

セルラーネットワークにおける Affinity Propagation に基づく基地局動作 決定手法

高橋 一成[†] 安達 宏一[†]

[†] 電気通信大学 先端ワイヤレス・コミュニケーション研究センター
〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1
E-mail: †{k.takahashi, adachi}@awcc.uec.ac.jp

あらまし 無線通信ネットワークでは、ピーク時のモバイルトラフィックに対応できるネットワーク設計が必要である。モバイルトラフィックは時間とともに大きく変動する。また、基地局 (BS) のエネルギー消費は、ネットワーク全体のエネルギー消費量のうち大部分を占めることが知られている。近年、モバイルトラフィックの増加に対応するために、スモールセル基地局 (SBS) が高密度に配置されている。しかし、トラフィックのピーク時以外に全ての SBS をアクティブモードにすると、エネルギー効率が低下する。そのため、エネルギー効率を改善するために BS スリープが考慮されている。この論文では、Affinity Propagation に基づいた BS スリープ技術を提案する。AP は事前にクラスターの数を決定する必要がない。シミュレーション結果では提案手法がユーザ機器 (UE) を低アウトエージ率に抑え、さらに高スループットおよび低エネルギー消費量を達成できることを示す。

キーワード グリーンセルラーネットワーク, 高エネルギー利用効率, 基地局スリープ, クラスタリング, affinity propagation

Base Station Operation Based on Affinity Propagation in Cellular Networks

Kazunari TAKAHASHI[†] and Koichi ADACHI[†]

[†] The University of Electro-Communications, Advanced Wireless & Communication Research Center
1-5-1 Chofugaoka, Chofu, Tokyo, 182-8585 Japan
E-mail: †{k.takahashi, adachi}@awcc.uec.ac.jp

Abstract Wireless communication network requires a network design that can cope with peak mobile traffic. The mobile traffic fluctuates over time. It is known that the energy consumption of base stations (BSs) accounts for a large percentage of the overall network energy consumption. Recently, small cell base stations (SBSs) are deployed at high density to cope with the increasing amount of mobile traffic. However, activating all SBSs during non-peak hours of traffic leads to a decrease in energy efficiency. BS sleep strategy has been considered to improve energy efficiency. In this paper, affinity propagation (AP) based BS sleep technology is proposed. AP does not need to determine the number of clusters in advance. The computer simulation results show that user equipments (UEs) are kept at a low outage probability and further show high throughput and low energy consumption.

Key words green cellular networks, energy-efficient operation, base station sleep, clustering, affinity propagation

1. 導入

近年、通信機能を搭載した携帯電話やノートパソコンなどのモバイル機器の普及に伴い、ネットワーク上のモバイルデータトラフィックの量が急激に増加している。YouTube に代表されるマルチメディアリッチコンテンツは容量が大きいので、基地局 (Base Station: BS) からユーザ機器 (User Equipment: UE) への通信であるダウンリンク (Downlink: DL) トラフィッ

クの量には、大きな通信容量が必要となる。さらに、Facebook や Twitter などのソーシャルネットワーキングサービス (Social Networking Service: SNS) の爆発的な普及により、UE から BS への通信であるアップリンク (Uplink: UL) トラフィックの量も増加している。モバイルトラフィックの量は、時間の経過とともに大きく異なる [1]。

セルラーネットワークは、時間とともに変動するモバイルトラフィック量に対応できるように設計する必要がある。このた

め、明け方や深夜などのトラフィック量が他の時間帯と比較して少ない場合、各 BS では周波数とタイムスロットで構成される無線リソースの一部のみが使用される。例えば BS の電力増幅器 (Power Amplifier: PA) は、全ての周波数リソースブロック (Resource Block: RB) が使用される場合に最大送信電力で効率が最大化となるように設計されている。したがって、一部の周波数 RB のみを使用している場合には、送信電力が最大送信電力よりも小さくなり、PA の効率が低下してしまう。さらに、BS の動作には送信電力に依存しない固定電力が必要であるため、BS が 1 ビットを送信するために必要なエネルギー消費量として定義されるエネルギー利用効率 (Energy Efficiency: EE)^(注1) [J/bit] は、ピーク時よりも低くなってしまふ。

モバイルトラフィックが少ない時間帯にも、ピーク時と同じように BS が動作すると、ネットワーク全体のエネルギー利用効率が大幅に低下する。このため、非ピーク時のネットワーク全体のエネルギー利用効率を改善するために多くの研究が行われている。BS はネットワーク全体のエネルギー消費の約 60 % を消費する [2]。このため、モバイルトラフィックのピーク時以外は、稼働率の低い BS を低消費電力モード (スリープモード) にしてネットワーク全体のエネルギー消費を削減する BS スリープ技術が近年注目されている [3]。

この技術に関連する先行研究がいくつか存在する [3] [4]。文献 [3] では、マクロ BS (Macro BS: MBS) とスモールセル BS (Small BS: SBS) が共存するヘテロジニアスネットワーク (Heterogeneous Network: HetNet) 向けの SBS スリープ手法が提案されている。各 SBS をランダムにスリープさせるランダムスリープ方法と、トラフィックの負荷に応じてスリープする戦略的スリープ方法の 2 つが研究されている。計算機シミュレーションにより、ランダムスリープ法を用いることで、ネットワークの EE を約 30 % 向上できることが示されている。さらに、戦略的スリープ法を用いることで、複雑度が高くなるものの、ランダムスリープ法よりさらに約 15 % 改善出来ることが示されている。文献 [4] 文献では、教師なし機械学習の一種である Affinity Propagation (AP) [5] を用いて基地局をクラスタリングするスリープ法が提案されている。これは、「BS がアクティブモードかスリープモードか」と「どの UE がどの BS に接続すべきか」の組み合わせで構成される最適化問題として定式化されている。BS と UE の間のチャンネルをベースに BS クラスタリングが実行される。シミュレーションの結果、従来手法に比べて BS のエネルギー消費が 50 % 以上削減されることが明らかにされている。

[4] では、各 BS がアクティブかスリープかどうかに関係なく、AP の実行後に BS の状態が決定される。この時点で、BS の状態は次の AP 実行まで一定のままとなる。しかし、トラフィック量は時間とともに変動するため、トラフィック量が増

加すると、1 つの BS の負荷が増加する、もしくはカバレッジホール内の UE のスループットが低下する問題が考えられる。

そこで本研究では、次の AP の実行までどの BS をアクティブモードにするかを逐次的に決定することにより、ネットワーク内の通信品質を向上させる BS アクティベーション戦略を提案する。これにより、AP の実行後に変動するトラフィックに柔軟に対応することが可能となる。計算機シミュレーションにより、提案手法が UE を低アウトエージ率に抑え、さらに高スループットおよび低エネルギー消費量を達成できることを示す。

本稿の構成は以下のようになっている。第 2 節では、今回検討したシステム構成、無線伝播モデルおよびパフォーマンスメトリックについて述べる。第 3 節でははじめに AP の概要を説明し、次に戦略的 BS の動作を決定する方法を説明する。そして、第 4 節でシミュレーション結果を示し、最後に第 5 節で結論を述べる。

2. システムモデル

2.1 システムアーキテクチャ

BS と UE がそれぞれ強度 λ_{BS} [/km²] および λ_{UE} [/km²] を持つポアソン点過程 (Poisson Point Process: PPP) に従ってシミュレーションエリアに分布しているセルラーネットワークを考える。UE は BS からパイロット信号を受信し、その受信信号強度 (Receive Signal Strength: RSS) を BS にフィードバックするものとする。AP に基づいて BS のクラスタリングが実行されると、クラスタ中心 (Exemplar) として選択された BS (詳細は第 3 章で説明) は引き続きアクティブモードになり、他の BS はスリープモードに遷移する。各 UE は強度 λ_{pkt} [packet/s] のパケット生成率となるポアソン分布に従うパケットを生成し、UL 通信を行う。複数の UE が同一の BS に接続する場合、接続された UE の数を各送信フレーム毎に計算し、均一の直交帯域幅が各 UE に割り当てられる。

2.2 UE の接続先 BS

各 UE はチャンネル利得が最も高いかつアクティブモードである BS に接続されるものとする。アクティブ BS の集合とスリープ BS の集合をそれぞれ $\mathcal{J}_{\text{active}}$, $\mathcal{J}_{\text{sleep}}$, すなわち $\mathcal{J}_{\text{active}} \cup \mathcal{J}_{\text{sleep}} = \mathcal{J}$ と $\mathcal{J}_{\text{active}} \cap \mathcal{J}_{\text{sleep}} = \emptyset$, とする。UE i は次式で表される BS j_i^* に接続する。

$$j_i^* = \arg \max_{j \in \mathcal{J}_{\text{active}}} \gamma_{j,i} \quad (1)$$

ここで、 $\gamma_{j,i}$ は BS j と UE i のチャンネル利得である。ハンドオーバー (Handover: HO) が実行されない場合、UE は常に同じ BS に接続しパケットの送信を継続し、送信パケットは送信バッファに格納される。一方 HO が実行されている場合、UE がパケットを送信していても、近隣の BS がスリープモードからアクティブモードに遷移すると、UE は接続先 BS を切り替える。さらに、RSS が特定の RSS 閾値を超えない場合、UE はアウトエージとなる [8]。

2.3 無線伝播モデル

UE と BS の間のチャンネルには、距離依存のパス損失 [9] および空間相関を持つシャドウイング損失 [10] を考慮した。UE i

(注1): これ以外にも、1 ジュール当たりのデータ量を表す [bit/J]、ヘテロジニアスネットワークにおけるエネルギー消費利得を表す [$E_{\text{largecell}} / E_{\text{smallcell}}$]、欧州電気通信標準化機構 (European Telecommunications Standards Institute: ETSI) が定める性能指標 PI (郊外と都心で異なるパラメータを用いて評価) などがある。

における BS j の RSS $P_{j,i}$ は、次式で表される。

$$P_{j,i} = P_{\text{tx}} D_{j,i} \psi \quad (2)$$

ここで、 P_{tx} は BS の送信電力、 $D_{j,i}$ は BS j から UE i へのパス損失、 ψ は空間相関を持つシャドウイング損失である。

2.4 UE のスループット

UE i の周波数利用効率 C_i はシャノンの通信路容量定理より以下で表される。

$$C_i = \min\{\log_2(1 + \text{SINR}_i), R_{\text{max}}\} \quad (3)$$

ここで、 R_{max} はシステムの最大周波数利用効率である。信号電力対干渉雑音電力比 (Signal-to-Interference plus Noise power Ratio: SINR) SINR_i は以下で与えられる。

$$\text{SINR}_i = \frac{P_{\text{Hz}} \gamma_{j_i^*, i}}{\frac{1}{N_{j_i^*}} \sum_{i' \in \mathcal{I} \setminus \mathcal{N}_{j_i^*}} \alpha_{i'} P_{\text{Hz}} \gamma_{j_i^*, i'} + \sigma^2} \quad (4)$$

ここで、 α_i は UE i の状態を表す指示変数で、パケットを保持していれば 1、保持していなければ 0 となる。また、 P_{Hz} は UE の電力スペクトル密度、 j_i^* は UE i の接続先 BS のインデックス、 $N_{j_i^*}$ は BS j_i^* に接続している UE の総数、 σ は熱雑音の電力スペクトル密度である。

2.5 エネルギー利用効率モデル

2.5.1 BS

各 BS は UE からの UL 通信において電力を消費する。これらは UE と通信中 RF チェーンにより消費する電力 $P_{\text{BS},c}$ 、ベースバンド処理やバッテリーバックアップ、冷却機能などの通信の有無に関わらず消費する電力 $P_{\text{BS},0}$ を含む [12]。したがって、BS の受信時における 1 フレームあたりのエネルギー消費量 $E_{\text{BS},j}$ は以下の式 (5) で表される。

$$E_{\text{BS},j} = T_f (\beta_j M P_{\text{BS},c} + P_{\text{BS},0}) \quad (5)$$

ここで T_f はフレーム長、 β_j は BS j の状態を表す指示変数で、アクティブモードであれば 1、スリープモードであれば 0 となる。また、 M は BS のアンテナ数である。本研究では UL 通信のみを想定しているため、BS の送信電力は考慮しない。

2.5.2 UE

各 UE は BS に UL 通信を行い電力を消費する。これらには UE が使用する帯域幅に依存して消費する電力 $P_{\text{UE},\text{RF}}$ と依存せずに固定で消費する電力 $P_{\text{UE},\text{const}}$ が存在する [11]。さらに今回はチャネルの状態が悪く、UE が BS に接続できない場合、UE は待機電力 P_{wait} を消費すると仮定する。以上を踏まえると、UE i が 1 パケットを送信し終えるのに必要な総エネルギー消費量 $E_{\text{UE},i}$ は次式で表される。

$$E_{\text{UE},i} = T_{\text{wait}} P_{\text{wait}} + T_f \left(\sum_{q=0}^{Q_i-1} \left(P_{\text{UE},\text{const}} + \underbrace{\frac{1}{N_{j_i^*}} P_{\text{UE}}}_{P_{\text{UE},\text{RF}}} \right) \right) \quad (6)$$

ここで、 T_{wait} は待機時間、 P_{wait} は待機電力であり、 $P_{\text{wait}} = \eta P_c$ と表される。ただし、 $0 < \eta \leq 1$ である。また、 Q_i は UE i が 1 パケットを送信するのに必要なフレーム長、 P_{UE} は UE の送信電力である。

3. 責任度行列を用いた戦略的な BS の動作決定

この節では、本稿の提案手法である AP によるクラスタリングの際に用いた責任度を再度用いることで、どの BS をアクティブモードにさせるかの戦略的な手法を提案する。はじめに AP について説明し、その後 AP の計算で用いられる値の詳細について説明する。最後に BS の動作決定のアルゴリズムを提案する。

3.1 Affinity Propagation [5]

クラスタリングは、ノードの集合を強い相互接続または相互依存関係を持つようなノードの複数の部分集合に分割する教師なし学習の一種である。クラスタリング手法の 1 つとして k -means [6] が挙げられる。 k -means は計算が簡単であるが、クラスタリングの結果がクラスタ中心の初期値に強く依存してしまう問題がある。この問題を解決するために、 k -means++ [7] が提案された。しかし、 k -means と k -means++ では事前にクラスタ数を決定しておく必要がある。AP はこれらの問題を全て解決したクラスタリング手法である。全てのノードがクラスタ中心 (Exemplar) の候補となり得り、クラスタは前もってクラスタ数を決定することなく自動的に生成される。AP では、各ノード間の類似度 (Similarity) と呼ばれるメトリックを最大化するために、メッセージと呼ばれる値を各ノード間で交換する。この値はクラスタ中心が決定されるまで交換され続ける。全てのノードに対して類似度が決定されるため、全ノード数を Q とすると各ノード間の類似度を要素に持つ類似度行列 \mathbf{S} を次式のように定義することができる。

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} s(1,1) & \cdots & s(1,k) & \cdots & s(1,Q) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s(q,1) & \cdots & s(k,k) & \cdots & s(q,Q) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s(Q,1) & \cdots & s(Q,k) & \cdots & s(Q,Q) \end{bmatrix} \quad (7)$$

ここで、 $s(q,k)$ はノード q とノード k の類似度を表す。類似度行列 \mathbf{S} において、対角成分 $s(k,k)$ は優先値 (Preference) と呼ばれる。 $s(k,k)$ は非対角成分 $s(q,k)$ の最小値がしばしば用いられる。AP では各ノード間の類似度を最大化するために以下の 4 つの値が用いられる。

類似度 (Similarity)

ノード q とノード k がどれほど類似しているかを表す指標であり、 $s(q,k)$ と表記される。ここでノード q とノード k はノードの集合 Q の要素である。類似度は 2 つのノードが類似していれば高い値となり、非類似であれば低い値となる値であれば任意の指標を用いることが可能である。

責任度 (Responsibility)

ノード k がノード q のクラスタ中心としてどれほど適切かを

表す指標であり、 $r(q, k)$ と表記される。

可用性 (Availability)

ノード q がノード k のクラスタメンバーとしてどれほど適切かを表す指標であり、 $a(q, k)$ と表記される。

基準度 (Criterion)

責任度 $r(q, k)$ と 可用性 $a(q, k)$ の和の指標であり、 $c(q, k)$ と表記される。

責任度と可用性は基準度が収束するまで再帰的に計算される。ここでは、一般性を失うことなくノード q とノード k 間の値の i 番目の更新 ($i > 0$) を考える。責任度の更新値 $\tilde{r}(q, k)$ と 可用性の更新値 $\tilde{a}(q, k)$ は以下のように計算される。

$$\tilde{r}(q, k) = \begin{cases} s(q, k) - \max_{k' \in \mathcal{Q} \setminus k} \{a^{(i-1)}(q, k') + s(q, k')\} & (q \neq k) \\ s(q, k) - \max_{k' \in \mathcal{Q} \setminus k} \{s(q, k')\} & (q = k) \end{cases} \quad (8)$$

$$\tilde{a}(q, k) = \begin{cases} \min \left\{ 0, r^{(i)}(k, k) + \sum_{k' \in \mathcal{Q} \setminus k} \max \{0, r^{(i)}(q', k')\} \right\} & (q \neq k) \\ \sum_{k' \in \mathcal{Q} \setminus k} \max \{0, r^{(i)}(q', k')\} & (q = k) \end{cases} \quad (9)$$

ここで、可用性の初期値 $a^{(0)}(q, k)$ は 0 である。次に、この 2 つのメッセージの値が振動することを防ぐために、1 つ前の繰り返しにより得られた $r^{(i-1)}(q, k)$ と $a^{(i-1)}(q, k)$ を次式のように重み付け平均する。

$$r^{(i)}(q, k) = (1 - \lambda_{df})r^{(i-1)}(q, k) + \lambda_{df}\tilde{r}(q, k) \quad (10)$$

$$a^{(i)}(q, k) = (1 - \lambda_{df})a^{(i-1)}(q, k) + \lambda_{df}\tilde{a}(q, k) \quad (11)$$

ここで、 λ_{df} ($0 \leq \lambda_{df} \leq 1$) は減衰係数 (Damping Factor: DF) といい、多くの場合経験的に得られる。

最後に AP の収束条件について述べる。AP は所定の反復回数 I_{AP} に達するか以下の式を満たした場合に計算が終了する。

$$\max_{q, k \in \mathcal{Q}} \frac{|c^{(i)}(q, k) - c^{(i-1)}(q, k)|}{|c^{(i-1)}(q, k)|} \leq \epsilon \quad (12)$$

ここで、 $c^{(i)}(q, k) = r^{(i)}(q, k) + a^{(i)}(q, k)$ であり、 ϵ は正の小さな値である。AP の収束後、以下の式 (13) に従って、ノード q のクラスタ中心 k_q が決定される。

$$k_q = \arg \max_{k \in \mathcal{Q}} c^{(i)}(q, k) \quad (13)$$

3.2 戦略的な BS 動作決定手法

本論文では、BS から UE の RSS 値の相関係数を類似度の入力値として用いる。BS q と BS k の相関係数 $r_{q, k}$ は次式で表される。

$$r_{q, k} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (P_{q, j} - \bar{P}_q)(P_{k, j} - \bar{P}_k)}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (P_{q, j} - \bar{P}_q)^2} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (P_{k, j} - \bar{P}_k)^2}} \quad (14)$$

ここで、 n は BS q と BS k に接続可能な UE 数、 P_q は BS q に接続可能な UE から BS q にフィードバックされた RSS 値の

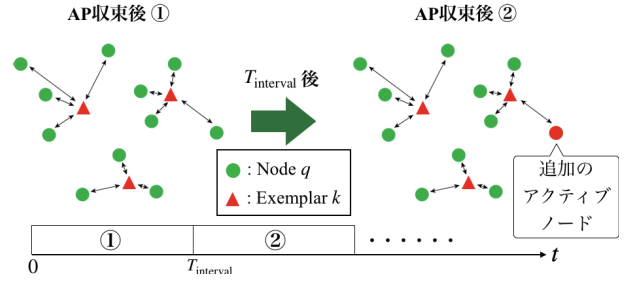


図 1 AP 収束後の BS の動作

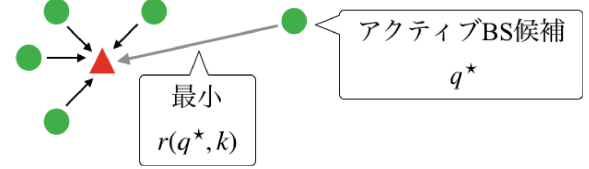


図 2 提案手法となる BS の戦略的な動作決定方法

Algorithm 1 BS $q \in \mathcal{Q}$ の動作決定のアルゴリズム

```

Set  $q = 1$ 
while  $q \leq |\mathcal{Q}|$  do
  if  $q \in \mathcal{Q}_{\text{sleep}}$  then
     $m(q) \leftarrow \arg \max_{k \in \mathcal{Q}_{\text{active}}} r^{(i)}(q, k)$ 
  end if
   $q \leftarrow q + 1$ 
end while
 $q^* = \arg \min_{q \in \mathcal{Q}_{\text{sleep}}} m(q)$ 
 $\mathcal{Q}_{\text{active}} \leftarrow \mathcal{Q}_{\text{active}} \cup q^*$ 
 $\mathcal{Q}_{\text{sleep}} \leftarrow \mathcal{Q}_{\text{sleep}} \setminus q^*$ 

```

平均値、 $P_{q, j}$ は BS q から UE j の RSS 値である。

類似度行列の計算はクラスタリング結果に影響を与えるため、全ての UE からの RSS 情報を使用すると、BS 間の類似度が類似してしまう。したがって本論文では、シミュレーション領域内の UE 数の ρ % を類似度行列の計算に使用している。

一度クラスタ中心が決定されると、クラスタ中心となった BS はアクティブモードとなる。したがって、クラスタ中心の BS は $\mathcal{Q}_{\text{active}}$ になり、他の BS は $\mathcal{Q}_{\text{sleep}}$ になる。そして図 1 に示すように、 T_{interval} 毎に 1 つの BS がアクティブモードに遷移する。どの BS を次のアクティブ BS にするかを決定するために、本論文では AP の計算で用いた責任度行列を用いることを提案する。責任度 $r(q, k)$ が小さいということは図 2 に示すように、ノード k がノード q のクラスタ中心として適切ではないということを示している。したがって、責任度が最小の BS をアクティブモードとして稼働させることにより、ネットワーク全体の BS を効率的に稼働させることが可能となる。これは、UE に広い通信範囲を提供できるだけでなく、計算結果を再利用することで計算量を削減することも可能である。その手順をアルゴリズム 1 に示す。

4. シミュレーション結果

シミュレーションパラメータを表 1 と表 2 に示す。表 1 のよ

表 1 システムパラメータ

BS の強度	$\lambda_{BS} = 3, 4$ [$/\text{km}^2$]
UE の強度	$\lambda_{UE} = 100$ [$/\text{km}^2$]
シミュレーション範囲	2×2 [km^2]
システム帯域幅	$W = 20$ [MHz]
送信パケットサイズ	$B_{REQ} = 1$ [MBytes]
システムの最大周波数利用効率	$R_{max} = 6$ [bps/Hz]
BS の最大送信電力	$P_{tx} = 30$ [dBm]
UE の最大送信電力	$P_{UE} = 23$ [dBm]
UE の固定電力	$P_{UE,const} = 5$ [dBm]
UE の待機電力係数	$\eta = 1$
BS のアンテナ数	$M = 1$
BS の RF チェーンに対応する回路の電力	$P_{BS,c} = 6.1$ [W]
BS の非送信時の電力	$P_{BS,0} = 2.6$ [W]
UE の最小受信感度 [8]	-93.3 [dBm]
熱雑音の電力スペクトル密度	$N_0 = -174$ [dBm/Hz]
フレーム長	$T_f = 10$ [ms]
UE のパケット生成の強度	$\lambda_{pkt} = 10$ [packet/s]
BS のモード遷移の間隔	$T_{interval} = 1000$ [frames]

表 2 AP パラメータ

減衰係数	$\lambda_{df} = 0.5$
最大の反復回数	$I_{AP} = 1000$
反復計算終了の閾値	$\epsilon = 10^{-3}$
Similarity の計算に使用される UE 数の割合	$\rho = [0.01, 1]$

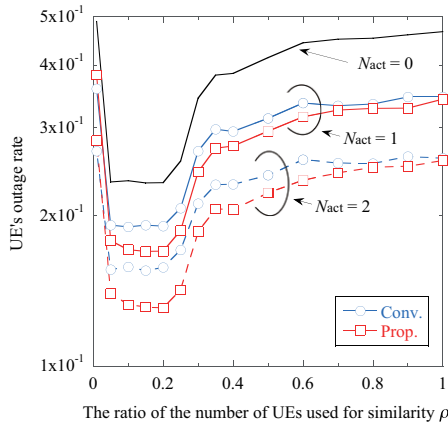


図 3 UE アウテージ率に対する ρ の影響 ($\lambda_{BS} = 4$)

うに、システムの帯域幅を 20 [MHz] とし、各 UE は 23 [dBm] の送信電力で UL 通信を通して 1 [MBytes] のパケットデータを送信する。さらに、各 UE のパケット生成率 λ_{pkt} を 10 [packet/s] とし、BS のモード遷移間隔 $T_{interval}$ を 1000 [frames] 毎とする。そして、AP の計算に使用する減衰係数 λ_{df} を 0.5 にし、AP における計算の最大反復回数 I_{AP} を 1000 回、AP 計算の終了条件となる閾値 ϵ を 10^{-3} とした。

図 3 は UE のアウテージ率における類似度の計算に用いる UE 数の割合 ρ の影響を示している。UE が -93.3 [dBm] 以上の RSS を持つ BS を見つけることが出来なかった場合、UE はアウテージとする。ここで、BS の強度 λ_{BS} は 4 [$/\text{km}^2$] に設定する。責任度行列を用いてスリープ状態の BS を順次アクティ

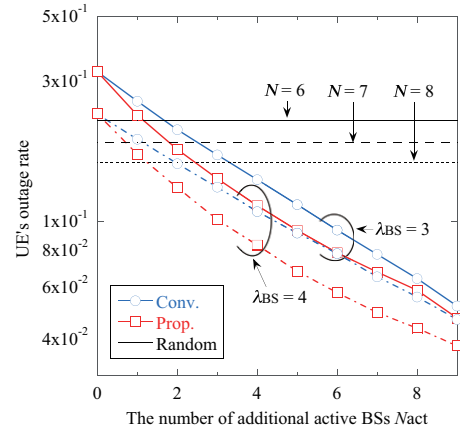


図 4 UE アウテージ率に対する N_{act} の影響

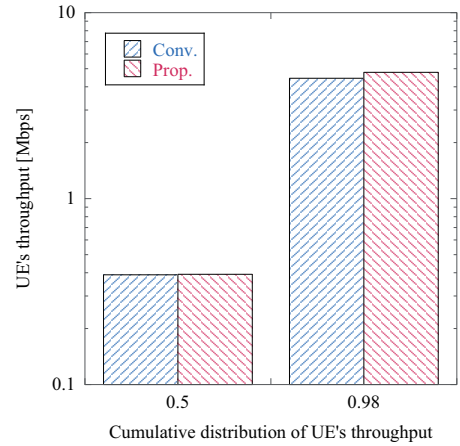


図 5 UE のスループットの CDF の 50 % 点と 98 % 点 ($\lambda_{BS} = 4$)

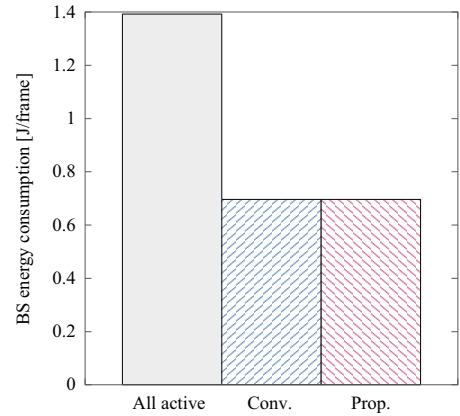


図 6 CDF の 50 % 点における BS のエネルギー消費量 ($\lambda_{BS} = 4$)

ブモードにする提案手法には、“Prop.”というラベルを付ける。また、参考のためにスリープ状態の BS をランダムにアクティブモードにする手法には、“Conv.”というラベルを付ける。このアウテージ率は AP 取束後、追加のアクティブ BS 数 N_{act} に達するまで計算される。“ $N_{act} = 0$ ”は AP 取束後にクラスタ中心になる BS のみがアクティブモードであることを意味する。図 3 より、アウテージ率は $\rho = 0.1 \sim 0.2$ 、すなわち UE の総数の 10%~20% に設定することで最小化できることが分かる。これは ρ を大きく設定すると、類似度の計算に使用されている

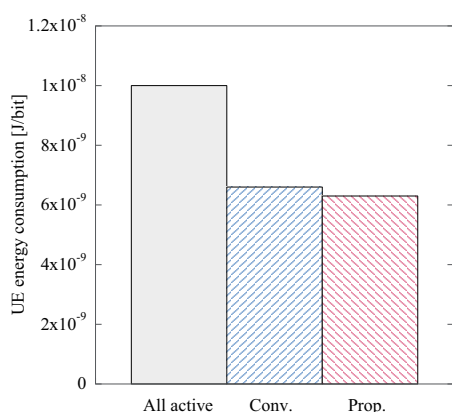


図7 CDFの50%点におけるUEのエネルギー消費量 ($\lambda_{BS} = 4$).

多数のUEからの情報により、類似度の値が平均化されることから考えられる。したがって以下では、 $\rho = 0.2$ に設定する。

図4はUEのアウテージ率をAPによって選択されたクラスタ中心に加えてアクティブモードしたBSの数 N_{act} の関数として示している。ベンチマークとして、 N 個のBSがAPを使用せずにランダムにアクティブモードに設定されている場合のUEのアウテージ率も示す。図4より、提案手法は λ_{BS} に関係なく、従来のランダム手法と比較してUEのアウテージ率を低減できることが分かる。従来手法では、クラスタ中心の近傍のBSがアクティブモードになる可能性がある。一方、提案手法ではUEから見てクラスタ中心と非類似のチャネルを持つBSがアクティブモードになる。したがって、より良好な通信範囲をUEに提供することができる。特に、 $\lambda_{BS} = 3$ [km^2]の場合、 $N_{act} = 5$ のときのUEのアウテージ率は約18.2%改善される。さらに $\lambda_{BS} = 4$ の場合、 $N_{act} = 6$ のときのUEのアウテージ率は約26.5%改善される。

図5はUEのスループットの累積分布関数(Cumulative Distribution Function: CDF)の50%点と98%点を示している。“Prop.”は“Conv.”よりも高いスループットを示していることが分かる。特に、CDFの98%点では、提案手法は従来手法から約4.1%スループットを改善できることが分かる。これは、提案手法が既にアクティブモードになっているBSとは非類似のスリープBSを効率的にアクティブモードにできているためである。

図6と図7はCDFの50%点におけるBSとUEのエネルギー消費量をそれぞれ示している。“All active”とは、ネットワーク内の全てのBSをAPを使用せずにアクティブモードに設定することである。BSのエネルギー消費は、フレームごとのすべてのBSのエネルギー消費として計算される。一方UEのエネルギー消費は、1パケットの送信に必要なエネルギー消費として計算される。BSの場合、APを使用すると“Conv.”または“Prop.”に関係なく、BSのエネルギー消費を大幅に削減できることがわかる。UEの場合も同様に、APを使用するとUEのエネルギー消費を削減できることもわかる。さらにUEの場合“Prop.”は“Conv.”よりもエネルギー消費量を約4.5%削減できることがわかる。

5. 結論

本論文では、ネットワークパフォーマンスを向上させるために、BSスリープとBSアクティブ化の戦略が提案されている。BSのクラスタは、Affinity Propagation (AP)に基づいて形成される。そして、責任度を使用して、スリープ中のBSをアクティブモードにし、UEにより良い通信品質を提供することを目的とする。シミュレーション結果は、提案手法が従来手法となるランダム手法と比較して、UEのアウテージ率を低減でき、スループットおよびエネルギー消費量を抑えることができることを示している。

謝辞

本研究の一部は(財)電気通信普及財団研究助成によって行われた。

文 献

- [1] Alcatel-Lucent, “9900 wireless network guardian,” White paper, Aug. 2012. [Online]. Available: <https://www.tmcnet.com/tmc/whitepapers/documents/whitepapers/2013/7451-alcatel-lucent-9900-wireless-network-guardian-powerful-mobile.pdf>.
- [2] Z. Hasan, H. Boostanimehr, and V. K. Bhargava, “Green Cellular Networks: A Survey, Some Research Issues and Challenges,” *IEEE Commun. Surveys & Tutorials*, vol. 13, no. 4, pp. 524-540, Fourth Quarter 2011.
- [3] C. Liu, B. Natarajan, and H. Xia, “Small Cell Base Station Sleep Strategies for Energy Efficiency,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 65, no. 3, pp. 1652-1661, Mar. 2016.
- [4] S. Lee and I. Sohn, “Affinity Propagation for Energy-Efficient BS Operations in Green Cellular Networks,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 14, no. 8, pp. 4534-4545, Aug. 2015.
- [5] B. J. Frey and D. Dueck, “Clustering by Passing Messages Between Data Points,” *Science*, 315:972-976, 2007.
- [6] A. Ahmad and L. Dey, “A K -Mean Clustering Algorithm for Mixed Numeric and Categorical Data,” *Data & Knowledge Engineering*, vol. 63, no. 2, pp. 503-527, 2007.
- [7] Z. Zhao, J. Wang and Y. Liu, “User Electricity Behavior Analysis Based on K -Means Plus Clustering Algorithm,” *2017 Int. Conf. on Computer Tech., Electronics and Commun.*, pp. 484-487, 2017.
- [8] Ministry of Internal Affairs and Communications, “Section3 Technical conditions of the mobile communication system using 900MHz band,” Sep. 13. 2019. [Online]. Available: http://www.soumu.go.jp/main_content/000115332.pdf.
- [9] ETSI, “LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Frequency (RF) Requirements for LTE Pico Node B (3GPP TR 36.931 version 9.0.0 Release 9),” ETSI TR 136 931 V9.0.0, pp. 10-11, May, 2011.
- [10] H. Claussen, “Efficient Modeling of Channel Maps with Correlated Shadow Fading in Mobile Radio Systems,” in *Proc. 2005 IEEE Int. Symp. on Personal, Indoor and Mobile Radio Commun.*, pp. 512-516, Berlin, Sep. 2005.
- [11] R. Jensen, M. Lauridsen, P. Mogensen, and T. B. Sorensen, “LTE UE Power Consumption Model for System Level Energy and Performance Optimization,” in *Proc. 80th IEEE Veh. Technol. Conf. (VTC’ 12-Fall)*, pp. 1-5, Sep. 2012.
- [12] J. Liu and S. Sun, “Energy Efficiency Analysis of Cache-Enabled Cooperative Dense Small Cell Networks,” *IET Commun.*, vol. 11, pp. 477-482, March. 2017.