

機械学習を用いる環境適応型基地局動作法

研究代表者 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

1 序論

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、ネットワーク上を流れるモバイルデータトラフィック量が急増している。特に、YouTube に代表されるマルチメディアリッチコンテンツ（動画像データ等）は容量が大きい。そのため、基地局(Base Station: BS)からユーザー機器(User Equipment: UE)への通信であるダウンリンク(Downlink: DL)通信では、大きな通信容量が必要とされる。一方で、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、従来の DL トラフィックに加えて、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。このような、人の生活と密接に関連したモバイルトラフィックの量は、人の行動時間や混雑度といった要因に伴い変化するため、1 日を通して時間・場所で大きく変動することになる[1]。

セルラーネットワークは、先に述べた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されている。そのため、明け方や深夜の時間帯など、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ことになる。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（すなわち最大の送信電力で信号を送信する場合）に増幅効率が最大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) [J/bit]は、ピーク時よりも低くなるという問題がある。そのため、深夜など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。

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%を消費することが知られている[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][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 30%程度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 15%程度改善出来ることが示されている。文献[4]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、BS と UE の間のチャンネル状態に基づいて BS クラスタリングが実行される。クラスタリングの結果に基づいてアクティブモードとなる BS とスリープモードとなる BS が決定される。計算機シミュレーション評価により、従来手法に比べて BS のエネルギー消費を 50%以上削減できることが明らかにされている。

しかしながら、文献[4]では、各 BS がアクティブモードかスリープモード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、特定 BS の負荷が増加することにより、カバレッジ内の UE のスルーputが低下する問題が考えられる。

そこで本研究では、次の AP 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 を低アウテージ率に抑え、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。

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} [$/\text{km}^2$] および λ_{UE} [$/\text{km}^2$] を持つポアソン点過程(Poisson Point Process: PPP)に従って通信エリアに分布しているセルラーネットワークを考える。各 UE は強度 λ_{pkt} [packets/sec] のパケット生起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 に割り当てられるものとする。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。第 3 節で説明する 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 は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。

2-2 UE の接続先 BS

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

$$j_i^* = \arg \max_{j \in J_{\text{active}}} \gamma_{j,i}$$

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るも、近傍の 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 が特定の受信信号強度(Received Signal Strength: RSS)閾値を超えない場合、UE はアウテージとなる[8]。

2-3 エネルギー利用効率モデル

(1) BS の電力消費量

各 BS は UE からの UL 通信において電力を消費するものとする。これらは UE と通信中 RF 回路により消費する電力 $P_{BS,c}$ 、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 $P_{BS,0}$ を含む[12]。したがって、BS j 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 $E_{BS,j}$ は次式で表される。

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

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) UE

UE の電力消費には UE が使用する帯域幅に依存して消費する電力 $P_{UE,RF}$ と固定消費される電力 $P_{UE,const}$ が存在する[11]。もし全てのアクティブ BS との間のチャンネル品質が悪く、UE が BS に接続できない場合、UE は待機電力 P_{wait} を消費するものとする。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 $E_{UE,i}$ は次式で表される。

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

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、 ϕ_i は UE i が接続可能な BS が存在するかどうかを表す指示変数であり、もし BS が存在すれば 1、存在しなければ 0 となる。 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、Affinity Propagation (AP)による BS クラスタリングの際に用いる責任度を再利用することで、どの BS をアクティブモードにさせるかを戦略的に決定する手法を提案する。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

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 法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++法が提案された [7]。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。

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

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。優先度 $s(k,k)$ には非対角成分 $s(q,k)$ 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 $a(q,k)$ の和で与えられ、 $c(q,k)$ 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。

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

および

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

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.

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

および

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

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.

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

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.

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

3.2 戦略的な BS 動作決定手法

本研究では, 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ものとする. BS q と BS k の相関係数 $r_{q,k}$ は次式で表される.

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

ここで, n は BS q と BS k に接続可能な UE 数, \bar{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 値の平均値, $P_{q,j}$ は UE j で受信された BS q 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. したがって本研究では, シミュレーション領域内の UE 数の ρ ($0 < \rho \leq 1$) 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}_{active} になり, 他の BS は \mathcal{Q}_{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, 本研究では 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意味している. 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.

アルゴリズム 1. BS の動作決定アルゴリズム

```

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

```

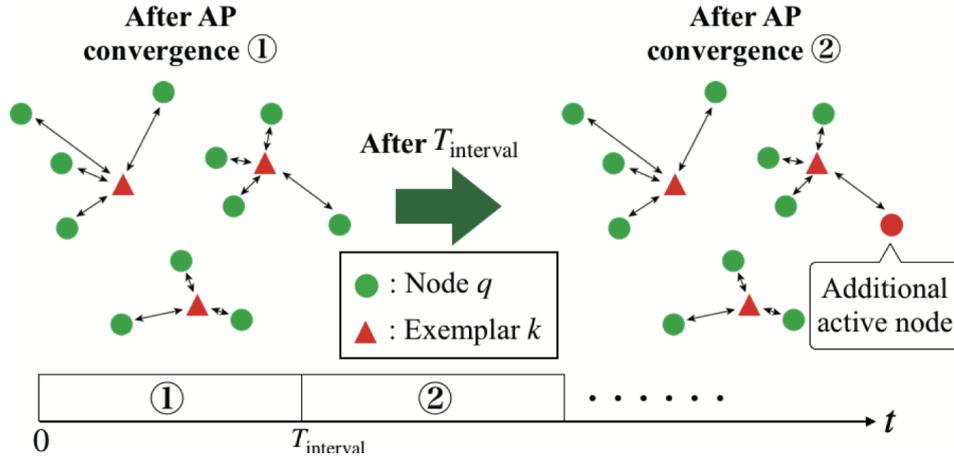


図 1. AP 収束後の BS 動作例

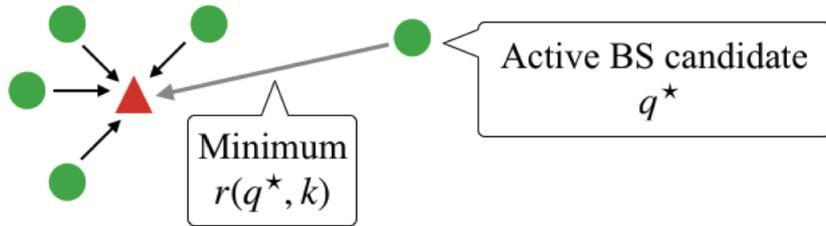


図 2. AP で得られた責任度に基づく BS の戦略的な動作決定方法

4. 計算機シミュレーション結果

計算機シミュレーション諸元を表 1 に、AP の計算に用いた諸元を表 2 に示す. システムの帯域幅を $W = 20$ [MHz] とし、各 UE は $P_{\text{UE}} = 23$ [dBm] の送信電力で $B_{\text{REQ}} = 1$ [MByte] のパケットデータを接続している BS に送信する. さらに、各 UE のパケット生成率は $\lambda_{\text{pkt}} = 10$ [packet/s] とし、BS のモード遷移間隔 $T_{\text{interval}} = 1000T_f = 10$ [sec] 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は $I_{\text{AP}} = 1,000$ 回、AP 計算の終了条件となる閾値は $\epsilon = 10^{-3}$ とした.

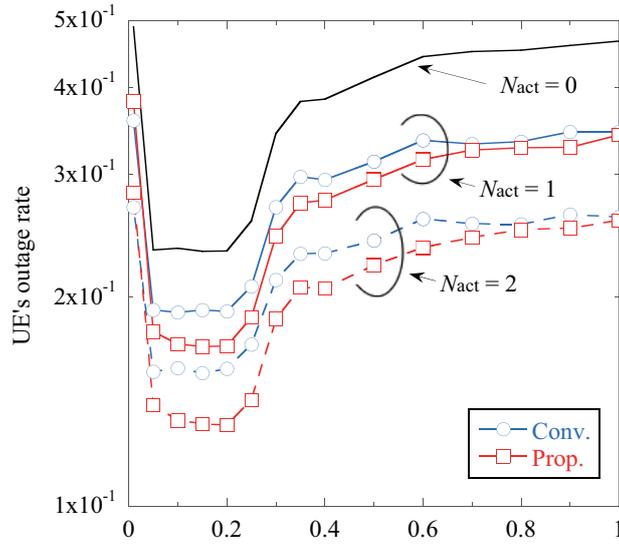
表 1 計算機シミュレーション諸元

パラメータ	変数	値
BS の強度	λ_{BS}	3, 4 [$1/\text{km}^2$]
UE の強度	λ_{UE}	100 [$1/\text{km}^2$]
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 [Mbyte]
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]
BS のアンテナ数	M	1
BS の RF 回路電力	$P_{\text{BS},c}$	6.1 [W]
BS の待機電力	$P_{\text{BS},0}$	2.6 [W]
フレーム長	T_f	10 [ms]
BS のモード遷移間隔	T_{interval}	10 [s]
UE の最大送信電力	P_{UE}	23 [dBm]
UE の固定電力	$P_{\text{UE,const}}$	5 [dBm]
UE の待機電力係数	η	1
UE の最低受信感度		-93.3 [dBm]

UE のパケット生成強度	λ_{pkt}	10 [packet/s]
雑音電力スペクトル密度	N_0	-174 [dBm/Hz]

表 2 Affinity Propagation 用諸元

パラメータ	変数	値
減衰係数	λ_{df}	0.5
最大反復回数	I_{AP}	1,000
反復計算終了閾値	ϵ	10^{-3}
Similarity の計算に用いる UE 数の割合	ρ	(0, 1]



The ratio of the number of UEs used for similarity ρ

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

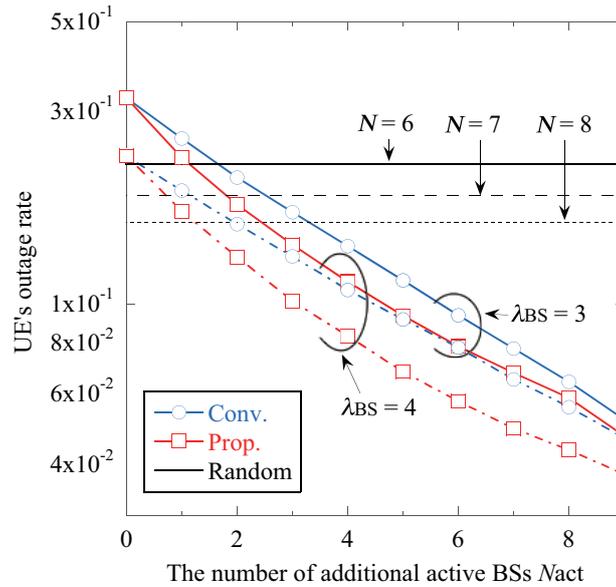


図 4 : UE アウテージ率に対する N_{act} の影響

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の強度は $\lambda_{BS} = 4$ [/km²]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収束後、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収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。したがって以降では、 $\rho = 0.2$ に設定し特性評価を進める。

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、APを利用せずに N 個のBSをランダムにアクティブモードに設定した場合のUEのアウテージ率も示す。図4より、提案手法はBSの強度 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ていることが分かる。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ンネルを持つ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、 $\lambda_{BS} = 3$ [/km²]の場合、 $N_{act} = 5$ のときのUEのアウテージ率は約18.2%改善出来ていることが、 $\lambda_{BS} = 4$ の場合、 $N_{act} = 6$ のときのUEのアウテージ率が約26.5%改善できていることが分かる。

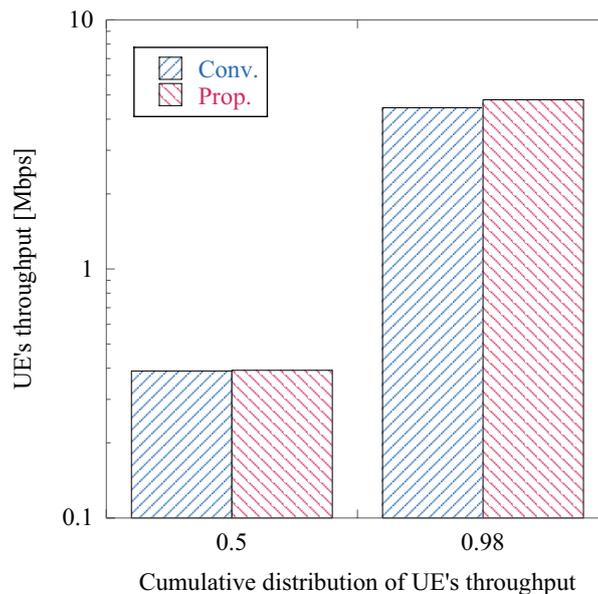


図5. 累積分布関数(Cumulative Distribution Function: CDF)の50%点および98%点におけるUEのスループット比較 ($\lambda_{BS} = 4$)

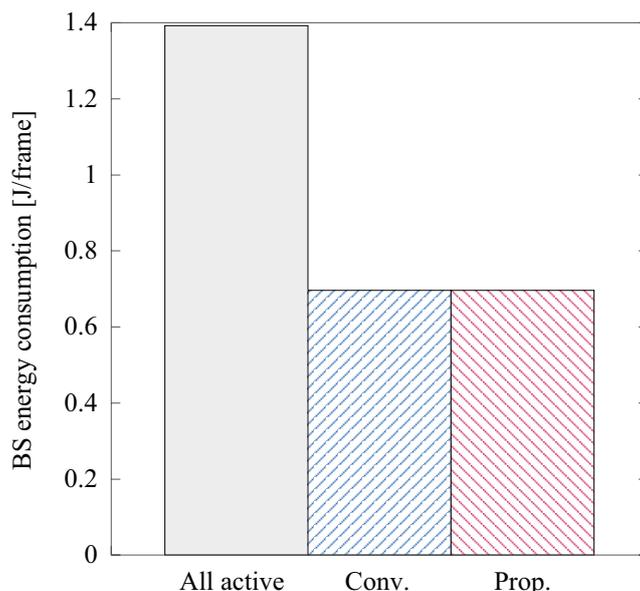


図6. 累積分布関数(Cumulative Distribution Function: CDF)の50%点におけるBSのエネルギー消費量比較 ($\lambda_{BS} = 4$)

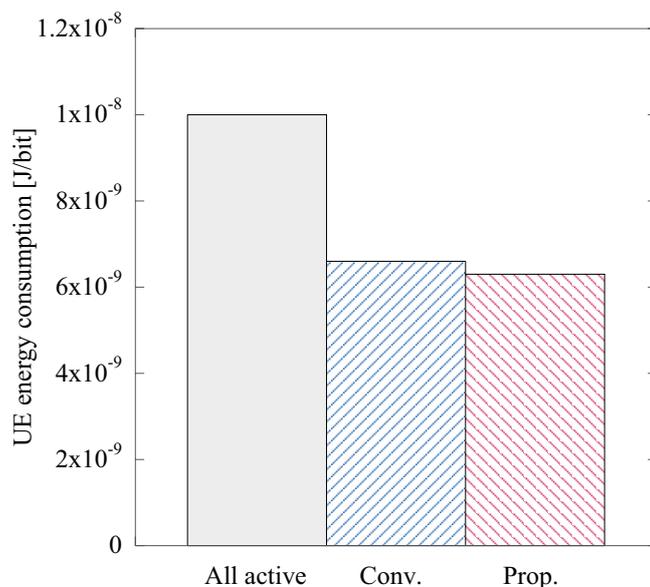


図7. 累積分布関数(Cumulative Distribution Function: CDF)の50%点におけるUEのエネルギー消費量比較 ($\lambda_{BS} = 4$)

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4%程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をアクティブモードに設定した場合の特性を示す。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5%削減できることがわかる。

5. 結論

本研究では、無線通信ネットワークにおいて、ユーザのスループットおよびアウトエージ確率の低下を避けつつ、ネットワーク全体のエネルギー消費量を削減するための、BS スリープと BS アクティブ化の戦略を提案した。提案手法では、BS のクラスタリングおよびクラスタリング結果に基づく BS アクティブ化を行う。まず、BS のクラスタリングは、Affinity Propagation (AP)に基づいて実行される。その後、クラスタリングの形成過程で算出した責任度に基づいて、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可能とした。計算機シミュレーションにより、提案手法がランダムに BS をアクティブにする手法と比較して、UE のアウトエージ率を低減でき、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た。

【参考文献】

- [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 & Tut.*, 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,” in *Proc. 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,” Sept. 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, Sept. 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, Sept. 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, Mar. 2017.

〈発 表 資 料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
Base Station Operation Based on Affinity Propagation in Cellular Networks	The 34th IEEE Int. Conf. on Information Netw. (ICOIN 2020)	2020年1月
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	電子情報通信学会技術研究報告・無線通信システム(RCS)研究会	2019年12月
Affinity Propagation を用いた基地局動作決定に関する研究	電子情報通信学会総合大会	2019年9月
電力領域における非直交多元接続を考慮した基地局スリープアルゴリズムに関する研究	電子情報通信学会技術研究報告・無線通信システム(RCS)研究会	2019年6月
基地局スリープによる無線端末の上りリンクエネルギー消費量への影響の評価	電子情報通信学会技術研究報告・無線通信システム(RCS)研究会	2018年6月