

省電力 AP を用いたクラスタ分割型 無線 LAN メッシュネットワークの提案

松田 祐輝¹ 阪田 史郎¹ 小室 信喜¹

概要 : IEEE802.11 に準拠した無線 LAN のアクセスポイント (AP) の省電力化を目的とした Radio-On-Demand Networks (ROD) が提案されている。しかし, 無線 LAN メッシュネットワークのように複数の ROD AP によりネットワークが構築されている場合, それぞれの AP が非同期に間欠動作することが考えられる。この場合, 経路の維持や構築のために起動する AP が増加することで, 消費電力が増大し, 遅延が増大するという課題がある。本稿では, 無線 LAN メッシュネットワークにおいて, クラスタリングと AP の制御によりデータを送受信するときの消費電力と遅延を削減する方式を提案する。シミュレーション評価により, 低消費電力かつ低遅延で通信が可能であることを示す。

Clustering Scheme for Wireless LAN Mesh Network using Power Saving Access Point

YUKI MATSUDA¹ SHIRO SAKATA¹ NOBUYOSHI KOMURO¹

1. はじめに

近年, パソコンやスマートフォンのような情報端末に無線 LAN による通信機能が搭載され, 利用者はアクセスポイント (以下, AP) を用いてオフィス, 工場といった広い屋内において複数の AP を経由して通信を行うことが検討されている。無線 LAN メッシュネットワークはこのような環境でネットワークを設置する方法として存在している。しかし, AP には消費電力低減手段は規定されておらず, 常に通信可能状態をとるため, 無線通信端末の有無, および, 通信端末が存在する場合での通信の有無によらず電力を消費し, 電力の「無駄遣い」といえる状況となっている。

この状況を改善するために, AP の省電力化技術として Radio-On-Demand Networks (ROD) が提案されている [1],[2]。ROD では, 消費電力が極めて小さく, 外部から起動信号を受信できるスリープ状態をもつ AP を用いる。以下, 本稿ではこのようなオンデマンドに起動できる AP を対象とする。各 AP は, トラフィックを常に監視し, 適切なタイミングでスリープ状態に移行し, 他の AP からの

起動信号を受信すると起動状態へ復帰する。スリープ状態への移行頻度を多くすると消費電力を削減できるというメリットの一方で, 起動状態への復帰に時間がかかるため, 端末における通信開始時の待ち時間が大きくなるというデメリットがある。特にオフィス, 大学などの環境においては, 平日, 昼間のような通信が多く行われる時間帯に比べて夜間, 休日は AP の利用頻度が少ない。このため, 多くの AP がスリープ状態へ移行する。このような通信閑散時に, 異なる AP に帰属する端末へのデータ通信要求が発生した場合, 送信先端末の帰属する AP を探索し, データ送受信のための経路を構築する必要がある。

ここで, 無線 LAN メッシュネットワークのように複数の AP によりネットワークが構築されている場合, それぞれの AP が非同期に間欠動作することが考えられる。この場合, 経路の構築のために余計な電力が消費される。例えば, データを通信したい端末を探索するためにはその都度全ての AP を起動しなければならず, 起動のために多くの電力を必要とする。このような非同期に間欠動作する AP で構成されるネットワークを対象とした, 省電力を考慮した経路制御方式の検討例は少ない。AP が起動している時の電力と比較して, スリープしている AP を起動するため

¹ 千葉大学大学院 融合科学研究科

の電力は非常に大きいため、不必要な AP の起動を極力少なくすることが望ましい。

本稿では、端末や AP が自由に配置された環境において、通信半径に従ってクラスタリングを行う [3] ことで規則性を生み出す。また、クラスタリングによって構成された格子状の環境において、AP の役割分担を行い起動する AP の数を抑制する方式 [4] や、端末の帰属先を制御することによって宛先端末へ省電力かつ低遅延で通信を行う方式を提案し評価する。

2. 関連研究

AP を省電力化する手法として、マルチホップ環境でバッテリー駆動を想定した Power Saving Access Point (PSAP) が提案されている [5]。これは、IEEE802.11 に基づいた設計を行い、通信範囲内端末の基地局としての動作と上位 AP との接続端末としての動作を 2 つのチャンネルに分けて行う。加えて、PSAP を利用したプロトコルについても提案されている [6]。

また、起動信号を利用して AP をオンデマンド的に利用する検討がなされている [1],[7]。しかし、無線 LAN ネットワークのように複数の AP によりネットワークが構築されている場合、それぞれの AP が非同期に間欠動作することが考えられる。この場合、経路の維持や構築のために余計な電力が消費される。例えば、データを通信したい端末を探索するためにはその都度全ての AP を起動しなければならない、起動のために多くの電力を必要とする。このような非同期に間欠動作する AP で構成されるネットワークを対象として、省電力を考慮した経路制御方式の検討例は少ない。

このような環境では、消費電力を削減するために、経路情報として AP の状態を交換するための電力やデータ通信要求時に宛先端末の探索電力、データ通信を行う際にかかる電力を抑制する必要がある。この問題を解決するために AP を、経路情報を共有する主 AP と、経路情報を共有せず主 AP に帰属する副 AP の 2 つに分けることによって低消費電力・低遅延で宛先端末を探索し、データ通信を行う方式を提案した [3]。しかし、課題として、同時に複数の通信が行われることを想定していない点、端末の帰属を考慮していない点が挙げられる。本稿ではより一般性を考慮した低消費電力・低遅延通信制御方式を提案し、シミュレーションによる評価を行う。

3. 提案方式

3.1 クラスタリング

本稿の提案におけるクラスタリング手法として [4] のクラスタリングを利用する。このクラスタリングにおけるクラスタの形状は正方形であり、クラスタ間で通信を行えることが必要であるため、AP の通信半径を $R[m]$ とすると、

クラスタのサイズは $0.4R \times 0.4R$ と決定される。

個々のクラスタにはクラスタ ID を割り当てる。なお、[4] の提案におけるクラスタ ID は、AP に GPS を内蔵させることで位置情報を用いて算出しているが、本稿の提案においてはクラスタ分割を行った後、各クラスタ内の端末・AP に静的にクラスタ ID を設定し、端末は同一クラスタ ID の AP に帰属する。また、今回はクラスタ内に AP が複数存在した場合、1 台を除き使用しないものとする。

3.2 AP の構成

提案方式における AP の物理的条件、システム条件、構成は [3] に基づき、変更したものを以下に述べる。まず、クラスタリングによって格子状に分割された全 AP を、ネットワーク全体の端末・AP の帰属情報を常に保持する主 AP と、保持しない副 AP の 2 種類に分ける。そして、主 AP は、副 AP の隣接クラスタに必ず 1 つ以上配置する。この条件を満たした上で、消費電力の大きい主 AP の数が最小になるよう各 AP を配置する。副 AP において端末の帰属先が変更された場合、副 AP は自身が帰属する主 AP へレポートをユニキャストし、それを受けた主 AP は隣接する主 AP へレポートをマルチキャストする。主 AP において端末の帰属先が変更された場合、主 AP は隣接する主 AP へレポートをマルチキャストする。

ここからは、具体的に AP が保持する各情報について述べる。各 AP はクラスタ ID とは別に個別の AP ID、端末 ID を保持しており、前述した条件に基づき、例えば 2×5 のクラスタに分割された場合、図 1 のように各 AP に主 AP、副 AP の役割を与える。ここでは、丸印で与えられた AP ID 3, 7, 9 が主 AP である。各 AP に役割を与えた後、副 AP は隣接クラスタの主 AP いずれか 1 つに帰属する。ここで、副 AP の帰属のパターンは複数存在するが、今回は予め静的に帰属先を決定しておくものとする。主 AP は、自身のクラスタ ID のほか、隣接する主 AP の AP ID、自身に帰属している副 AP の AP ID、自身に帰属している副 AP の端末と自身に帰属している端末のクラスタ ID、端末 ID を保持する。また、副 AP は自身のクラスタ ID のほか、自身が帰属する主 AP の AP ID、自身に帰属している端末のクラスタ ID、端末 ID のみを保持する。図 1 の構成における各 AP の保持するテーブルの例を表 1,2 に示す。

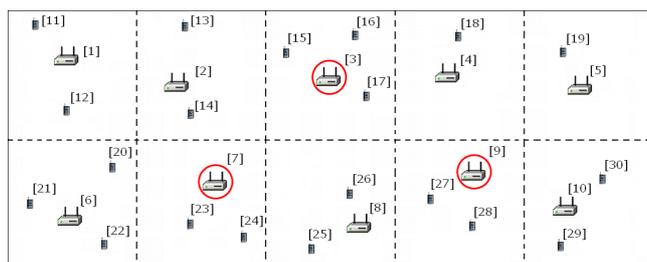


図 1 端末・AP の構成

表 1 主 AP の保持するテーブル (一部)

| 主 AP | 隣接主 AP | 帰属副 AP | 端末 (クラスタ ID, 端末 ID) |
|------|--------|--------|----------------------|
| 3 | 7,9 | 2,4,8 | (3,15),(3,16),(3,17) |
| 7 | 3 | 1,6 | (7,23)(7,24) |
| 9 | 3 | 5,10 | (9,27),(9,28) |

表 2 副 AP の保持するテーブル (一部)

| 副 AP | 帰属主 AP | 端末 (クラスタ ID, 端末 ID) |
|------|--------|----------------------|
| 2 | 3 | (2,13)(2,14) |
| 5 | 9 | (5,19) |
| 6 | 7 | (6,20),(6,21),(6,22) |

以下、提案方式における仮定、設定を列挙する。

- 1つのクラスタに AP は 1 台以上設置する
- AP はスリープ、起動中、アイドル、ビジーの 4 状態 (図 2)
- AP は主 AP、副 AP の 2 種類
- 主 AP は最小数になるよう配置
- 全副 AP の隣接クラスタに 1 つ以上主 AP がある
- 副 AP はいずれか一つの主 AP に帰属する
- AP はレポートを送信し、他 AP と情報を共有する
- 主 AP は自身の帰属副 AP と他主 AP の情報を保持

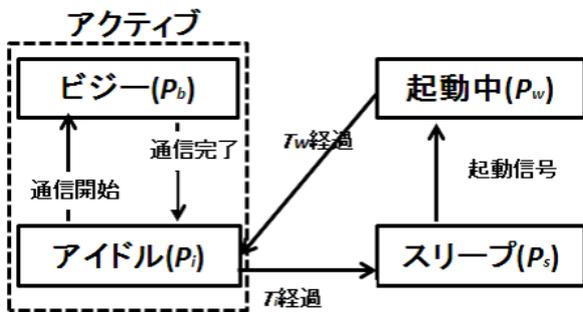


図 2 ROD AP の状態

3.3 端末の帰属先変更

各 AP に所属する端末から通信要求が発生した際、その端末が帰属している AP へ起動信号を送り起動する。起動された AP が副 AP ならば、その副 AP が帰属する主 AP へ起動信号を送り起動、そして主 AP は隣接する主 AP を次々に起動していく。その後、主 AP は他の AP に帰属する端末の情報を共有しているため、宛先端末を探索することで宛先端末が帰属している AP のみを起動することが可能となる。この過程によって AP の起動を最小限に抑えて宛先端末までの経路を確保する。

しかし、3.1 節のクラスタリングによってクラスタ内の端末は隣接クラスタへ到達することが可能となっている。このような環境の通信においては、ホップ数を抑えることが

望ましい。そこで、送信元となる端末が副 AP に帰属している場合、隣接する主 AP へ帰属先を変更し、通信を行う。

その後通信が終了し、他の通信要求も発生せずに主 AP がスリープへ遷移するとき、自身の保持するテーブルをチェックする。そこで帰属先が変更された端末、つまり自身のクラスタ ID と異なる端末を発見した場合、その端末のクラスタ ID と同じクラスタ ID の副 AP へ帰属先を戻す。この手順により、通信発生時に帰属先を変更することで、通信時におけるホップ数を削減し、更に主 AP のスリープ時に帰属先を戻すことで主 AP および帰属する端末の負荷を軽減させる。

4. シミュレーション評価

4.1 シミュレーション諸元

本方式による AP 全体の消費電力と通信における遅延を評価するため、QualNet 5.1 を用いてシミュレーションによる評価を行った。シミュレーション環境は図 1 のものを使用する。シミュレーション諸元は表 3 に示す。通信半径に基づきエリアが 10 個のクラスタに分割され、1 つのクラスタに 1 台の AP を配置した。端末はエリア内にランダムに設置され、移動しないものとした。CBR フローはそれぞれランダムに選択された端末から端末に対してシミュレーション時間 10[s]~540[s] の間でランダムに発生し、1 つのフローの長さは 1[s]~30[s] の間でランダムに決定されるものとした。そして、シミュレーション時間内の CBR フロー数を 10 から 50 まで 10 ずつ変化させ、それぞれに対して CBR の送信パターンを 10 パターン (合計 50 パターン) 用意し、シミュレーションを実施した。また、AP はある時間アイドル状態が継続するとスリープへ移行するが、今回は $T_i = 4.0[s]$ でスリープへ移行するものとする。クラスタリングされた環境において比較対象として以下の 4 つの方式を評価する。

- ROD なし
通常の AP を用いる。スリープ状態への遷移を行わず、ビジー・アイドルの 2 つの状態のみを持つ。
- AP 役割分担なし
ROD AP を用いる。主 AP・副 AP の役割分担を行わず、通信が発生した場合は全ての AP が起動され、経路が構築される。
- AP 役割分担あり 端末帰属変更なし
ROD AP を用いる。主 AP・副 AP の役割分担を行うが、送信開始・終了時に端末の帰属先の変更は行わない。
- 提案方式
ROD AP を用いる。主 AP・副 AP の役割分担を行い、送信開始・終了時には 3.3 節の方式に従って端末の帰属先を変更する。

表 3 シミュレーション諸元

| 項目 | 値 |
|------------------|---------------------|
| シミュレータ | QualNet 5.1 |
| シミュレーション時間 | 600[s] |
| エリアサイズ | 80[m] × 200[m] |
| 端末・AP 通信半径 | 100[m] |
| 通信方式 | IEEE802.11b (2Mbps) |
| ルーティングプロトコル | AODV |
| AP 台数 | 10[台] |
| STA 台数 | 20[台] |
| スリープ電力 (P_s) | 1.2[W] |
| アイドル電力 (P_i) | 7.0[W] |
| 起動中電力 (P_w) | 10.0[W] |
| ビジー電力 (P_b) | 8.0[W] |
| 起動時間 (T_w) | 0.01[s] |
| CBR フロー | 400[kbps] |
| クラスタサイズ | 40[m] × 40[m] |

4.2 シミュレーション結果

4.2.1 スリープ状態の割合

AP の役割分担を行う手法の動作確認として、各 AP のスリープ状態の割合を評価する。ここで、スリープ状態の割合は以下の式 (1) で定義する。

$$\text{スリープ状態の割合 [\%]} = \frac{\text{AP のスリープ時間}}{\text{シミュレーション時間}} \times 100 \quad (1)$$

各 AP のスリープ状態の割合を図 3 に示す。また、それぞれのフロー数における AP 全体のスリープ状態の割合を図 4 に示す。ここで、AP の役割分担を行う場合主 AP となる AP ID はそれぞれ 3,7,9 であり、その他の AP は副 AP である。

図 3 において、主 AP のスリープ状態の割合は AP の役割分担を行わない場合とほぼ同じと言えるが、副 AP に関しては AP の役割分担を行わない場合と比較して平均して約 30%スリープ状態の割合を増加させることを実現している。また、更に提案方式によって端末の帰属先を主 AP に変更することで副 AP のスリープ状態の割合を平均して約 8%増加させている。この結果から、AP の役割分担や帰属先の変更を行うことで通信に使用する AP の台数を減らし、多くの AP をスリープ状態へ遷移させていることが確認できる。

次に図 4 において、AP 全体のスリープ状態の割合はフロー数が増加すると減少することがわかるが、AP の役割分担を行わない場合のスリープ状態の割合は、フロー数が 10 の場合と比較してフロー数が 50 の場合では約 46%の大幅な減少が見られる。また、AP の役割分担を行った場合でも、端末の帰属変更を行わない場合には約 30%の減少が見られる。それに対して、提案方式によってフロー数が増えた場合でも減少を約 21%に抑えていることが確認できる。

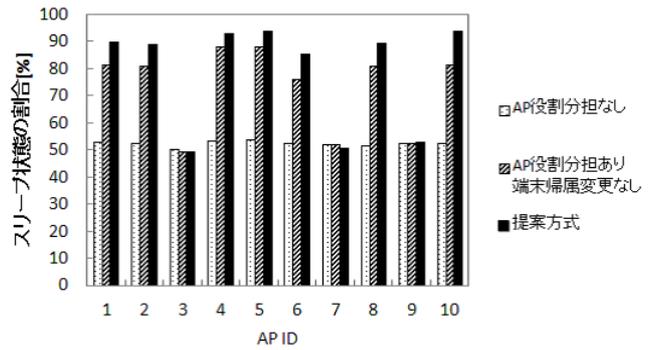


図 3 各 AP のスリープ状態の割合

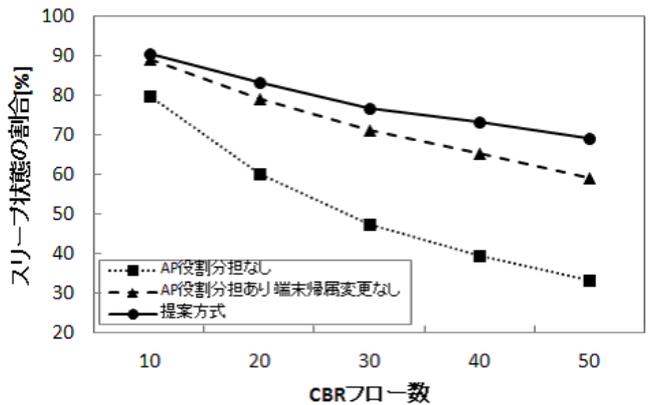


図 4 AP 全体のスリープ状態の割合

4.2.2 消費電力

AP 全体の消費電力の結果を図 5 に示す。また、ROD AP を使用しない場合と比較した消費電力削減率について図 6 に示す。消費電力削減率は以下の式 (2) で定義する。

$$\begin{aligned} \text{消費電力削減率 [\%]} \\ = \left(1 - \frac{\text{各方式の AP 平均消費電力}}{\text{「ROD なし」の AP 平均消費電力}} \right) \times 100 \end{aligned} \quad (2)$$

図 5 において、ROD AP を使用することで AP の役割分担を行わない場合でも約 47%と大幅な消費電力削減効果があることが示された。また、提案方式における消費電力削減率は約 68%と更に消費電力を削減できることがわかる。

図 6 において、フロー数が増加すると消費電力削減率は減少していくが、AP の役割分担を行わない場合の消費電力削減率は、フロー数が 10 の場合と比較してフロー数が 50 の場合では約 35%減少することがわかる。AP の役割分担を行った場合でも、端末の帰属変更を行わない場合には約 21%の減少が見られるが、提案方式では約 14%の減少に抑えている。これはスリープ状態の割合と直接関連しており、提案方式によって通信に使用する AP の台数を減らすことで各 AP のスリープ時間を増やし、消費電力を大きく削減することができたものと考えられる。また、提案方式によってフロー数が増えた場合でも高い消費電力削減率を維持することが可能であることが示された。

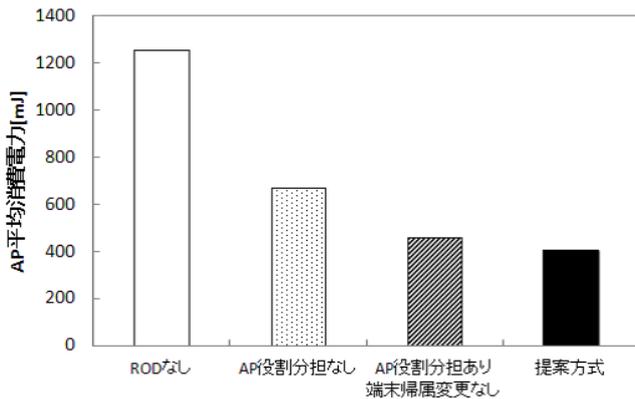


図 5 AP 平均消費電力

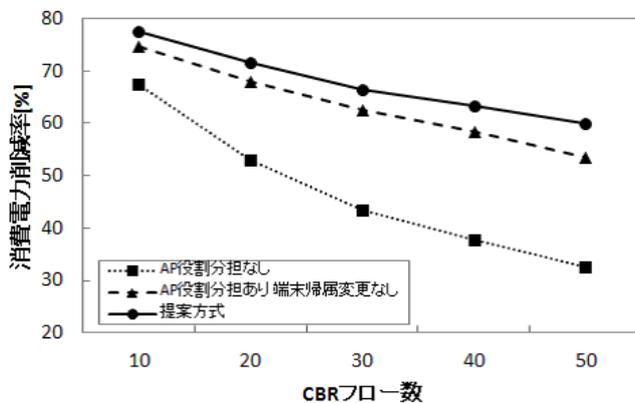


図 6 消費電力削減率

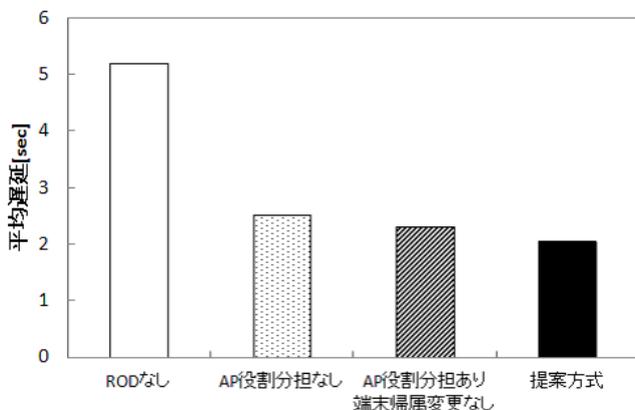


図 7 平均遅延

4.2.3 平均遅延

最後に、各フローにおける End-to-End 平均遅延の結果を図 7 に示す。ROD AP を使用しない場合と比較して、提案方式では平均遅延を約 40% 短縮している。これは使用する AP を削減することで衝突が減少したことやホップ数が減少したこと、経路構築による制御パケットの発生を抑制できたことが要因であると考えられる。提案方式によって AP の消費電力を削減し、更に遅延時間を短縮し効率的な通信を行うことが可能であることが示された。

5. おわりに

本稿では、無線 LAN メッシュネットワークにおいてクラスタリングを行うことで AP と端末の帰属関係を制御し、更に AP に 2 種類の役割を持たせることで起動 AP 数を抑え低消費電力、低遅延で通信を実現する方式の提案を行った。本提案方式の効果をシミュレーションにより比較評価した。その結果、提案方式によって、従来の AP 構成と比較して低消費電力、低遅延で宛先端末と通信することが可能であることを示した。

今後の展開としては、バッテリー稼働を想定し主 AP と副 AP の役割を変更することでネットワークのライフタイムを向上する手法や端末の送信半径に基づいて端末の帰属関係を制御する手法の検討を行う。また、今回の評価ではルーティングプロトコルとして標準の AODV を用いたが、性能向上のために AODV の設定の変更や他のルーティングプロトコルについても検討を行っていく。

参考文献

- [1] 伊藤哲也, 近藤良久, 阪田史郎, 池永全志, 四方博之, “無駄な消費電力量を削減する Radio-On-Demand Networks 概要,” 信学総大, Mar. 2011.
- [2] 四方博之, 伊藤哲也, 近藤良久, 阪田史郎, 池永全志, “無駄な消費電力量を削減する Radio-On-Demand Networks 技術課題,” 信学総大, Mar. 2011.
- [3] 松田祐輝, 阿部成美, 針生健, 小室信喜, 阪田史郎, 阿部憲一, 伊藤哲也, “ウェイクアップ機構を備えた無線 LAN メッシュネットワークにおける通信経路制御方式とその評価,” 信学 IN 研究会技報, Mar. 2012
- [4] 遠藤零始, 白石陽, 高橋修, “災害時を考慮したクラスタ分割型無線 LAN メッシュネットワークの提案と評価,” 信学 IN 研究会技報, Mar. 2011
- [5] F.Zhang, T.D.Todd, D.Zhao, V.Kezys, “Power Saving Access Points for IEEE 802.11 Wireless Network Infrastructure,” IEEE Transactions on Mobile Computing, Mar. 2004
- [6] Y.Li, T.D.Todd, D.Zhao, “Access Point Power Saving in Solar/Battery Powered IEEE 802.11 ESS Mesh Networks,” Quality of Service in Heterogeneous Wired/Wireless Networks, Aug. 2005
- [7] A.P.Jardosh, K.Papagiannaki, E.M.Belding, K.C.Almeroth, G.Iannaccone, B.Vinnakota, “Green WLANs: On-demand WLAN Infrastructures,” Mobile Networks and Applications, Dec. 2009