

# 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

高橋 一成<sup>†</sup> 安達 宏一<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 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、時間的に大きく変動するモバイルトラフィックのピーク時にも対応出来るネットワーク設計が必要となる。そのため、トラフィック量の比較的少ない非ピーク時には、各基地局の一部の無線リソースしか利用されないため、エネルギー効率の観点では非効率的な運用となる。そこで近年、エネルギー利用効率向上のための様々な検討が進められており、その1つに基地局スリープ技術がある。本研究では、未検討であった基地局スリープ技術が端末のエネルギー消費量に与える影響を計算機シミュレーションにより明らかにする。本稿では、各基地局が一定の確率に従ってスリープ状態になるシナリオを想定する。各端末のパケット到着率や基地局のスリープ確率をパラメータとして、UE側の消費エネルギー量に与える影響を明らかにする。

キーワード 上りリンク, エネルギー消費, 基地局スリープ, 特性評価, セルラーネットワーク

## Impact of Base Station Sleep on Uplink Energy Consumption of User Equipment

Kazunari TAKAHASHI<sup>†</sup> and Koichi ADACHI<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 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** The wireless communications network needs to be designed to support the traffic load that dynamically fluctuates over time. Thus, radio resources are underutilized at each base station (BS) during non-peak hour. This results in low energy efficiency. *BS sleep technology* has been considered as a promising approach to reduce the network energy consumption. However, from the view point of user equipment (UE), it may incur additional power as UE needs to transmit the uplink signal to BS which is located further. In this paper, the impact of BS sleep technology on the uplink energy consumption of UE is evaluated by computer simulation. Each BS is assumed to independently switch between active mode and sleep mode according to a predetermined probability. Numerical results demonstrate that the energy consumption of UE highly depends on not only the sleep probability of BS but also the packet arrival intensity.

**Key words** Uplink Traffic, Energy Consumption, Base Station Sleep, Performance Evaluation, Cellular Network

### 1. 導 入

近年、携帯電話や通信機能を備えたノートパソコンといったモバイルデバイスの普及により、ネットワークを流通するモバイルデータのトラフィック量が飛躍的に増大している。これらのモバイルトラフィック量は空間的・時間的に大きく変動することが知られている [1]。セルラーネットワークは、時間的に

大きく変動するモバイルトラフィック量を許容できるように設計される必要がある。そのため、トラフィック量が比較的少ない時間帯では、各 BS において一部の無線リソース（周波数や時間スロット）しか使用されない。例えば、BS の電力増幅器 (Power Amplifier: PA) はすべての周波数リソースブロック (Resource Block: RB) が使用されている場合の最大送信電力時に効率が最大になるように設計されている。そのため、も

し一部の周波数 RB しか利用されない場合には、送信電力が最大送信電力より小さくなるため、PA の効率が低下する。更には、BS の運用には送信電力等とは独立した電力が必要となるため、エネルギー利用効率はピーク時と比較して低下してしまう。モバイルトラフィック量が少なくなっている時間帯にピーク時と同じように BS を稼働させた場合、ネットワーク全体のエネルギー利用効率が大幅に劣化してしまうことになる。そのため、非ピーク時にネットワーク全体のエネルギー利用効率を向上させる検討が多く行われている。文献 [9] に示されているように、BS はネットワーク全体の消費エネルギー量の約 60% を消費している。そのため、モバイルトラフィックの非ピーク時に、稼働率の低い BS を低消費電力モード（スリープモード）にすることでネットワーク全体の消費エネルギー量を削減する BS スリープ技術が近年注目されている [3]。特に数多くの既存研究ではセルラーネットワークにおいて最も電力消費量が多い BS をスリープさせることによって、ネットワーク全体としてのエネルギー消費量を抑えることが出来ることが示されている。これらは下りリンクに着目した BS スリープとなっている [4] [5] [6] [7] [8]。

文献 [2] では、下りリンクと上りリンクのトラフィック負荷を考慮した BS の動作法が提案されている。この方法では、下りリンクと上りリンクのトラフィック負荷それぞれに対して、BS の使用率をある決められた閾値以下としながら、全 BS の消費エネルギーを最小限に抑える。計算機シミュレーションにより、下りリンクのみまたは上りリンクのみを考慮した BS 動作法の決定アルゴリズムよりも、常に一定の電力を消費する BS と比較して最大 20% のエネルギー削減が可能であることが明らかにされている。文献 [10] では、マクロ BS とスモール BS が混在するヘテロジニアスネットワークにおけるスモール基地局のスリープ方法が提案されている。各スモール BS をランダムにスリープさせるランダムスリープ法とトラフィック負荷に応じてスリープさせるストラテジックスリープ法の 2 つが検討されている。ランダムスリープ方法ではエネルギー効率 (EE: Energy Efficiency) を約 30% 改善することができるのに対し、ストラテジックスリープ法はランダムスリープ法よりも複雑度が高くなり計算量が増えるものの、さらに約 15% の EE の改善が得られることが計算機シミュレーションにより明らかにされている。

ネットワークから UE へとデータが伝送される下りリンクでは、BS が UE への送信データの存在をバックホールを介して知ることが出来る。そのため、送信バッファにある一定以下のデータパケットしか存在しない場合には BS をスリープモードにしたり、ある一定以上のデータパケットが存在した場合にスリープモードを解除したりといったトラフィック量に柔軟に対応した BS スリープが可能となる。一方で、UE からネットワークへとデータが伝送される上りリンクでは BS は UE からの送信要求を受信して初めて UE が送信データを保持していることを検知できる。そのため、UE が送信データを保持しているとしても、スリープモードになっている BS ではその情報を把握することが出来ない。従って、近傍の BS がスリープモ

ドとなっている時、UE はその近傍の BS がスリープモードを解除するまで待機するか、より遠方の BS へ接続する必要がある。近傍の BS がスリープモードを解除するまで待機した場合には、送信データに遅延が生じてしまう。また、UE は不要な待機電力を消費する必要があるため、消費エネルギーの増大につながる。一方で、遠方の BS へ接続した場合、所望の通信量を達成するためには通信距離に比例して増大する伝搬路損失を補償するために送信電力を大きくしなければならず、UE の消費エネルギーの増大につながる。

本研究では、これまで明らかにされていなかった BS スリープ技術が UE 側の消費エネルギー量に与える影響を計算機シミュレーションにより明らかにする。各 BS が一定の確率に従ってスリープ状態になるシナリオを想定する。各 UE のパケット到着率や BS のスリープ確率および SNR の閾値をパラメータとして、BS スリープ技術が UE 側の消費エネルギー量に与える影響を検討する。

本稿の構成は以下のようになっている。第 2 章では本検討で用いたシステムモデルを説明する。第 3 章で計算機シミュレーションにより BS スリープ技術が上りリンクにおける UE の消費エネルギーに与える影響を明らかにしている。第 4 章はまとめである。

## 2. システムモデル

本研究ではヘテロジニアスセルラーネットワークの環境を想定する (図 1)。シミュレーションエリアの端に位置する BS や UE に関する影響を均等に評価するために、 $R \times R$  [km<sup>2</sup>] の測定エリア周辺に同様のエリアを配置する。マクロ BS (MBS) をシミュレーション範囲の中央に 1 つ、ピコ BS (PBS) と UE をそれぞれ密度  $\lambda_{BS}$ ,  $\lambda_{UE}$  に従うポアソン点過程 (Poisson Point Process: PPP) に従って分布させる。UE の集合を  $\mathcal{K} = \{0, 1, \dots, K-1\}$ , PBS の集合を  $\mathcal{J} = \{0, 1, \dots, J-1\}$  とする。ここで  $K$  と  $J$  はそれぞれ UE と PBS の数を表す。UE から MBS もしくは PBS への上りリンクを想定し、各 PBS は  $N_{sf}$  フレーム毎にスリープ確率 ( $0 < p_{sleep} < 1$ ) で独立にアクティブモード/スリープモードを切り替える (図 2)。なお、UE がアクティブモードの BS に接続している場合は、BS は独立にモードを切り替えず UE のパケット送信が終わるまでアクティブモードを継続するものとする。

### 2.1 評価指標

前述の通り、ネットワーク全体におけるエネルギーの利用効率はそのネットワークを設計する上で重要である。そこでエネルギー利用効率という指標を導入することで、この値を使用してネットワークを設計すればよい。この指標の定義はさまざまであり、今回は UE  $k$  が 1 ビットのデータを送るのに必要なエネルギー量  $EE_{bit,k}$  [joule/bit] とした [12]。

$$EE_{bit,k} = \frac{E_k}{B_{pckt}} \quad (1)$$

ここで  $E_k$  は UE  $k \in \mathcal{K}$  のエネルギー消費量 [joule],  $B_{pckt}$  は UE の送信データ量 [bit] を表す。

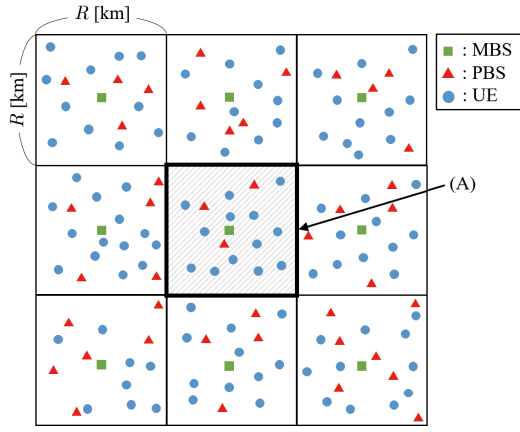


図1 BSとUEの配置モデル

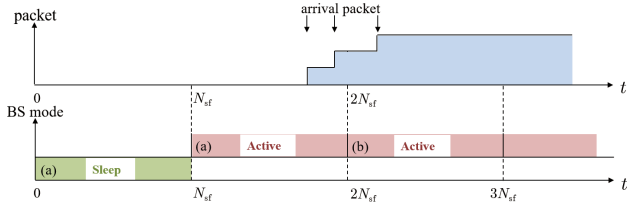


図2 BSスリープスキーム

## 2.2 チャンネルモデル

チャンネルモデルには距離依存のパス損失  $L$  と標準偏差  $\sigma$  の対数正規分布に従うシャドウイング損失を考慮する. 欧州電気通信標準化機構 (European Telecommunications Standards Institute: ETSI) で標準化されている都市部のマクロセル, ピコセルの伝播モデルは, 屋外の都市部および郊外部のシナリオに適用することが出来る [11]. 基地局アンテナの高さ  $h_{BS}$  を屋上 15 [m] に固定し, キャリア周波数  $f_c$  を 2 [GHz], BS と UE の距離を  $d$  [m] とすると, マクロセルのパスロス  $L_{macro}(d)$  [dB], ピコセルのパスロス  $L_{pico}(d)$  は以下の式 (2) で表される.

$$\begin{aligned} L_{macro}(d) &= 128.1 + 37.6 \log_{10}(d \cdot 10^{-3}) \\ L_{pico}(d) &= 38 + 30 \log_{10} d \end{aligned} \quad (2)$$

## 2.3 接続先選択

本研究では, 各 UE が最もチャンネル利得が高いアクティブモードの BS へと接続することとする. アクティブな BS の集合を  $\mathcal{J}_{active}$ , スリープモードの BS の集合を  $\mathcal{J}_{sleep}$  とする. すなわち  $\mathcal{J}_{active} \cup \mathcal{J}_{sleep} = \mathcal{J}$ ,  $\mathcal{J}_{active} \cap \mathcal{J}_{sleep} = \emptyset$  となる. UE  $k$  は次の式 (3) で与えられる BS  $j_k^*$  に接続する.

$$j_k^* = \arg \max_{j \in \mathcal{J}_{active}} \gamma_{j,k} \quad (3)$$

ここで,  $\gamma_{j,k}$  は BS  $j$  と UE  $k$  の間のチャンネル利得である. UE はパケットの送信中であっても近傍の BS がスリープ状態からアクティブ状態に遷移した場合には, 接続先 BS を切り替え (ハンドオーバー) されるものとする (図 3). なお複数の UE が同一 BS に接続する際には, 送信フレーム毎に接続 UE 数を計算し, 各 UE に均等に直交する帯域幅を割り当てる.

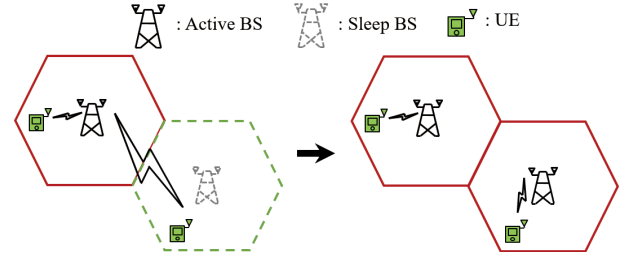


図3 ハンドオーバーの流れ

## 2.4 UE の電力消費モデル

UE の消費電力量は送信帯域幅や送信電力等に依存しない  $P_c$  と帯域幅等によって変化する  $P_{RF}$  から構成される [13]. 本稿では UE がパケットを保持しているが, BS とのチャンネル状態が悪く BS に接続出来ない場合, ある一定の待機電力  $P_{wait}$  を消費するものとする.

UE  $k$  が 1 パケットを送信し終わるのに必要とする総エネルギー消費量  $E_{total,k}$  は以下の式 (4) で表される.

$$\begin{aligned} E_{total,k} &= T_{wait} P_{wait} + T_f \left( \sum_{q=0}^{Q_k-1} (P_c + P_{RF,k}(q)) \right) \\ &= T_{wait} P_{wait} + T_f \left( \sum_{q=0}^{Q_k-1} (P_c + \rho_k(q) P_{max}) \right) \end{aligned} \quad (4)$$

ここで  $T_f$  はフレーム長,  $T_{wait}$  は待機時間,  $Q_k$  は 1 パケットを送信し終わるのに必要となったフレーム数,  $P_{max}$  は UE の最大送信電力,  $0 < \rho_k(q) \leq 1$  は UE  $k$  に第  $q$  フレームで割り当てられた帯域により決定される係数である. 本稿では同一の BS に接続している UE には均等な帯域幅が割り当てられるものとしているため,  $\rho_k(q)$  は次式で与えられる.

$$\rho_k(q) = \frac{1}{N_{j_k^*}} \quad (5)$$

ここで  $N_{j_k^*}$  は式 (3) に基づいて決定された UE  $k$  が接続している BS  $j_k^*$  に接続している UE の集合  $\mathcal{N}_{j_k^*}$  の大きさである. また待機電力  $P_{wait}$  は係数  $\eta$  ( $0 < \eta \leq 1$ ) を用いた以下の式 (6) で決定されるものとする.

$$P_{wait} = \eta P_c \quad (6)$$

## 2.5 UE の送信データレート

UE  $k$  の伝送レート  $C_k$  [bps/Hz] は以下の式 (7) で示すシャノンの通信容量式から求めた [10].

$$C_k = \max\{\log_2(1 + \text{SINR}_k), R_{max}\} \quad (7)$$

ここで,  $R_{max}$  は実際の変調方式と符号化方式によって決定されるシステムの最大の周波数利用効率であり,  $\text{SINR}_k$  は他の UE からの干渉信号を考慮した次式で与えられる信号対干渉雑音比 (Signal-to-Interference plus Noise Ratio: SINR) であり, 次式で与えられる.

$$\text{SINR}_k = \frac{\alpha_k P_{Hz} \gamma_{j_k^*,k}}{\rho_k(q) \sum_{k' \in \mathcal{K} \setminus \mathcal{N}_{j_k^*}} \alpha_{k'} P_{Hz} \gamma_{j_k^*,k'} + \sigma^2} \quad (8)$$

表 1 シミュレーション諸元

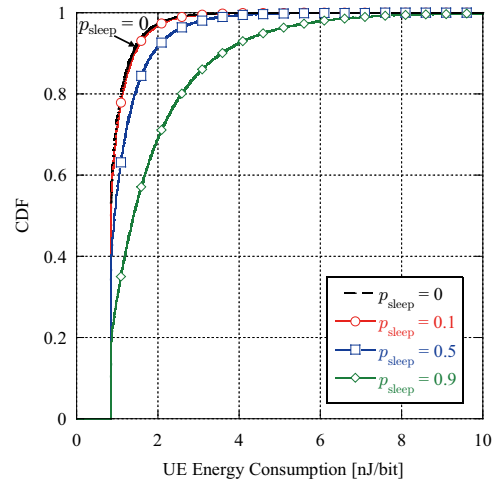
PBS の強度	$\lambda_{\text{PBS}} = 20$ [1/km <sup>2</sup> ]
UE の強度	$\lambda_{\text{UE}} = 50$ [1/km <sup>2</sup> ]
シミュレーション範囲	1 × 1 [km <sup>2</sup> ]
UE の最大送信電力	$P_{\text{max}} = 23$ [dBm]
UE の固定消費電力	$P_c = 5$ [dBm]
総帯域幅	$W = 20$ [MHz]
熱雑音の電力スペクトル密度	$N_0 = -174$ [dBm/Hz]
UE の送信データ量	$B_{\text{pkt}} = 1$ [MBytes]
1 フレーム長	$T_f = 10$ [ms]
BS スリープ間隔	$N_{\text{sf}} = 100$ [frames]
BS スリープ確率	$p_{\text{sleep}} = 0.1, 0.5, 0.9$
パケット生成率	$\lambda_{\text{pkt}} = 0.1, 0.5$ [packet/sec]
シャドウイングの標準偏差	$\sigma = 6$ [dB]
待機電力の係数	$\eta = 1$

ここで  $\alpha_k$  は UE  $k$  の状態を表す指示変数であり、UE がパケットを送信をしている場合は 1 を取り、パケットを送信していない場合は 0 を取る。さらに  $P_{\text{Hz}}$  は単位周波数あたりの UE の消費電力であり、 $\sigma^2$  は熱雑音の電力スペクトル密度 [mW/Hz] を表す。式 (8) を見て分かる通り、UE  $k$  は自身以外のアクティブな UE の送信信号を全て干渉信号と見なす。しかし同一 BS に接続している UE 同士は、前述の通り、直交した帯域幅を割り当てているため干渉をしないと見なす。

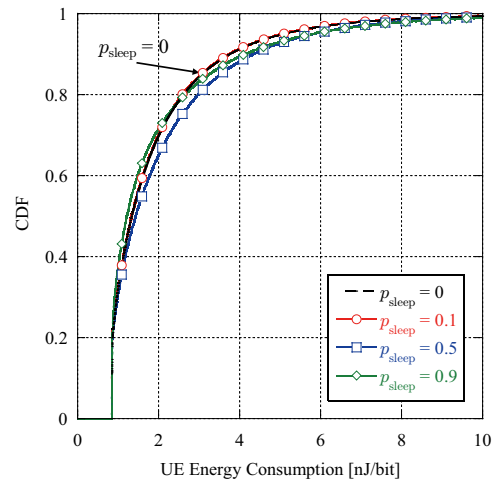
### 3. シミュレーション結果

表 1 にシミュレーションで使用したパラメータの値を示す。図 1 のシミュレーション範囲を  $R \times R = 1$  [km<sup>2</sup>] とした領域 (A) 内に強度  $\lambda = 20$  [1/km<sup>2</sup>] と  $\lambda_{\text{UE}} = 50$  [1/km<sup>2</sup>] で PBS と UE をランダムに配置する。各 PBS は一定の確率  $p_{\text{sleep}}$  に従って独立にスリープモードに切り替わるものとする。システムの総帯域幅を  $W = 20$  [MHz] とした。UE の最大送信電力と固定消費電力はそれぞれ  $P_{\text{max}} = 23$  [dBm] と  $P_c = 5$  [dBm] とした。UE は生起率  $\lambda_{\text{pkt}} = 0.1, 0.5$  でデータ量  $B_{\text{pkt}} = 1$  [MBytes] のパケットを生起するものとする。パケット送信の最小単位である 1 フレーム長は  $T_f = 10$  [ms] とし、PBS がアクティブモードとスリープモードを切り替える間隔は  $N_{\text{sf}} = 100$  [frames] とした。BS には SNR で決定される閾値を設定し、これを超えない場合は待機電力を消費しつつ最大で 200 [frames] まで送信を待機し、その後は BS の閾値未満でも送信を開始するものとする。また、最大周波数利用効率は  $R_{\text{max}} = 6$  [bps/Hz] (64QAM に相当) とする。

図 4 に  $p_{\text{sleep}}$  と  $\lambda_{\text{pkt}}$  を変化させたときの、各 UE の上りリンクに必要なビット当たりのエネルギー消費量の累積分布関数 (Cumulative Distribution Function : CDF) を示す。BS 接続のための閾値は 0 [dB] に設定した。比較のために PBS がスリープを行わない場合 (すなわち  $p_{\text{sleep}} = 0$  の場合も示す。図 4(a) から分かるように、 $p_{\text{sleep}}$  の増大に伴って UE のエネルギー消費量の CDF 特性が右側にシフトしていることが分かる。これは  $p_{\text{sleep}}$  が大きいほど、UE の近傍の BS がスリープモードになっている確率が高くなり、より遠くの BS と通信を



(a)  $\lambda = 0.1$



(b)  $\lambda = 0.5$

図 4  $\lambda_{\text{pkt}}$  ごとのビット当たりのエネルギー消費量

行う可能性が高くなるためである。また  $\lambda_{\text{pkt}}$  が増えることにより 1 つの BS に同時に接続する UE 数が増える。そのため、各 UE はより狭い帯域しか割り当てられず、送信に時間がかかるためである。一方で図 4(b) を見ると、 $p_{\text{sleep}}$  が高いのにも関わらずエネルギー消費量が少ない場合が存在している。これは UE の送信データ量が SINR に依存していることによる。ここでこの議論をより詳しくするために、 $p_{\text{sleep}}$  と  $\lambda_{\text{pkt}} = 0.5$  における各 UE が割り当てられる帯域幅、SINR の分布および所要の送信フレーム数を CDF で表したものを以下の図 5, 6, 7 に示す。 $\lambda_{\text{pkt}} = 0.5$  において  $p_{\text{sleep}}$  が高い場合、同一の BS に接続する UE 数が増えるため、各 UE に割り当てられる周波数帯域幅は図 5 が示すとおり狭くなる。しかしながら、同一の BS に接続している UE は均等に直交した帯域幅を用いているため、互いに干渉することはない。つまり、他の BS に接続している UE からの干渉は  $p_{\text{sleep}}$  が低い場合と比べて少ないため、SINR が高くなったことにより図 6 が示すとおり UE の周波数利用効率が高くなる。したがって  $p_{\text{sleep}}$  を高くすることにより発生する送信フレーム時間の変化は図 7 が示すとおりそれほど大きくないことが分かる。一方で  $p_{\text{sleep}}$  が低い場合、図 5 が示

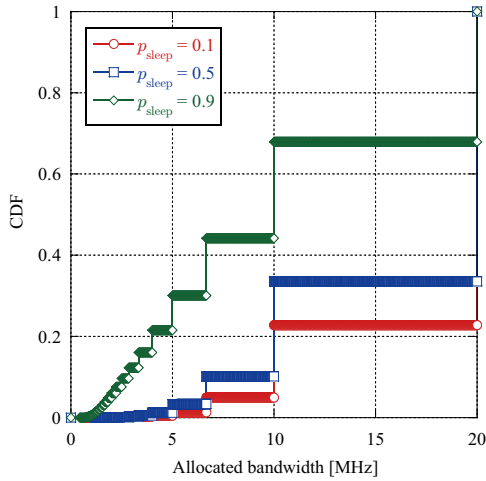


図 5 UE に割り当てられる帯域幅の分布

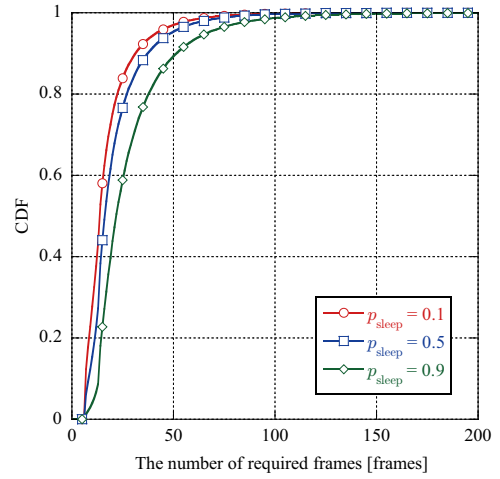


図 7 所要の送信フレーム数の分布

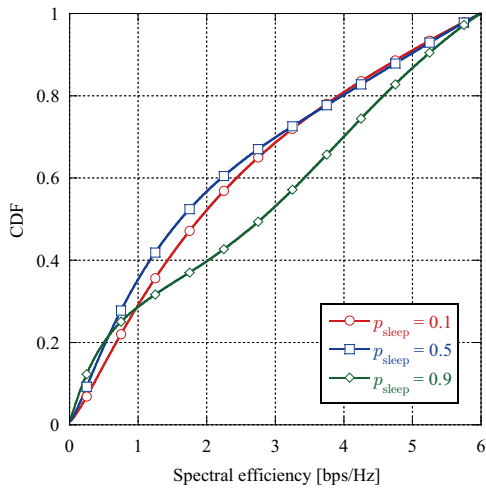


図 6 UE の周波数利用効率の分布

すとおり各 UE に割り当てられる帯域幅は広くなる。しかしながら、アクティブモードである BS の数が  $p_{\text{sleep}}$  が高い場合に比べて多いため、他の BS に接続している UE からの干渉が多くなる。これにより SINR が低くなり図 6 のように周波数利用効率が低下する。そのため、UE が広い帯域を割り当てられたとしても送信可能なデータ量がそれほど多くならない。UE の総エネルギー量は式 (4) が示すとおり所要の送信フレーム数と帯域幅により決定される。所要の送信フレーム数は最小と最大の  $p_{\text{sleep}}$  間で 80% の割合で約 20 [frame] ほどしか変わらないが、割り当てられる帯域幅は最大と最小の  $p_{\text{sleep}}$  間で最大約半分も異なってくる。以上よりエネルギー消費量が増えると考えられる。

次に BS の受信信号電力の閾値,  $p_{\text{sleep}}$ ,  $\lambda_{\text{pkt}}$  を変化させたときの各 UE の上りリンクに必要なビット当たりの平均エネルギー消費量を図 8 に示す。図 8(a) は  $p_{\text{sleep}}$  が高いときの方が BS の受信信号の閾値が高くなるほど大きくなることを示している。これは図 4(a) と同様の理由であり、特に BS 側の閾値が 10, 20 [dB] と高くなると、多くの UE が不要な待機電力を発生してしまう可能性が高くなり、それによりエネルギー消費量

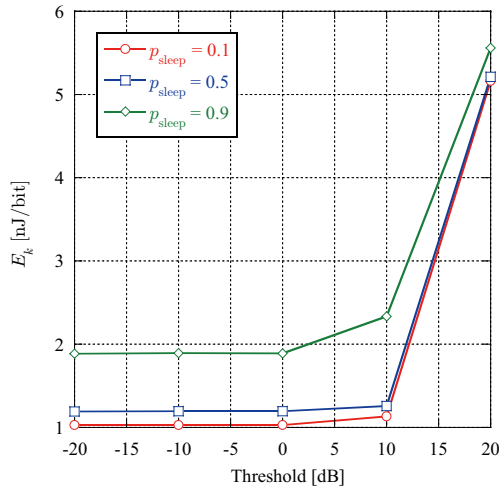
が増える。一方で、図 8(b) においては  $p_{\text{sleep}}$  と BS の閾値の関係は図 8(a) の関係とは異なる。 $\lambda_{\text{pkt}}=0.1$  よりも UE のパケット生成率が高いことから、 $p_{\text{sleep}}$  が高い場合でも高い閾値を超えて接続できた UE が 1 つでも存在すれば、その BS はアクティブモードを継続したくさんの UE のパケットを処理することが出来る可能性が存在する。それにより高い  $p_{\text{sleep}}$  でも UE のエネルギー消費量を削減出来たと考えられる。閾値によって  $p_{\text{sleep}}$  と UE  $k$  の平均エネルギー消費量が異なるが、共通して言えること BS の閾値が高くなるとエネルギー消費量がさらに増えてしまうことである。これにより UE 近傍の BS がスリープモードになっている場合で、チャンネル状態が悪く遠方の BS に接続出来ない場合は待機電力といった形で不要なエネルギー消費が発生してしまうことが確認できた。

#### 4. 結 論

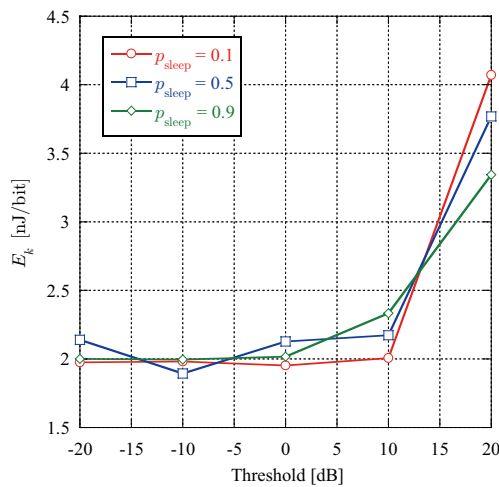
今回は BS スリープ技術が UE のエネルギー消費量に与える影響について評価した。パケット生成率が低い場合、BS スリープ確率が高いと UE は近傍の BS がスリープになっている可能性が高いため遠くの BS に接続しなければならない。そのためパケットの送信に時間がかかり、結果としてエネルギー消費量が増えてしまう。しかしパケット生成率が高い場合、BS スリープ確率が高いと同一の BS に接続する UE 数が増えるため、同一の BS に接続している UE が直交した帯域幅を使用しているという前提により干渉が減る。この事実より SINR が増加し、UE は狭帯域でありながら高い周波数利用効率で送信出来ることになり、結果としてエネルギー利用効率が高いことが分かった。

次に BS に高い閾値を設定した場合は、UE に不要な待機電力が発生してしまい、上りリンクのエネルギー消費量が増えてしまうことが分かった。BS 側は受信信号電力の閾値を出来るだけ低く設定することにより、UE のエネルギー消費量を削減できることが分かった。

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。



(a)  $\lambda = 0.1$



(b)  $\lambda = 0.5$

図 8  $\lambda_{\text{pkt}}$  ごとの BS の閾値によるビット当たりの平均エネルギー消費量

- [1] 総務省, “総務省 情報通信統計データベース 我が国の移動通信トラヒックの現状”, <http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/field/data/gt010602.pdf>, accessed January 17. 2018.
- [2] E. Oh and K. Son, “A Unified Base Station Switching Framework Considering Both Uplink And Downlink Traffic”, *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 6, no. 1 pp. 30-33, Feb. 2017
- [3] C. Liu, B. Natarajan, and H. Xia, “Small Cell Base Station Sleep Strategies for Energy Efficiency”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 65, no. 3, pp. 1652-1661, Mar. 2016
- [4] L. Li, M. Peng, C. Yang, Y. Wu, “Optimization of Base-Station Density for High Energy-Efficient Cellular Networks With Sleeping Strategies”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 65, no. 9, pp. 7501-7514. Sep. 2016
- [5] X. Zhang, S. Zhou, Y. Yan, C. Xing, J. Wang, “Energy Efficient Sleep Mode Activation Scheme for Small Cell Networks”, in *Proceedings 82th IEEE Vehicular Technology Conference (VTC'15-Fall)*, pp. 1-4, Sep. 2015
- [6] C. Bouras, G. Diles, “Energy efficiency in sleep mode for 5G femtocells”, in *Proceedings Wireless Days*, pp. 143-145, Mar. 2017
- [7] J. Yang, W. Wang, X. Zhang, “Hysteretic Base Station Sleeping Control for Energy Saving in 5G Cellular Network”, in *Proceedings 85th IEEE Vehicular Technology Conference (VTC'17-Spring)*, pp.1-5, Jun. 2017
- [8] J. Kim, H. Lee, S. Chong, “Traffic-Aware Energy-Saving Base Station Sleeping and Clustering in Cooperative Networks”, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 17, no.2, pp.1173-1186, Nov. 2017
- [9] Z. Hasan, H. Boostanimehr, and V. K. Bhargava, “Green Cellular Networks: A Survey, Some Research Issues and Challenges”, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 13, no. 4, pp. 524-540, Fourth Quarter 2011
- [10] Y. Qi and H. Wang, “Interference-Aware User Association under Cell Sleeping for Heterogeneous Cloud Cellular Networks”, *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 6, no. 2, pp. 242-245, Apr. 2017
- [11] 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
- [12] J. Wu, Y. Zhang, M. Zukerman, and E. K.-N. Yung, “Energy-Efficient Base-Stations Sleep-Mode Techniques in Green Cellular Networks: A Survey,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol.17, no.2, pp.803 – 826, 2nd Quart., 2015.
- [13] A. R. Jensen, M. Lauridsen, P. Mogensen, and T. B. Sorensen, “LTE UE Power Consumption Model for System Level Energy and Performance Optimization”, in *Proceedings 80th Vehicular Technology Conference (VTC'12-Fall)*, pp. 1-5, Sep. 2012