットワーク性能の低下を抑制することができる。またこの方式では、小領域毎に CH を選出するため、発電レートが地理的に偏る環境で用いても CH をネットワークエリアに様に配置することができる。そのため、通信距離を短く保つことができ、省電力化とデータ収集率向上に寄与する。しかし、この方式では CH 選出にのみ推定残余電力量を考慮しており、各ノードの接続 CH 選択時にはその違いが考慮されていない。そのため、推定残余電力量に関わらず CH に接続されるノードの数が等しく、通信の電力負担が均等になってしまう。その結果、発電レートが地理的に偏った環境では、発電レートが低い領域では、発電電力量に対する消費電力量の割合が大きくなり、残余電力量が大きく減少するため、残余電力量に地理的に偏りが生じてしまう。そのため、低発電レート領域では電力枯渇が起きやすく、ネットワークの寿命が短くなってしまいう問題がある。

本稿では、発電レートが地理的に偏った環境において、ノード間の残余電力量の偏りをなくし、ネットワーク寿命の更なる長期化を実現することを目的とする。この目的を達成するために、発電レートの地理的な偏りを考慮し、仮想的に分割された各小領域から選出された CH が自身の使用可能電力量に応じてクラスタサイズを制御することによって、低発電レート領域にある CH の通信負荷を軽減させ、残余電力量の偏りを抑

制するクラスタ制御方式を提案する。さらに、クラスタサイズを大きくしたクラスタではトラフィック量増加に起因したチャンネルアクセス競合によるデータ収集率の劣化が予想される。この性能劣化を抑制するために、チャンネルアクセス制御におけるバックオフ動作で利用されるバックオフ窓をクラスタサイズに応じて変化するバックオフ窓制御を提案する。計算機シミュレーションによる特性評価により、提案方式は従来方式に比べネットワーク寿命の長期化を実現することができ、従来方式の課題を解決できることを示す。

2. 関連研究

現在研究が行われているクラスタリング方式として、WSN で用いられる GAF[4]と、EH-WSN 向けに CH の選出基準を改良した EHGAF[5]について述べる。

2.1. Geographic Aware Fidelity (GAF)

GAF はネットワークエリア内に CH を偏りなく様に配置して通信距離をほぼ均等にすることで、ノードの消費電力を抑制することを目的としている。

GAF は、ネットワークエリアを仮想的に格子状の小領域に分け、小領域毎に 1 台の CH を周期的(ラウンド毎)に選出するクラスタリング方式である。CH 以外のノードは、一定期間スリープ状態に入ること無線通信機能を停止し、ネットワーク全体の消費電力を抑えることができる。

CH の選出法では、各ノードは自身が CH に適しているかを数値化したランクを制御バケットに含め定期的に送信し、受信したノードは自身のランクと比較する。自身のランクが受信したランクより低い場合、他ノードが CH に適していると判断して、スリープ状態に移して通信を停止する。この動作を一定時間行い、最終的に各小領域 1 台ずつ CH が選出される。GAF では、ランクに各ノードの残余電力を用いることで最も残余電力が高いノードを CH に選出することができる。

ところが、GAF を EH-WSN で用いた場合、ノードの発電電力量の違いを考慮せず CH が選出されてしまい、残余電力量は多いが、その後の発電によって回復できる電力量が不十分な EHN も CH に選出されてしまう。そのため、選出された CH が電力枯渇を起こしやすくなる問題がある。

2.2. Energy Harvesting GAF (EHGAF)

上記の問題を解決するために残余電力量と発電電力量がともに大きい EHN を CH として選出することを目的とした EHGAF が研究されている。

EHGAF ではランクとして各ラウンド終了時の残余電力の推定値 \hat{E}_{rst} を用い、ランクが一番高いノードを CH として選出する。 r ラウンドにおけるノード i のランク $\hat{E}_{rst}^i(r)$ は式(1)で表すことができる。

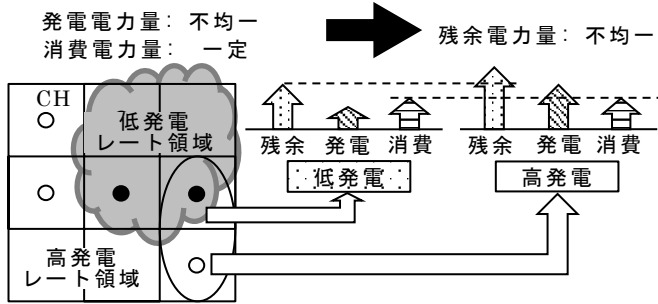


図1 EHGAFの問題点

$$\hat{E}_{\text{rst}}^i(r) = E_{\text{rst}}^i(r) + E_{\text{hrv}}^i(r) - E_{\text{CH}}^i(r), \quad (1)$$

ここで、 $E_{\text{rst}}^i(r)$ は r ラウンド開始時の残余電力量であり、 $E_{\text{hrv}}^i(r)$ 、 $E_{\text{CH}}^i(r)$ は当該ラウンドでの発電電力量と、CH時の消費電力量である。 $E_{\text{CH}}^i(r)$ は式(2)で計算できる。

$$E_{\text{CH}}^i(r) = m^i * (E_{\text{Tx}}^i(r) + E_{\text{Rx}}^i(r)), \quad (2)$$

ここで、 m^i 、 $E_{\text{Tx}}^i(r)$ 、 $E_{\text{Rx}}^i(r)$ はそれぞれ、クラスタ内の接続ノード数、送信時、受信時の消費電力量を表す。ランクに残余電力の推定値を用いることによってより長いネットワーク寿命が実現できる。

しかしながら、EHGAFではCHの選出時には推定残余電力量を考慮しているが、ノードの接続CH選択時には考慮していない。図1のように発電レートが地理的に偏った環境においては、発電レートが低い領域では、残余電力量の回復が小さくなる。そのためEHGAFを用いると、低発電レート領域のCHでは電力枯渇が起きやすく、ネットワーク寿命が短くなる問題がある。

3. 発電レートの地理的偏りを考慮したクラスタ制御方式

本稿では、推定消費可能電力量に応じて各CHの接続ノード数の制御を行い、CHの通信負荷による電力負担を分散させることを目的としたクラスタ制御方式を提案する。本方式はネットワークエリアの小領域分割、各小領域でのCH選出、推定消費可能電力量に基づくクラスタサイズ制御、クラスタサイズに応じたバックオフ窓制御の4段階機能で構成される。ここで、前者の2機能は基本的にEHGAFと同様である。

3.1. 領域分割

領域分割では、GAF、EHGAFと同様にネットワークエリア内にCHを一様に配置するために、ネットワークエリアを仮想的に格子状の正方形小領域に分割し、各領域からCHをラウンド毎に選出する。

領域分割の際、図2のように、各CHは配下のSNからデータを収集するため、CHはSNの通信可能範囲 $R_{\text{Tx}}^{\text{SN}}$ 内に配置される必要がある。また、CHは互いにマルチホップ通信を行うため、隣接するセル内のCH間距離がCHの通信可能範囲 $R_{\text{Tx}}^{\text{CH}}$ 以下である必要がある。そのため、分割された小領域の1辺の長さ r_{sa} は式(3)で

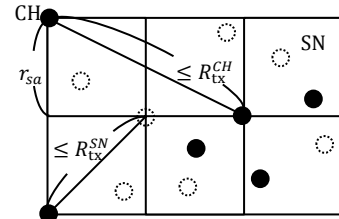


図2 領域分割

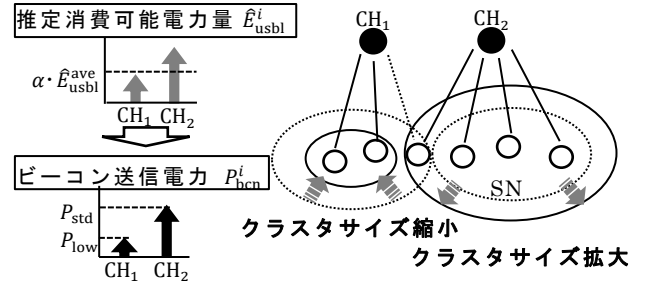


図3 クラスタサイズ制御

表される範囲内である必要がある。

$$r_{\text{sa}} \leq \min\left(\frac{R_{\text{Tx}}^{\text{SN}}}{\sqrt{2}}, \frac{R_{\text{Tx}}^{\text{CH}}}{\sqrt{5}}\right). \quad (3)$$

3.2. CH選出

CH選出では、EHGAFと同様に小領域内で最大ランクのノードをCHに選出する。本方式ではランクとして、式(4)に示される現ラウンド内で消費可能と推定される推定消費可能電力量 $\hat{E}_{\text{usbl}}^i(r)$ を使用する。

$$\hat{E}_{\text{usbl}}^i(r) = E_{\text{rst}}^i(r) + \hat{E}_{\text{hrv}}^i(r), \quad (4)$$

ここで、 $E_{\text{rst}}^i(r)$ は r ラウンド開始時のノード i における残余電力量、 $\hat{E}_{\text{hrv}}^i(r)$ は r ラウンドにおける推定発電電力量である。発電電力量は、前ラウンドとほぼ同じと予想されるため、 $\hat{E}_{\text{hrv}}^i(r)$ には直前の $(r-1)$ ラウンドにおける発電電力量 $E_{\text{hrv}}^i(r-1)$ を用いる。

3.3. クラスタサイズ制御

クラスタサイズ制御では、選出されたCHの推定消費可能電力量 $\hat{E}_{\text{usbl}}^i(r)$ がその発電レートにより異なるため、図3のようにCHの電力負担を分散させるためにクラスタサイズを調整する。各ノードでの接続CH選択では、一般に選択基準としてCHからのビーコン受信電力を用いる。このときビーコン送信電力 P_{bcn}^i を周囲のCHのそれよりも小さくすればクラスタサイズを小さくでき、接続SN数が少なくなる。そのため、 $\hat{E}_{\text{usbl}}^i(r)$ が小さいCHの P_{bcn}^i を小さくし、当該CHのクラスタサイズを縮小して通信負荷を軽減し、電力負荷低減を図る。

本方式では、2段階のビーコン送信電力を定義し、 $\hat{E}_{\text{usbl}}^i(r)$ の値に応じて各CHの P_{bcn}^i を設定する。 r ラウン

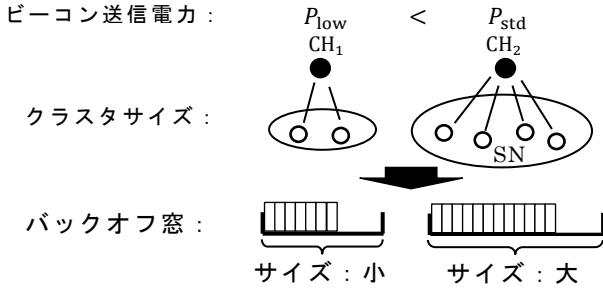


図4 バックオフ窓制御

ドにおけるCH_iのビーコン送信電力 $P_{bcn}^i(r)$ は、全CHの $\hat{E}_{usbl}^i(r)$ の平均値 $\hat{E}_{usbl}^{ave}(r)$ を基準として式(5)を用いて決定する。

$$P_{bcn}^i(r) = \begin{cases} P_{low} & ; \hat{E}_{usbl}^i(r) < \alpha \cdot \hat{E}_{usbl}^{ave}(r) \\ P_{std} & ; otherwise \end{cases}, \quad (5)$$

ここで、 P_{std} 、 P_{low} はそれぞれ標準ビーコン送信電力、クラスタサイズを縮小するCHのビーコン送信電力である。 α は $\hat{E}_{usbl}^i(r)$ に対する閾値を決定する制御パラメータであり、予め定められた固定値である。

3.4. バックオフ窓制御

クラスタサイズ拡大を行うクラスタでは、トラフィック負荷が増加し、多発するチャンネルアクセス競合に起因してデータ収集率が劣化する恐れがある。このアクセス競合を緩和させるために、バックオフ窓サイズをクラスタサイズによって変化するアクセス制御を行う。バックオフ窓サイズはバックオフ指数BEによって決定されるため、クラスタサイズ制御によって決定されたビーコン送信電力 P_{bcn}^i を基準に、 P_{bcn}^i が小さいクラスタではBEを小さく、大きいクラスタではBEを大きく設定して、チャンネルアクセス競合を緩和する。

本方式では、BE値範囲 $[BE_{min}, BE_{max}]$ に対して2種類の値を定義し、各CHのビーコン送信電力値に応じて配下のSNが使用するBE値範囲を決定する。 r ラウンドにおけるCH_iの配下のSNが使用する $[BE_{min}^i(r), BE_{max}^i(r)]$ は式(6)により与えられる。

$$[BE_{min}^i(r), BE_{max}^i(r)] = \begin{cases} [BE_{min}^{high}, BE_{max}^{high}]; & P_{bcn}^i(r) = P_{std} \text{ and } X(r) = 1 \\ [BE_{min}^{std}, BE_{max}^{std}]; & otherwise \end{cases}, \quad (6)$$

ここで、 $[BE_{min}^{high}, BE_{max}^{high}]$ 、 $[BE_{min}^{std}, BE_{max}^{std}]$ はそれぞれクラスタ拡大時の、および標準のBE値範囲である。また、 $X(r)$ はクラスタサイズ制御の有無を表す変数であり、ビーコン送信電力値 P_{low} を使用するCHが存在する場合は1、それ以外の場合は0が与えられる。

3.5. 制御手順

本方式の制御手順として、ラウンド開始後の各小領域に割り当てられた最初の通信期間を用いて、小領域

毎にCHを選出する。選出方法として、各EHNは自小領域内の他のEHNに自身の \hat{E}_{usbl}^i を放送する。これを受信したEHNは自身の \hat{E}_{usbl}^i と比較し、自身の方が小さければ次の選出機会までスリープ状態となる。通信期間終了時にアクティブ状態のEHNがCHに選出される。

全ての小領域においてCHの選出が終了した後、選出されたCHは自身の \hat{E}_{usbl}^i をSINKへ送信する。受信したSINKは \hat{E}_{usbl}^i の平均値を求め、そのときのクラスタサイズ制御における閾値 $\alpha \cdot \hat{E}_{usbl}^{ave}$ とクラスタ制御の有無 $X(r)$ を全CHに放送する。これらを受信したCHは式(5)に従いビーコン送信電力 P_{bcn}^i を、式(6)に従い配下のSNが使用するBE値範囲 $[BE_{min}, BE_{max}]$ を決定する。

4. 特性評価モデル

提案方式の性能を評価するため、シミュレーション評価を行った。ネットワークエリアとして1辺 R [m]の正方形を想定し、仮想的に n^2 個の正方小領域に等分割する。各小領域内にEHNを N_{EHN} 台、SNを N_{SN} 台ずつ一様に配置し、CHはEHNのみから選出する。CHに選出されなかったEHNは当該ラウンド内ではスリープ状態となり電力を回復させる。

4.1. 通信モデル

トポロジーモデルとして、SINK、CH、SNの二階層モデルを想定し、SNで生じたデータをSN→CH、CH→SINKと伝送する。

通信方式として、IEEE802.15.4 MACビーコンモードを適用し、SN-CH間ではContention Access Period(CAP)期間でCSMA/CAを用いて伝送する。各クラスタのCAP期間は時間軸上で重複しない様に配置する。そのため、クラスタ間での干渉は起こらない。またSN間での隠れ端末問題は考慮しない。CH-SINK間ではContention-Free period(CFP)期間で予約型通信を行う。予約型通信であるため、パケット損失は起きない。

各CHは割り当てられたCAPにおいて配下のSNからパケットを受信し、それらを後続のCFP期間でSINKに送信した後、次CAP期間までスリープ状態となる。

トラフィックモデルにおいて、ネットワークトラフィック負荷 G [packets/ L_{pkt}]を定義し、各SNは平均トラフィック負荷 $G/(N_{SN} \cdot n^2)$ [packets/ L_{pkt}]のポアソン分布に従ってパケットを発生させる。ここで、 L_{pkt} はパケット長である。

4.2. 消費電力モデル

本稿ではEHNのみに着目して消費電力を計算する。消費電力計算は、表1に示すIEEE802.15.4に準拠した通信制御用トランシーバCC2420[6]のパラメータを使用して行う。EHNの状態を、パケットを送信する送信状態(Tx)、パケットを受信する受信状態(Rx)、通信待機状態(Idle)、スリープ状態(Sleep)と定義する。このと

表 1 消費電力パラメータ

EHNの状態		消費電力[mW]
送信状態	P_{Tx}	17.82
受信状態	P_{Rx}	33.84
待機状態	P_{Idle}	0.7668
スリープ状態	P_{Sleep}	0.036

表 2: シミュレーション諸元

ネットワークエリアの1辺	R	200 [m]
小領域個数	n^2	4 ² 個
小領域内 EHN 数	N_{EHN}	5 台
小領域内 SN 数	N_{SN}	20 台
ビーコン間隔	BI	3.93 [s]
クラスタリング間隔		250 [BIs]
低発電レート	E_{harv}^{low}	0.05 [mW]
高発電レート	E_{harv}^{high}	0.1 [mW]
標準ビーコン送信電力	P_{std}	-10 [dBm]
低ビーコン送信電力	P_{low}	-15 [dBm]
初期電力量	E_{ini}	0.5 [J]

き、ノード i における消費電力量 E_{Cons}^i は、式(7)を用いて算出される。

$$E_{Cons}^i = \sum_{x=Tx, Rx, Idle, Sleep} P_x \cdot T_x^i, \quad (7)$$

ここで、 P_{Tx} 、 P_{Rx} 、 P_{Idle} 、 P_{Sleep} はそれぞれ各状態における消費電力であり、 T_{Tx}^i 、 T_{Rx}^i 、 T_{Idle}^i 、 T_{Sleep}^i はそれぞれ各ノードの Tx 期間、Rx 期間、Idle 期間、Sleep 期間の時間長を表す。

EHN は初期電力 E_{ini} が与えられ、電力枯渇後に発電により電力量は回復しても再起動しないものとする。

4.3. 環境発電モデル

本稿では、環境発電として太陽光発電を想定し、各 EHN はそれぞれが配置された地点に設定された発電レートに従い常に発電を行う。

発電レートの地理的な偏りを模擬するために、ネットワークエリア内に低高 2 種類の発電レートを設定する。低発電レート領域はネットワークエリアの 1 つの頂点から正方形に設定し、その発電レートを E_{harv}^{low} とする。それ以外の領域を高発電レート領域として発電レート E_{harv}^{high} を設定する。ここで全領域に対する低発電レート領域の割合を R_{Low} とする。

5. 特性評価

従来方式である EHGAF と提案方式における SINK でのデータ収集率 P_{DCR} と遅延時間 T_{delay} 、データ収集率 P_{DCR} が 95% 以上を実現できる稼働時間長であるネットワーク寿命 T_{life} について比較を行った。低発電レート領域割合 R_{Low} を 0.4 とした。

5.1. クラスタ制御方式の性能評価

提案方式においてクラスタサイズ制御のみを実施した場合の性能評価を行う。

図 5 にトラフィック負荷 G を 0.05 とした場合の稼働時間に対するデータ収集率 P_{DCR} 特性を示す。提案方式は従来方式比べ長い稼働時間においても高い P_{DCR} を達

成している。提案方式では、制御パラメータ α が増加するに従い、優れた P_{DCR} を維持できる稼働時間が長くなる。しかし大きい α 値に対しては、稼働開始直後において P_{DCR} が若干劣化する傾向にある。これはサイズを拡大したクラスタにおけるチャネルアクセス競合の増加に起因する。

図 6 に伝送遅延 T_{delay} 特性を示す。提案方式では、 P_{DCR} 特性と同様に、長い稼働時間において低い伝送遅延を保っている。制御パラメータ α の設定値変化に対する影響も、 P_{DCR} 特性と同様の傾向を示している。

図 7 に平均トラフィック負荷 G の変化に対するネットワーク寿命 T_{life} 特性を示す。従来方式と比較すると、提案方式はより長いネットワーク寿命を実現している。トラフィック負荷 G が低いとき、提案方式による改善率は大きいですが、 G の増加に従い改善率は減少している。

5.2. バックオフ窓制御併用時の性能評価

バックオフ窓制御を併用した場合の提案方式 ($\alpha = 1.0$) の特性評価を行う。事前評価において提案方式では $[BE_{min}^{high}, BE_{max}^{high}] = [4, 6]$ が最も優れた特性を示していることから、ここでは固定 BE 値範囲として標準値である $[3, 5]$ と $[4, 6]$ を用いた場合の特性を示す。従来方式においても固定 BE 値範囲 $[BE_{min}, BE_{max}] = [3, 5], [4, 6]$ を用いた場合を示す。

図 8 にデータ収集率 P_{DCR} 特性を示す。バックオフ窓制御を併用すると、提案方式は従来方式に比べ、さらには固定の $[BE_{min}, BE_{max}] = [3, 5]$ を用いた場合より優れた特性を示している。これは、バックオフ窓制御によって、チャネルアクセス競合を抑制することができることに起因する。また、稼働開始直後の P_{DCR} 特性の劣化も発生していない。しかし固定の $[BE_{min}, BE_{max}] = [4, 6]$ を用いた場合と比較すると、 P_{DCR} が低下している。

一方、図 9 に示す伝送遅延 T_{delay} 特性においては、固定の $[BE_{min}, BE_{max}] = [4, 6]$ を用いた場合にはバックオフ窓制御と比較して特性劣化が見られる。したがって、これらの性能にはトレードオフの関係があると言える。

図 10 にネットワーク負荷 G を変化したときのネットワーク寿命 T_{life} 特性を示す。バックオフ窓制御を用いた提案方式は従来方式に比べて、BE 値範囲の設定に関わらず大きく改善していることが分かる。しかし、バックオフ窓制御を併用した場合は併用しない固定の $[BE_{min}, BE_{max}] = [4, 6]$ を用いた場合の特性と比べると若干の低下が見られる。

6. まとめ

本稿では、地理的に発電レートが偏る環境において従来方式で生ずる残余電力量の偏りに起因した電力枯渇を抑制してネットワーク寿命を長期化することを目的として、発電レートを考慮した通信負荷分散を実現するクラスタ制御方式およびチャネルアクセス競合を緩和するバックオフ窓制御を提案した。

提案方式では、ネットワークエリアを小領域に分割し、小領域毎にCHを1台ずつ選出する。選出されたCHが残余電力量に応じた通信負荷となるようにクラスタサイズを制御する。また、クラスタサイズ制御を行った際に同時にバックオフ窓制御を行う。

特性評価により、提案方式はクラスタサイズ制御により従来方式と比べて稼働時間を延長することができ、またバックオフ窓制御によりデータ収集率の劣化の抑制をするとともに伝送遅延時間を小さくすることが可能となった。

文献

- [1] T. Rault, A. Bouabdallah, and Y. Challal, "Energy efficiency in wireless sensor networks: A top-down survey," *Computer Networks*, vol.67, no.4, pp.104-122, July 2014.
- [2] C. Bergonzini, D. Brunelli, L. Benini, "Algorithms for harvested energy prediction in battery less wireless sensor networks," *Proc. of 3rd International Workshop on Advances in Sensors and Interfaces*, pp.144-149, June 2009.
- [3] V. Raghunathan, A. Kansal, J. Hsu, J. Friedman, M. Srivastava, "Design considerations for solar energy harvesting wireless embedded systems," *Proc. of Fourth International Symposium on Information Processing in Sensor Networks*, pp.457-462, April. 2005.
- [4] 伊尻雄太, 宮路祐一, 上原秀幸, "無線センサネットワークにおける発電レートの地理的偏りを考慮したクラスタ型ルーティング," *電気電子情報関係学会東海支部連合大会, L1-1*, 2015. 9.
- [5] Y. Xu, J. Heidemann, and D. Estrin, "Geography- informed energy conservation for ad hoc routing," *Proc. of MobiCom'01*, pp.70-84, July 2001.
- [6] Texas Instrument, RF transceiver CC2420 Data Sheet, vol.1.4, April. 2006.

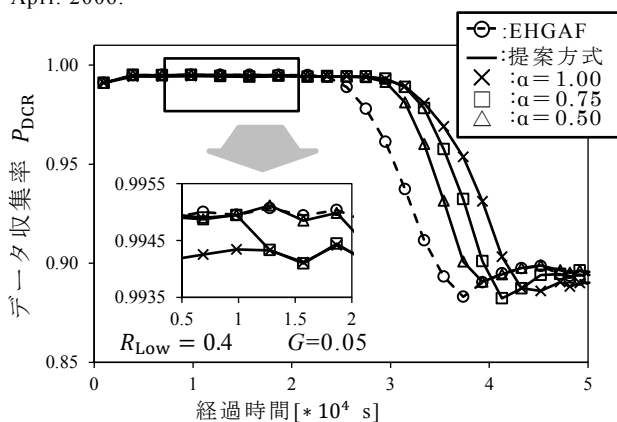


図5 データ収集率 P_{DCR}

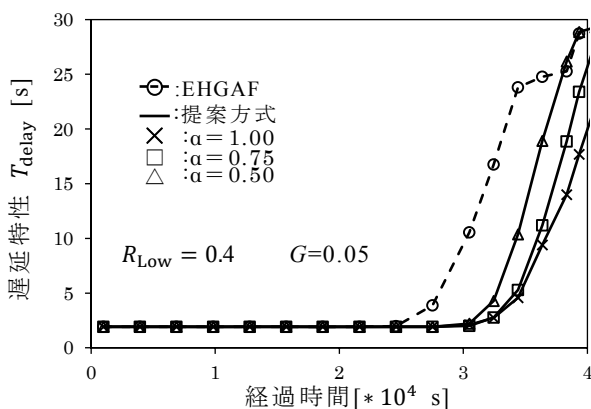


図6 伝送遅延特性 T_{delay}

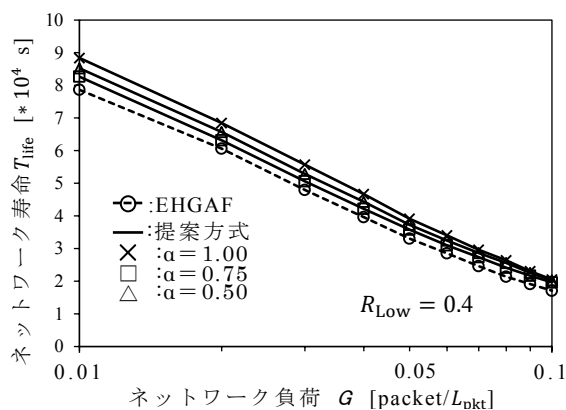


図7 ネットワーク寿命 T_{life}

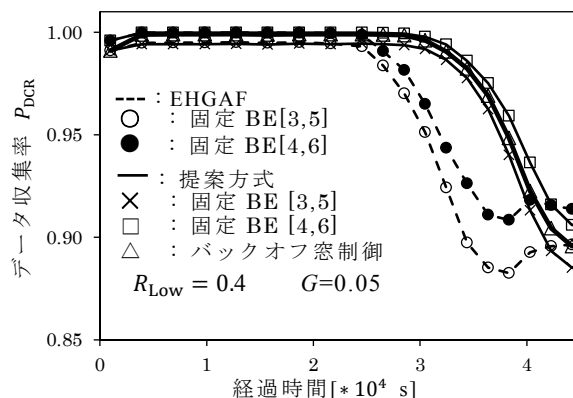


図8 データ収集率 P_{DCR} (バックオフ窓制御)

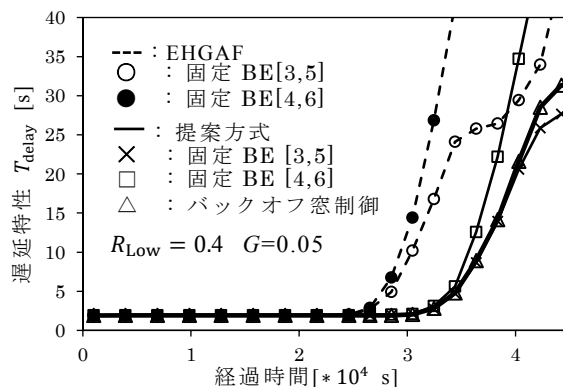


図9 伝送遅延 T_{delay} (バックオフ窓制御)

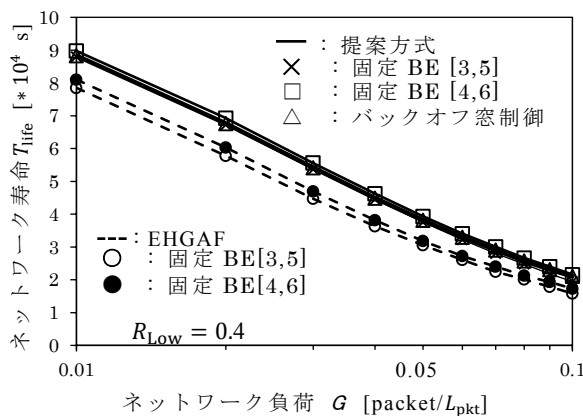


図10 ネットワーク寿命 T_{life} (バックオフ窓制御)