

# クラスターヘッドをクライアントモードにすることによる消費電力削減

大沢 恭平<sup>1</sup> 河竹 純一<sup>2</sup> 串田 高幸<sup>1</sup>

**概要:** 屋外の監視環境では安定した電力供給設備やネットワークが用意できる保証が無い。そのような環境では、いくつかの IoT デバイスを経由してサーバーまでデータを送信するマルチホップ通信を行う。IoT デバイスはバッテリーで動作するが、多くの場合、機器の小型化に伴ってバッテリーサイズも制限される。マルチホップ通信において、受信側ノードは AP モードを起動して Wi-Fi のアクセスポイントとなり、データの中継を行う。しかし、AP モードを起動するノードの消費電力量は増加し、IoT デバイスの動作可能時間は減少する。データの中継を行うノードがバッテリー不足によって停止することで、孤立ノードが発生してしまう。提案では、送信側ノードが AP モードを起動し、受信側ノードがその Wi-Fi に接続して通信を行うことで受信側ノードの電力消費量を削減する。実験では、AP モードを起動するノードと起動しないノードの消費電力量差を測定した。25[s] 間での積算消費電力測定結果では、4.76[W] の差があり、AP モードを起動するノードは起動しないノードと比較して約 1.80 倍高くなった。

## 1. はじめに

### 背景

現代社会において、マルチホップネットワークは広範な領域で利用されている。その手法の一つとして無線センサーネットワーク (Wireless Sensor Network: WSN) がある。センサーノードは、計算資源の制限、通信範囲、帯域幅、エネルギー量などのリソース制約を考慮して設計されている。WSN は、環境監視、医療、産業、農業の分野でデータ収集や通信を行うために使用される技術である。農業分野では正確な環境データの収集や農作物の適切な管理が重要である。WSN を活用することで、土壌温度、気温、光量の情報をリアルタイムでモニタリングし、農作物の成長状況や病害虫の発生予測に役立てることが可能である [1]。また、農地の広範な範囲でセンサーノードを配置することにより、効率的な水やりや施肥の管理、異常検知などを行うことができる [2]。

マルチホップネットワークではセンサーノードのサイズの小型化に伴い、バッテリーのサイズも制限されるため、低消費電力での動作が求められる。[3]。また、実際に使用される場面の全てにおいて、バッテリーの交換・充電が容

易であるとは限らない。例えば、広大な面積の農地では安定した電力供給が困難であるため、バッテリーによる長時間の駆動が求められる [4,5]。

マルチホップネットワークを構成するデバイスには、センサーデータを物理的に離れた位置にあるサーバーまで送信するためにアクセスポイント (Access Point: AP) モードを起動し、データの中継を担うデバイスがある。1つのクラスターヘッド (Cluster Head: CH) に対して複数のクラスターメンバー (Cluster Member: CM) が接続する集合をクラスターと呼ぶ。通常、クラスター化されたネットワークではクラスターヘッドが AP モード起動の役割を担う。AP モードを起動するデバイスの消費電力量は AP モード停止時と比較して大きくなり、デバイスの動作可能時間は減少する。ネットワークの寿命はネットワーク内で最も動作時間の短いノードの寿命と等しいと言える [6]。

### 課題

課題として、AP モードを起動するノードの消費電力は起動しないノードよりも高くなる。マルチホップネットワークにおいて、クラスターヘッドのバッテリー残量が無くなり停止すると、データの中継を行うノードが無くなるため、クラスターメンバーのバッテリーが十分に残っていたとしてもセンシングデータをサーバーに送ることができない。

通常、クラスター化されたネットワークではクラスター

<sup>1</sup> 東京工科大学コンピュータサイエンス学部  
〒192-0982 東京都八王子市片倉町 1404-1

<sup>2</sup> 東京工科大学大学院バイオ・情報メディア研究科コンピュータサイエンス専攻  
〒192-0982 東京都八王子市片倉町 1404-1

ヘッドがセンサーデータの収集を行い、クラスターメンバーはクラスターヘッドにデータを送信する。しかし、クラスターヘッドが停止すると、クラスターメンバーのデータ送信が妨げられる。このような状況下で孤立ノードと呼ばれるノードが発生する [7]。図 1 は孤立ノードが発生している例である。この例では CM2-1, CM2-2 が孤立ノードとなっている。

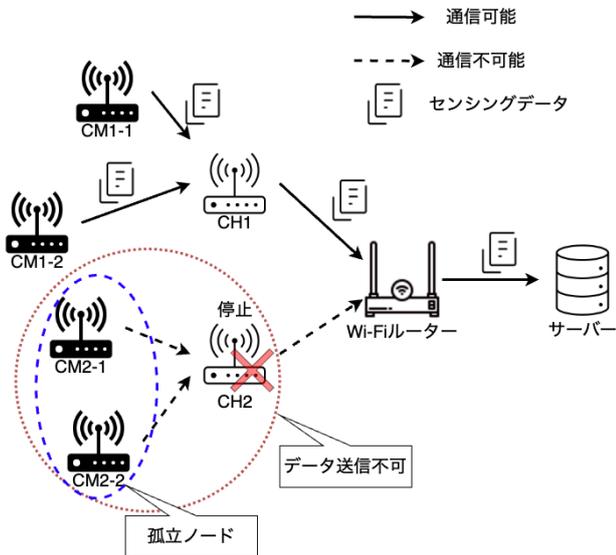


図 1 孤立ノードが発生している例

図 1 では、クラスターヘッド 1 台につきクラスターメンバー 2 台が接続している。また、それぞれのクラスターヘッドは Wi-Fi ルーターに接続し、サーバーへセンシングデータを送信している。CH2 はバッテリー残量が無くなって停止している。CH2 と通信を行う CM2-1, CM2-2 はセンシングデータの送り先が無くなるため、孤立ノードとなっている。消費電力の負担がクラスターヘッドに集中し、クラスターメンバーより早く停止することで、孤立ノードとなったクラスターメンバーの残存バッテリーを有効活用できなくなる。

## 各章の概要

2 章では、本稿の関連研究について記述する。3 章では、本稿の提案方式について記述する。4 章では、行なった実装の内容について記述する。5 章では、行った実験と評価を記述する。6 章では、提案方式についての議論を記述する。7 章では、本稿のまとめを行う。

## 2. 関連研究

ノードの消費電力量を削減するクラスタリング手法として LEACH がある [8]。LEACH はクラスターヘッド選出にランダム性を持たせることで、各ノードの負担を分散させることができるが、以下の 2 つの問題がある [9]。

1. クラスターメンバーはセンシングデータをクラスター

ヘッドに送信するための TDMA (Time Division Multiple Access) スケジュールを持ち、順番に送信していくが、その間クラスターヘッドの AP モードは起動したままであるため、クラスターメンバーの数が増えるほど消費電力量は大きくなる。

2. LEACH のクラスターヘッド選出手法は、全てのノードがサーバーと通信可能であるということが前提になっている。したがって、IoT 機器および使用する通信規格の通信可能距離までしかデータを送信できない。

マルチホップネットワークにおいて伝送距離の最も短い経路を選択してデータの送信を行うことでノードの消費電力削減を行っている [10]。この手法で考慮されているのは経路選択までである。したがって、通信方法にさらに改善の余地があると考えられる。

シンクノードを複数配置、またはシンクの再配置によって伝送距離を短くし、センサーノードの消費電力削減を行っている。この手法は地理的、経済的制約の面で課題がある [11]。

## 3. 提案

### 提案方式

本提案では、送信側ノードが AP モードを起動することで受信側ノードの電力消費量を削減し、クラスターヘッドとクラスターメンバーのバッテリー残量差を縮めることを目的とする。提案手法の概要を図 2 に示す。図 3 に受信側ノード (CH) と送信側ノード (CM) の通信フローを示す。

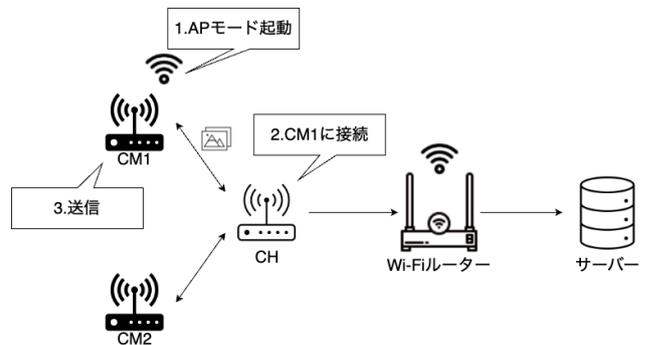


図 2 提案手法概要

ノード間でデータの送受信を行う際、送信側ノードが AP モードを起動し、受信側ノードがクライアントモードとなり、送信側ノードの Wi-Fi に接続する。送受信が完了すると、送信側ノードはスリープ状態に入り、受信側ノードは次の送信側ノードの Wi-Fi に接続してデータを受信する。全てのデバイスとの通信が本提案方式では、各ノードは以下の動作を行う。

- AP モード起動/停止
- 隣接 IoT デバイスとの接続/切断
- データの送受信

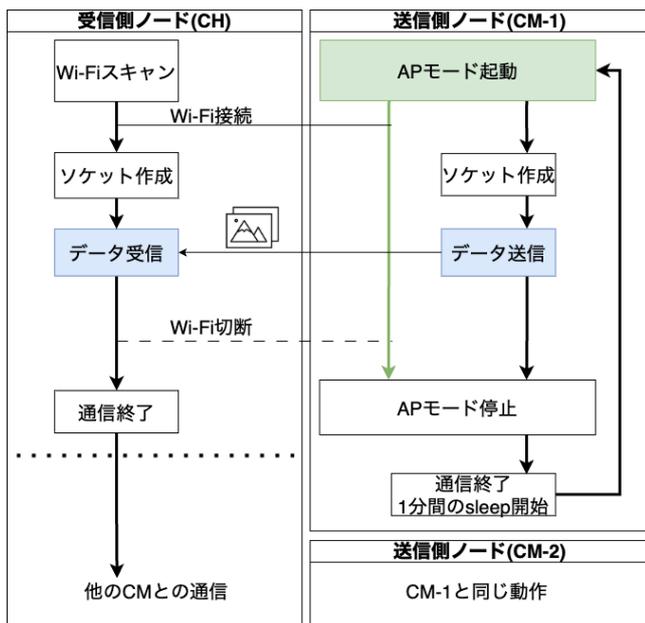


図 3 動作フロー

• sleep によるタイマーの起動

クラスターヘッドはクラスターメンバーからデータを受信した後、ルーターの Wi-Fi に接続し、HTTP リクエストを用いてサーバーにデータを送信する。ルーターには安定して電力を供給できるものとする。クラスターヘッドはルーターの Wi-Fi に接続できるため、AP モードの起動は行わない。

AP モード起動/停止

送信側ノードであるクラスターメンバーは AP モードを起動してクラスターヘッドの接続を待機する。接続先への送信が終了し次第 AP モードを停止する。

隣接 IoT デバイスとの接続/切断

クラスターヘッドはクラスターメンバーの Wi-Fi に接続する。クラスターヘッドは自身のクラスターに属するクラスターメンバーの SSID をあらかじめ保持しているものとする。クラスターヘッドは接続先 Wi-Fi が見つからない場合、10[s] でタイムアウトする。クラスターメンバーは、クラスターヘッドからの接続が無い場合、5[s] でタイムアウトする。

データの送受信

クラスターメンバーは、接続してきたクラスターヘッドに対してソケット通信を用いてデータを送信する。

クラスターヘッドは、自身のクラスターに属するクラスターメンバーからのデータを全て受信した後、HTTP リクエストを用いてサーバーに送信する。

sleep によるタイマーの起動

クラスターメンバーはクラスターヘッドとの通信が終了した後、sleep 状態に入る。

クラスターヘッドはサーバーとの通信を終了した後、sleep 状態に入る。

ユースケース・シナリオ

本稿の提案手法は農地の環境監視での使用を想定する。想定するユースケース・シナリオを図 4 に示す。

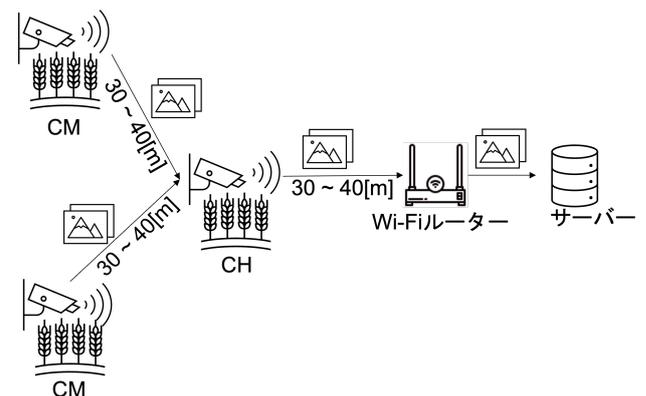


図 4 ユースケース

IoT デバイスでのセンシングの一例として、農地での環境監視がある [4,5]。主に気温データや水温データ、水量データ、監視画像を収集する。広範囲での数値データのみの通信では LPWA が最も消費電力が少ないが、帯域幅が狭いため、農作物の至近距離の画像や水路の水量などの監視画像データを送信するには時間がかかる。

一方、Wi-Fi を用いて画像データを送信すると通信時間は削減されるが、伝送距離が短く、30~40[m] 程度までしか送信することができない。したがって、マルチホップ通信を行う必要がある。本稿の提案手法によって、Wi-Fi を用いながら IoT デバイスの動作可能時間を延長することができる。

4. 実装

センシングデータ受信用のサーバーと実験用 IoT デバイスとして ESP32 を用いて実装を行なった。図 5 は ESP32 とサーバーの通信構成図である。

サーバーの OS として Ubuntu22.04、受信したデータを格納するデータベースとして MongoDB を用いている。ESP32 同士 (CH-CM) の通信にはソケット通信を用いている。

図 5 で用いられている要素について以下に示す。

AP モード

クラスターメンバーが行う、AP モードの起動と停止。

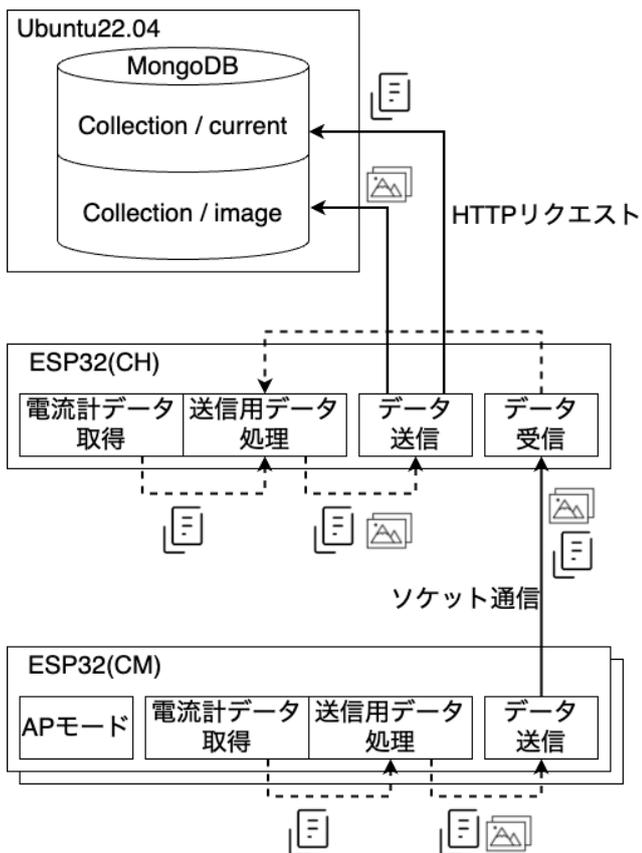


図 5 通信構成図

### 電流計データ取得

実験の評価を行うために電流計センサーの INA219 から電流データを取得する。

### 送信用データ処理

電流計センサーから取得した値、通信実験用画像データを送信するための下処理を行う。送信データは、95[KB]の画像である。画像データはバイナリデータに変換して送信する。また、データベースに格納するために体裁を整える。

### データ送信

クラスターメンバーがクラスターヘッドにデータを送信する場合、ソケット通信を行う。

クラスターヘッドがサーバーにデータを送信する場合、HTTP リクエストで送信する。

### データ受信

クラスターヘッドはソケット通信を用いてクラスターメンバーからデータを受信する。

## 5. 実験

### 実験環境

以下に基礎実験の結果を示す。

- AP モード起動時と停止時の消費電力計測

- 既存手法による通信での消費電力計測

基礎実験で使用した IoT デバイスは ESP32 である。消費電流計測で使用したセンサーは INA219 である。消費電流計測の間隔は 0.5[s] に 1 回としている。

AP モード起動時と停止時の消費電力の計測結果を図 6 に示す。

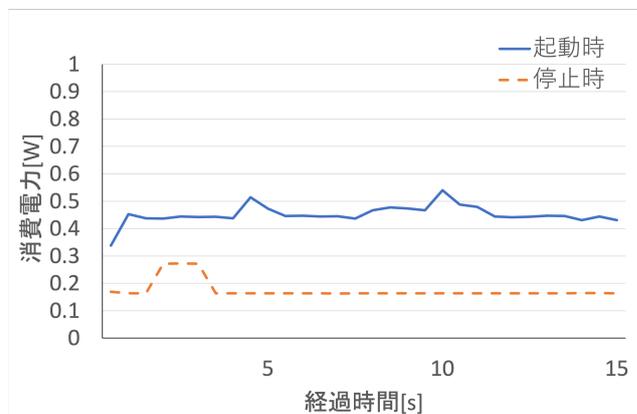


図 6 AP モード起動時と停止時の消費電力

消費電力計測開始から 15[s] 間において、AP モード起動時の平均消費電力は 0.46[W] であり、AP モード停止時の平均消費電力は 0.17[W] であった。これより、AP モード停止時と比較して AP モード起動時の消費電力は約 2.7 倍高いことがわかる。

受信側デバイスが AP モードを ON にした場合と、送信側デバイスが AP モードを ON にして通信を行った場合とを比較し、消費電力の上昇を確認するために ESP32 を 2 台用いて実験を行った。実験における機器の構成について図 7 に示す。評価実験の消費電流計測のために電流計センサーの INA219 を 2 台の ESP32 それぞれに搭載した。本稿では、受信側デバイス (CH) が Wi-Fi AP モードを起動し、送信側デバイス (CM) が CH に接続してデータの送受信を行うことを既存手法とする。基礎実験として、受信側デバイスが AP モードを ON にして通信を行う。実験は以下のステップで行う。

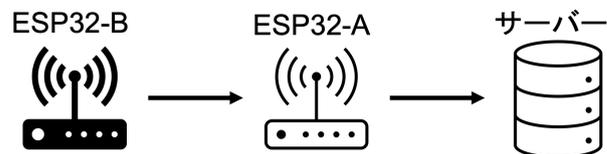


図 7 基礎実験機器構成

- 1) 受信側デバイス (ESP32-A) が AP モードを起動
- 2) 送信側デバイス (ESP32-B) が ESP32-A の Wi-Fi に接続
- 3) ソケット通信を用いて ESP32-B から ESP32-A にデータを送信

- 4) ESP32-A は研究室 Wi-Fi に接続し、データをサーバーに送信
- 5) 1)~4) を 1[*min*] 毎に繰り返す

## 実験結果と分析

実験の結果から電流計測 25[s] 間を抜粋したものを図 8 に示す。縦軸は電力の大きさ [W] を表し、横軸は電流計測時間 [s] を表している。AP モードを起動する ESP32-A は AP モードを起動しない ESP32-B より高い位置で推移している。

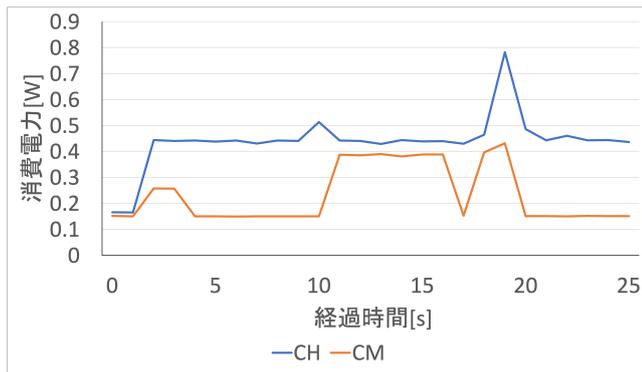


図 8 既存手法による通信時の消費電流推移グラフ

図 9 は消費電流計測 25[s] 間の積算電力のグラフである。ESP32-A、ESP32-B の 25[s] 間の積算消費電力を比較すると、ESP32-A は 10.67[W]、ESP32-B は 5.91[W] であった。既存手法による通信では、受信側デバイスの消費電力は送信側デバイスと比較して 1.80 倍となった。この結果から、AP モードを起動するデバイスは起動しないデバイスに比べて早くバッテリーを消費してしまうことがわかる。

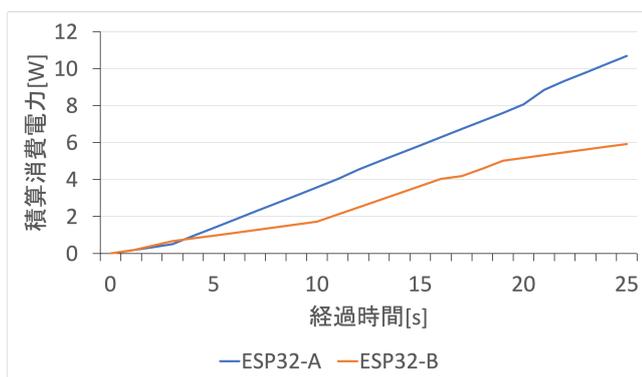


図 9 既存手法による通信時の積算消費電力グラフ

## 6. 議論

本提案では通信タイミングや送信データサイズが固定となっている。実際のユースケースに近づけるために、動的なスケジューリングや、送信回によって送信データサイズを変更し、さらに消費電力の削減を可能にすることを検討

する。動的なスケジューリングの具体的な例としては、夜間では撮影画像の画質が低下するため、夜間の送信回数を半減させる。また、1つのクラスター当たりの機器の台数も増やして実験を行う必要がある。

## 7. おわりに

本稿では、AP モードをクラスターヘッドではなくクラスターメンバーが起動することでクラスターヘッドの AP モード起動による消費電力量を削減する手法を提案した。課題はクラスターヘッドがクラスターメンバーよりも早くバッテリーが無くなり、クラスターメンバーのセンシングデータをサーバーに送ることができなくなることとした。基礎実験では、ESP32 を 2 台用いて簡易的な通信を行い、AP モードを起動する機器の消費電力が高くなることを確認した。実際に通信を行うと、AP モードを起動するデバイスの積算消費電力は起動しないデバイスに比べ、1.80 倍高くなることがわかった。

## 参考文献

- [1] Thiagarajan, N. and Shanmugasundaram, N.: An Investigation on Energy Consumption in Wireless Sensor Network, *2022 8th International Conference on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS)*, Vol. 1, pp. 1359–1364 (online), DOI: 10.1109/ICACCS54159.2022.9785046 (2022).
- [2] Kassim, M. R. M. and Harun, A. N.: Applications of WSN in agricultural environment monitoring systems, *2016 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*, pp. 344–349 (online), DOI: 10.1109/ICTC.2016.7763493 (2016).
- [3] Abderrahim, M., Hakim, H., Boujemaa, H. and al Hamad, R.: Multihop Transmission Strategy to Improve Energy Efficiency in WSNs, *2018 32nd International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops (WAINA)*, pp. 136–140 (online), DOI: 10.1109/WAINA.2018.00076 (2018).
- [4] Lindsey, S. and Raghavendra, C.: PEGASIS: Power-efficient gathering in sensor information systems, *Proceedings, IEEE Aerospace Conference*, Vol. 3, pp. 3–3 (online), DOI: 10.1109/AERO.2002.1035242 (2002).
- [5] Haneef, M., Wenxun, Z. and Deng, Z.: MG-LEACH: Multi group based LEACH an energy efficient routing algorithm for Wireless Sensor Network, *2012 14th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT)*, pp. 179–183 (2012).
- [6] oko Banur, Jakšić, B., Banur, M. and Jović, S.: An analysis of energy efficiency in Wireless Sensor Networks (WSNs) applied in smart agriculture, *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 156, pp. 500–507 (online), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.12.016> (2019).
- [7] Leu, J.-S., Chiang, T.-H., Yu, M.-C. and Su, K.-W.: Energy Efficient Clustering Scheme for Prolonging the Lifetime of Wireless Sensor Network With Isolated Nodes, *IEEE Communications Letters*, Vol. 19, No. 2, pp. 259–262 (online), DOI: 10.1109/LCOMM.2014.2379715 (2015).

- [8] Shih, E., Cho, S.-H., Ickes, N., Min, R., Sinha, A., Wang, A. and Chandrakasan, A.: Physical Layer Driven Protocol and Algorithm Design for Energy-Efficient Wireless Sensor Networks, *Proceedings of the 7th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, MobiCom '01, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 272–287 (online), DOI: 10.1145/381677.381703 (2001).
- [9] Song, L., Song, Q., Ye, J. and Chen, Y.: A Hierarchical Topology Control Algorithm for WSN, Considering Node Residual Energy and Lightening Cluster Head Burden Based on Affinity Propagation, *Sensors*, Vol. 19, No. 13 (online), DOI: 10.3390/s19132925 (2019).
- [10] Shah, I. K., Maity, T., Dohare, Y. S., Tyagi, D., Rathore, D. and Yadav, D. S.: ICIC: A Dual Mode Intra-Cluster and Inter-Cluster Energy Minimization Approach for Multihop WSN, *IEEE Access*, Vol. 10, pp. 70581–70594 (online), DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3188684 (2022).
- [11] Vincze, Z., Vida, R. and Vidacs, A.: Deploying Multiple Sinks in Multi-hop Wireless Sensor Networks, *IEEE International Conference on Pervasive Services*, pp. 55–63 (online), DOI: 10.1109/PERSER.2007.4283889 (2007).