ミーティング資料

安達智哉
to-adachi@ist.osaka-u.ac.jp

2019 年 2 月 8 日

1　CPU 負荷とメモリ使用量を考慮したセルラ端末の適応的なタイムアウト制御による、モバイルネットワークの性能向上

1.1　概要

MME および SGW、PGW などの EPC ノードは、主なリソースとして CPU とメモリを持っている。CPU は、アタッチやデタッチなどのシグナリング処理を実行するために必要とされるリソースである。一方メモリは、ベアラなどのセッション情報を保持するために必要とされるリソースである。これらのリソースは、モバイルネットワークにおける通信を可能にするために必須であるため、ネットワーク事業者は、どちらのリソースも枯渇することがないように、CPU とメモリをバランスよく割り当てる必要がある。

その一方で、近年は M2M/IoT 端末の急激な増加が注目されている。M2M/IoT 端末は通信特性において従来の端末 (携帯電話やスマートフォンなどのユーザ端末) とは大きく異なり、データの送信に周期性や間欠性を持つという特徴がある。また、M2M/IoT 端末は消費電力を抑えることを目的に、データの送信ごとにデタッチ処理を実行し、セッションを解放することがある。また、NB-IoT では、DRX (Discontinuous Reception) や eDRX(extended DRX) などに代表される、間欠的なデータ受信により、受信していない期間では無線信号を送受信する機能部を停止させることで消費電力を抑えることを目的とした技術が検討されている [1]。この点においても、ネットワークから切り離されるまで、セッションを維持し続けるユーザ端末とは異なる。

上述の M2M/IoT 端末の特性は、CPU やメモリなどのサーバリソースの効率的な割り当てを難しくすると考えられる。なぜなら、M2M/IoT 端末はその通信特性から、多くのアタッチ処理およびデタッチ処理を引き起こし、CPU 負荷を集中的に増加させるため、ユーザ端末と比較すると、CPU とメモリに与える負荷の割合が異なるからである。また、IoT 端末の接続台数の予測が難しいこともリソースの割り当てを難しくする一因である。IoT 端末は、スマートフォンのようなユーザ端末とは異なり、家電や自動車、電気メーター、センサなど様々な場所、様々な用途で使用される可能性があり、端末の台数およびその分布を予測することは困難であると考えられる。このように、通信特性が異なり、接続台数の予測が難しい IoT 端末の普及により、今後のネットワーク事業者は、コアネットワークノードへのサーバリソースの割り当てがより難しいくなると予想される。

上述のようなネットワーク (サーバリソース消費の予測が難しく、変動が激しいネットワーク) において、収容可能な端末の増加を目的とした既存研究には、スケールアウトの考え方を用いたものが多い。これらの研究では主に稼働するサーバやインスタンスの数をリソースの需要に応じて変動させることにより、ネットワークの変動に対応している。しかし、この方法では、本来必要とさ

れているリソース量 (需用量) よりも多くのリソースが供給される、オーバープロビジョニングが発生する問題がある。なぜなら、これらの研究では、サーバやインスタンス一台あたりのリソース量は一定であることを前提にした研究が多く、細かい粒度でリソースを制御できないためである。また、必要とされる CPU とメモリのリソース比があらかじめ分かっていることを前提とした研究が多く、必要とされるリソース比が未知の場合はリソースの効率的な利用ができないからである。例えば、CPU のリソース不足を解消するためにケールアウトを行った場合、CPU リソースと同時にメモリリソースも増加する。しかし、メモリは元々ボトルネックにはなっていないため、新たに追加されたメモリはオーバープロビジョニングされたことになる。

このような背景から、CPU とメモリのリソース消費の予測が難しような状況や変動が大きいような状況においても、どちらかがボトルネックにならずに、効率的にリソースを活用するアーキテクチャを考えることは重要である。実際、CPU とメモリのリソースを効率よく活用する研究は、データセンターなどの分野では行われている [2]。しかし、モバイルネットワークに特化した研究は行われていない。そこで、私はモバイルネットワークに特化した、CPU とメモリのリソースのオフロードを可能にする仕組みを考案する。この方法により、CPU が過負荷である場合は、メモリの負荷を増加させる代わりに CPU の負荷を削減することが可能である。またその逆に、メモリが過負荷である場合は、CPU の負荷を増加させることによりメモリの負荷を削減できる。この仕組みにより、CPU とメモリのリソース消費の予測が難しい場合や、変動が激しいネットワークであっても、CPU およびメモリ双方のリソース利用率の向上が期待でき、収容可能な端末の増加が期待できる。

1.2 負荷とそのオフロードの概要

1.2.1 CPU 負荷

CPU 負荷は、主にアタッチやデタッチなどのシグナリング処理を各ノードで実行する際に発生する。時間当たりのシグナリング処理の実行回数の増加に伴い、負荷が増加する。CPU 負荷の増加は、各ノードにおける処理時間の増大を引き起こす。また、CPU が過負荷状態になると、それ以上のシグナリング処理の実行が困難になる。

1.2.2 メモリ負荷

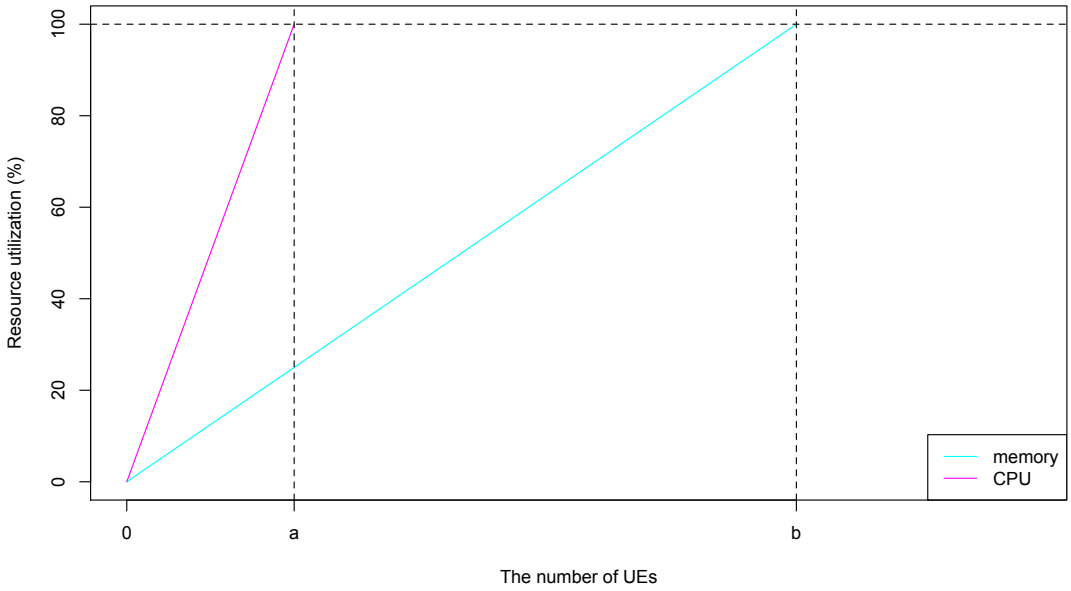
メモリ負荷は、主にベアラなどのセッションを維持するために必要な情報 (ベアラ識別子、UE 情報、ステート情報など) を保持する際に発生する。維持するベアラの増加に伴い、負荷が増加する。メモリが過負荷状態になると、新しくベアラを確立するために、古いベアラを解放する必要がある。

1.2.3 負荷のオフロード

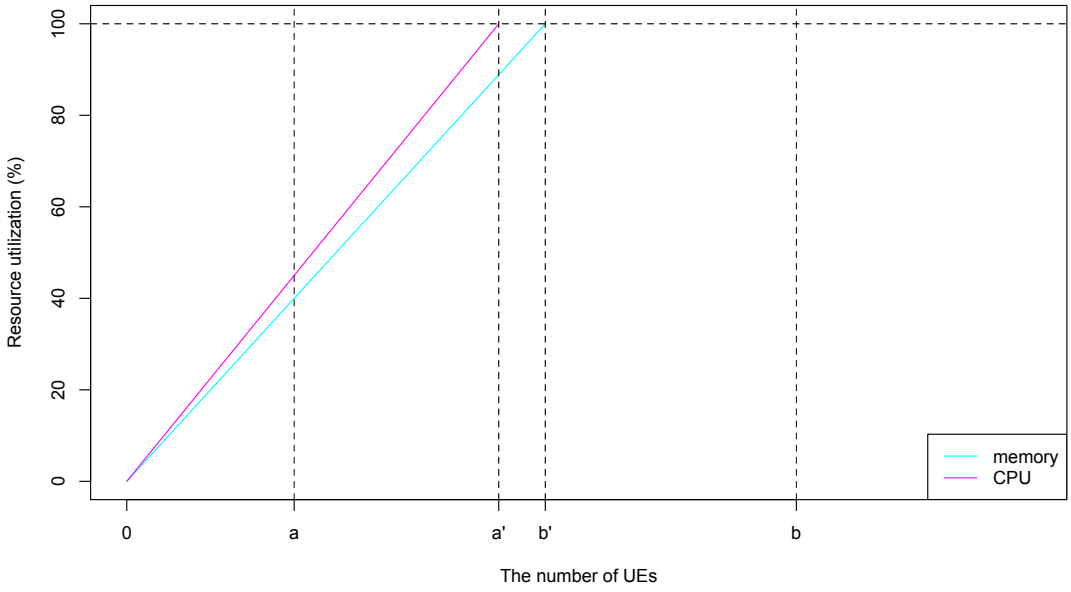
負荷のオフロードに関するイメージ図を図 1 に示す。各図は端末台数と CPU およびメモリリソースの使用率の関係をそれぞれ赤および青の線で示している。端末台数とは、システムが収容している UE の数である。リソースの使用率とは、システムが利用できるリソースの最大値 (物理的な性能の限界値や、事前にオペレータが設定した閾値などが想定される) に対して、UE を収容す

るために割り当てる必要のあるリソース量の割合である。一台あたりの UE を収容するために必要なリソース量の平均値はグラフの傾きに表れており、この値は UE の通信特性に応じて変化する。

図 1 は、メモリリソースと比較して CPU リソースを大きく消費するような通信特性を持つ UE を収容した場合のグラフである。図 1(a) を見ると、UE 台数が a 台の時点で CPU 使用率が 100% に達していることがわかる。そのため、収容可能な UE の台数は a 台である。一方、図 1(b) では、第 1.3 節で述べる方法により、一台あたりの UE を収容するために必要なリソース量を変化させた場合のモデルである。この図の例では、ボトルネックであった CPU の負荷をメモリにオフロードすることにより、収容可能な UE 台数が a 台から a' 台に増加している。このように、CPU リソースが不足し、メモリリソースが余っているような場合においては、CPU の負荷をメモリにオフロードすることにより収容可能な UE の台数が増加する可能性がある。同様に CPU リソースが余っている状態で、メモリリソースが不足している場合においては、メモリから CPU へ負荷をオフロードすることが可能である。



(a) オフロードを行わない場合



(b) オフロードを行った場合

図 1: CPU 負荷をメモリへオフロード

1.3　負荷のオフロード方法

ベアラのタイムアウト時間 (UE がネットワークから切り離されたあと、デタッチ処理が行われるまでの時間) を t とする。通常、この時間は一定である。私は、t を変化させることによって、CPU とメモリの間で負荷をオフロードできるのではないかと考えた。図 2 は、M2M/IoT 端末が最初にネットワークに接続した際の様子を示したものである。通常通り、アタッチの処理を行い、ベアラを確立する。図 3 は、M2M/IoT 端末がネットワークから切断された際の様子である。通常は、数秒後にデタッチ処理が行われ、ベアラは全て解放されるが、t を長く設定した場合、デタッチ処理が行われないため、ベアラはそのまま維持される (UE-eNodeB 間の無線帯域は解放する)。図 4 は M2M/IoT 端末が再びネットワークに接続した時の様子を示す。この場合、以前使用したベアラが残っているため、M2M/IoT 端末は無線部分以外のアタッチ処理をスキップしてデータの送受信を開始できる。結果的に、EPC ノードで行うアタッチ処理およびデタッチ処理の回数が削減されるため、CPU に与える負荷が削減される。一方、ネットワークに接続されていない M2M/IoT 端末のセッション情報を保持する必要があるため、メモリが圧迫されることが予想される。

ベアラのタイムアウト時間 t を超えても UE が再接続しない場合は、デタッチ処理を行う (図 5)。また、タイムアウト後に再接続する場合は、全てのベアラを新たに確立する必要がある (図 6)。そのため、t を短く設定した場合は、デタッチ処理およびアタッチ処理が頻発するため、CPU の負荷が大きくなることが予想される。一方で、各ノードでセッション情報を保持する時間を短くすることができ、メモリの負荷の削減が期待できる。

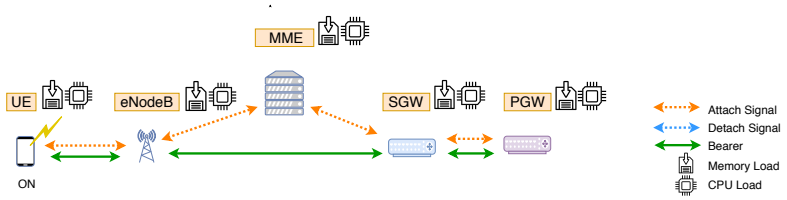


図 2: UE が最初にネットワークに接続した時の処理

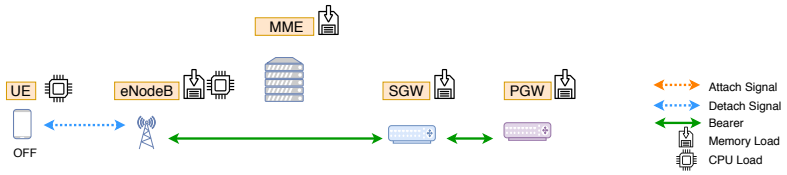


図 3: UE がネットワークから切り離された時の処理

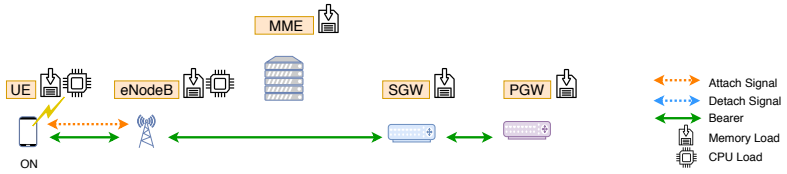


図 4: ベアラのタイムアウト前に UE が再接続した時の処理

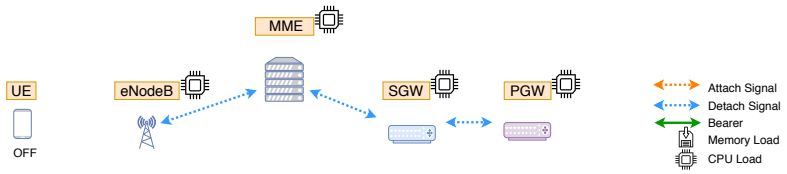


図 5: ベアラのタイムアウトが発生した場合の処理

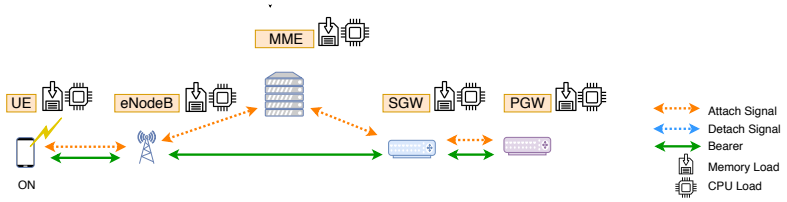


図 6: ベアラのタイムアウト後に UE が再接続した場合の処理

前述のように、ベアラのタイムアウト時間を変更することにより、CPU とメモリの間で負荷をオフロードできると考えられる。これに実装した場合に想定される処理の流れを図 7 に示す。なお、第 1.4 節でのべる評価では、この処理を実行することおよび各ノードの負荷を監視することによる追加の負荷は発生しないと仮定している。

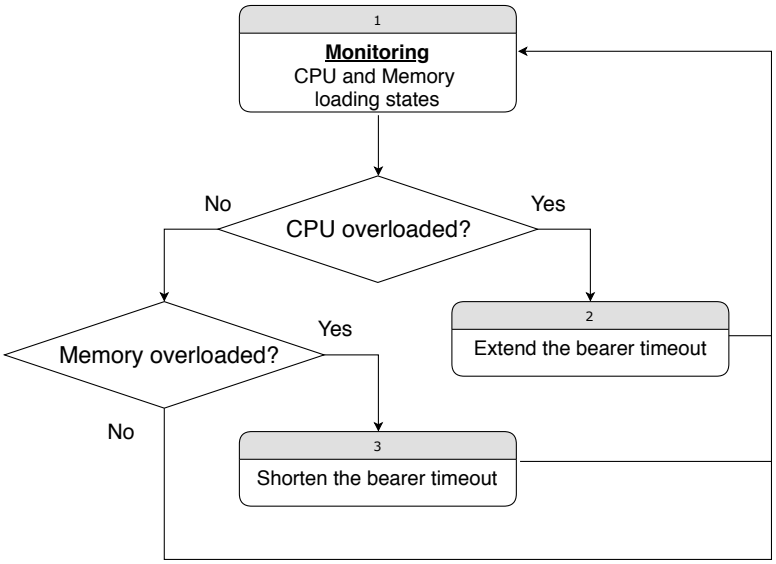


図 7: ベアラのタイムアウト時間の更新手順

1.4 評価方法

シミュレーションを行い、収容可能な UE 台数を導出することで評価を行う。また、UE の通信特性やベアラのタイムアウト時間が与える影響も評価する。

1.4.1　ネットワークモデル

単一の EPC で構成される LTE/EPC ネットワークを対象として評価を行う。図 8 に評価対象のネットワークを示す。図 8 は以下のノードから構成される。

- UE
- eNodeB
- MME
- S/PGW
- HSS

UE および eNodeB は複数台、その他のノードは 1 台づつ存在する。

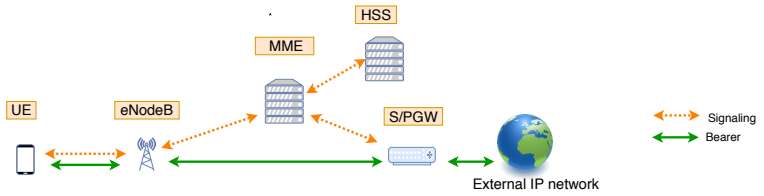


図 8: LTE/EPC ネットワークモデル

1.4.2　UE の通信特性

UE の通信特性は、UE の種類によって異なる。今回の評価ではユーザ端末と M2M/IoT 端末の 2 種類の UE が存在すると想定する。それぞれの通信特性を以下のように想定した。

ユーザ端末 連続的なデータ通信を行う。通信データ量は多いが、常時ネットワークに接続した状態であるため、シグナリング処理の発生頻度が小さい。

M2M/IoT 端末 間欠的な通信を行う。データ送信の頻度は少ないが、データ送信の度にネットワークへの接続および切断を繰り返すため、シグナリング処理の発生頻度が大きい。

今回の評価ではユーザ端末と M2M/IoT 端末の存在割合をパラメータとして変化させる。

1.4.3　ベアラのタイムアウト時間

UE がデタッチ要求を発生させた後、実際にコアノード側でデタッチ処理を実行するまでの待機時間である。第 1.3 節で述べたように、この値によってコアノードのリソースの需要が変化する。今回の評価では、ユーザ端末と M2M/IoT 端末の存在割合に応じて、収容可能な UE 台数を最大化するようなベアラのタイムアウト時間を計算によって導出する。

1.4.4　シグナリング手順

OpenAirInterface(OAI)[3] に基づき、アタッチ処理およびデタッチ処理のシグナリング手順を決定した。また、シグナリング処理の過程で各ノードにかかる CPU 負荷は、OAI のソースコードの命令文数を指標として用いる。

1.4.5　サーバ資源の割り当て

現在検討中である。

1.4.6　CPU 負荷の導出

CPU にかかる負荷はこれまで行ってきた研究と同様に、プログラム行数に基づく待ち行列理論で求める。アタッチ処理およびデタッチ処理、ベアラのサスペンド処理にかかる時間を待ち行列理論によって導出する。

1.4.7　メモリ負荷の導出

上野さんの実験データを基にメモリ負荷を導出する。実験データから、ベアラの確立が EPC の各ノード (MME、SPGW、HSS) のメモリに与える影響を測定した。まず、1 台の UE がベアラを確立する実験を行った際に計測されたメモリに関するデータを図 9、図 10、図 11 に示す。図 9、図 10、図 11 はそれぞれ、MME、SPGW、HSS における free memory の推移を表しており、横軸が時間 (s)、縦軸がメモリの空き容量 (KB) を示している。これらのグラフを見ると、MME ではベアラの確立に伴いメモリ負荷が増加しているが、SPGW および HSS では負荷の増加が僅かであることが分かる。

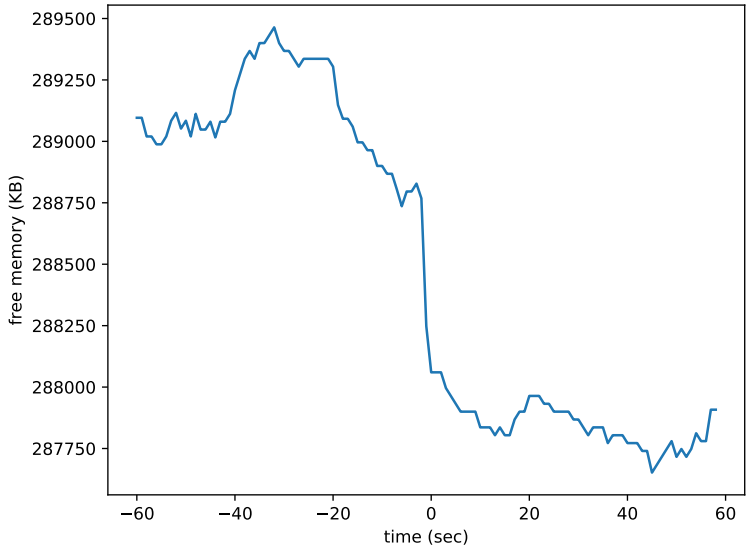


図 9: MME におけるメモリ空き容量の推移 (接続台数 1 台)

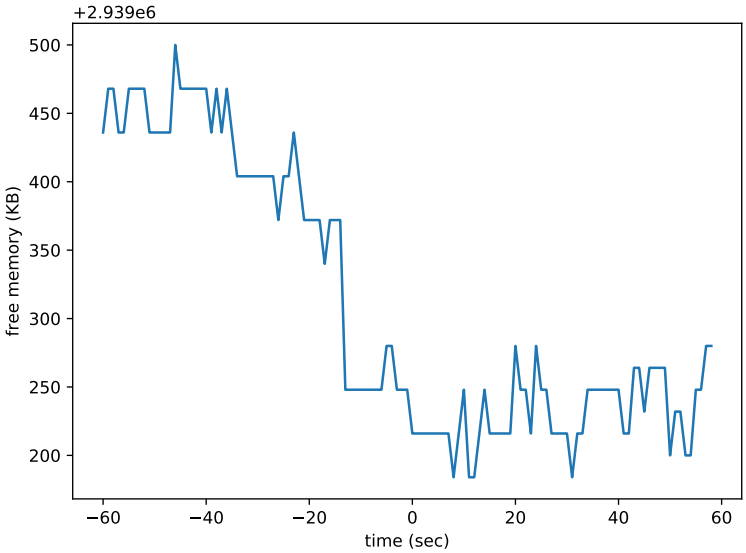


図 10: SPGW におけるメモリ空き容量の推移 (接続台数 1 台)

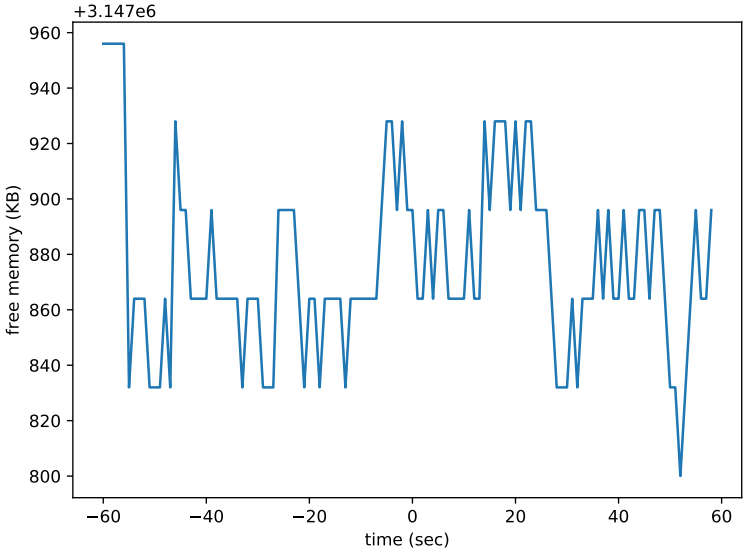


図 11: HSS におけるメモリ空き容量の推移 (接続台数 1 台)

UE 台数 1 台の実験データ 10 回分と UE 台数 40 台の実験データそれぞれにおいてベアラ確立の前後のメモリ使用量の増加量をプロットした結果を図 12、図 13、図 14、に示す。この結果より、全てのノードにおいて UE 台数が 1 台の場合よりも 40 台の場合の方がメモリの使用量が大きいことが分かる。

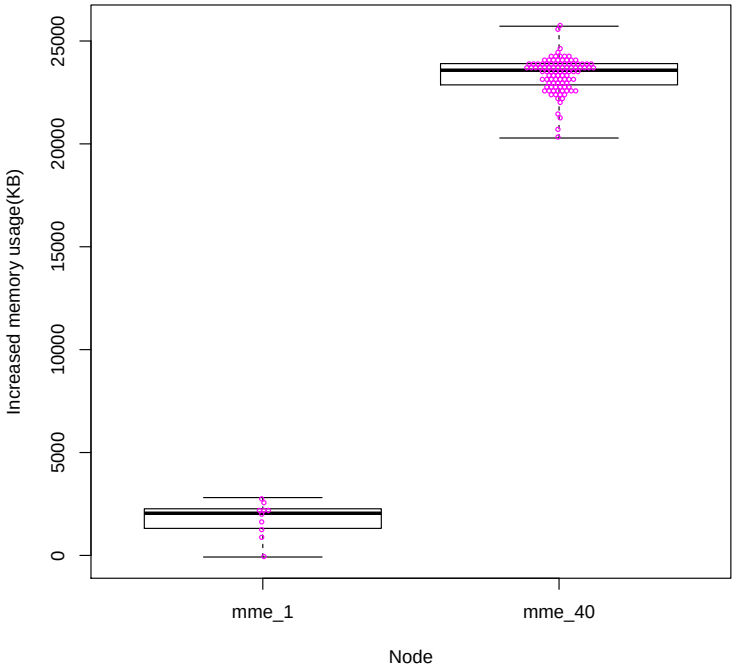


図 12: ベアラの確立によって増加したメモリ使用量

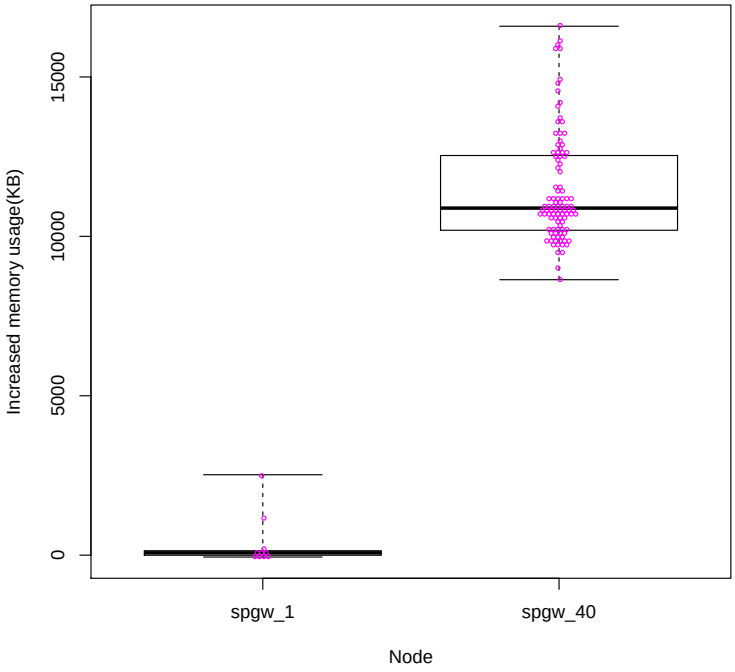


図 13: ベアラの確立によって増加したメモリ使用量

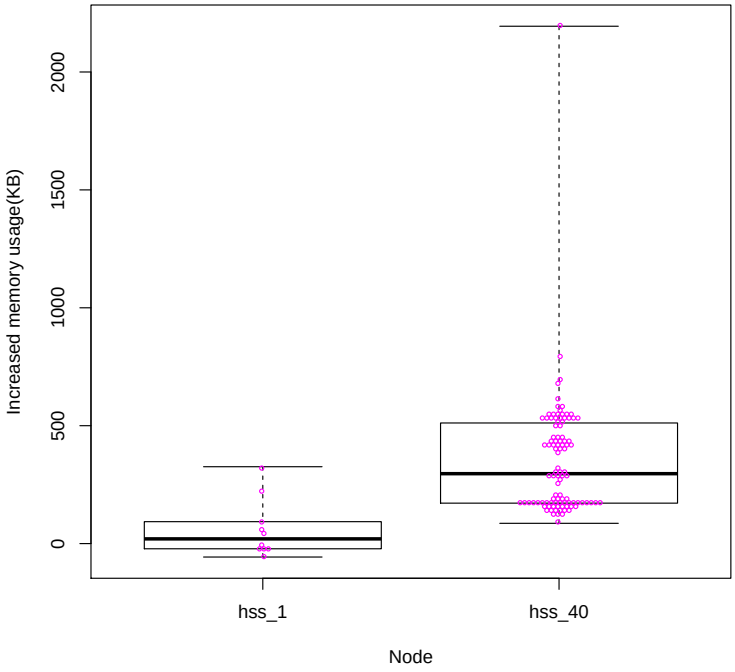


図 14: ベアラの確立によって増加したメモリ使用量

1.5　シミュレーション方法

今回の研究はシミュレーションを用いてネットワークの性能評価を行う。シミュレーションのタイムステップは 1 分から 5 分程度を想定している。各タイムステップでは、UE の通信特性とベアラのタイムアウト時間に基づき EPC の負荷を算出する。そしてその負荷に基づき、次のタイムステップにおけるベアラのタイムアウト時間を設定する。シミュレートを実行するために必要な処理を以下に示す。

1. EPC の負荷の算出
2. ベアラのタイムアウト時間の設定

EPC の負荷の算出のイメージ図を図 15 に示す。UE の通信特性とベアラのタイムアウト時間を入力とし、EPC の負荷を出力とする。EPC の負荷の導出のために、待ち行列理論、上野さんの実験結果および統計処理を用いる。

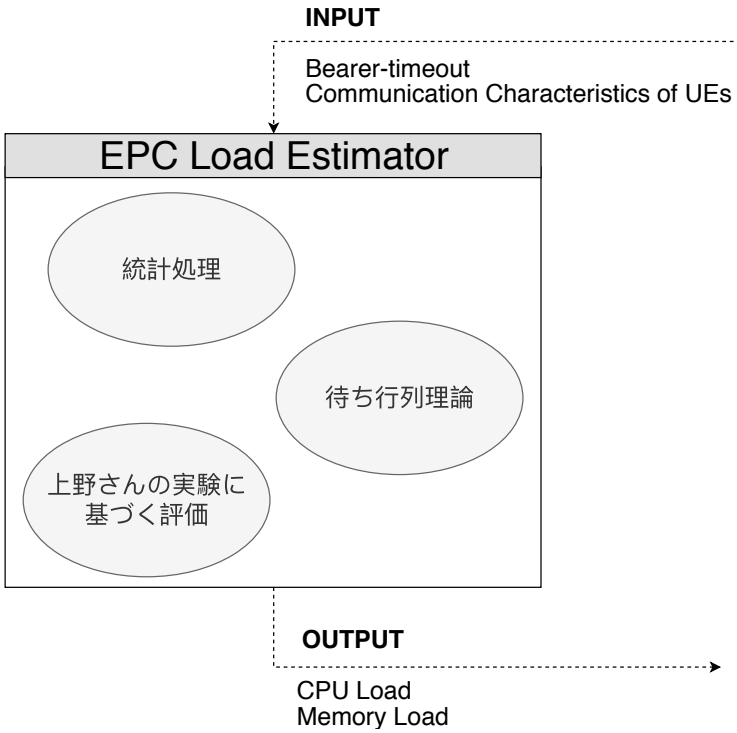


図 15: EPC 負荷の算出イメージ図

ベアラのタイムアウト時間の設定は、図 16 に示すように、CPU およびメモリリソースの負荷状況に応じて動的に決定される。この処理では、常に CPU とメモリのリソース負荷を監視し、CPU が過負荷であればベアラのタイムアウト時間を増加させ、反対にメモリが過負荷であればベアラのタイムアウト時間を減少させる。なお、各リソースの負荷状況は図 15 によって計算された値を用いる。

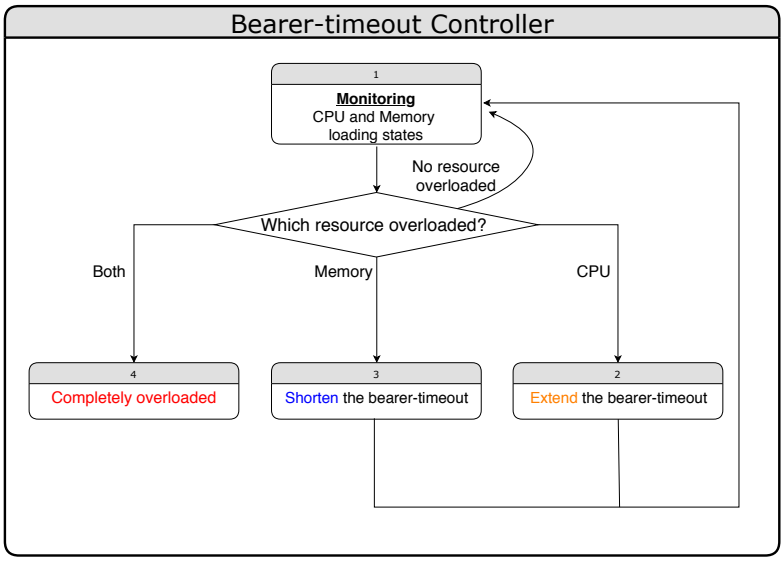


図 16: bearer-timeout 制御フロー

2　先行研究調査

サーバのリソース分離に関する文献 [2] を調査した。この文献では、データセンタのコストを削減することを目的し、サーバリソースの分離を提案している。そして、サーバごとにリソース構成が固定されている従来のデータセンタと、CPU とメモリのリソース構成をサーバから分離したデータセンタとの比較を行っている。評価の結果、リソースを分離することによって、CPU とメモリのオーバープロビジョニングを削減できることを示している。そして、コスト面では（アプリケーションにも依存するが）最大 40%の削減が期待でいると結論づけてる。

文献 [4] では、モバイルネットワークにおいてハンドオーバに関わるシグナリングの発生回数を減らすことを目的とし、Delay Time Algorithem を提案している。このアルゴリズムでは、従来の仕組みであればハンドオーバ処理を行うような状況であっても、あえてハンドオーバ処理を行うタイミングを遅らせることによって、シグナリングの発生を削減することを可能としている。具体的には図 17 に示すような、複数の small cell と単一の macro cell によって構成されるネットワークモデルを想定して評価を行っている。図 17 に示すように、small cell のカバーエリアは隣接していないため、UE が small cell 間を移動した場合、移動元 small cell から macro cell へハンドオーバを行い、その後 macro cell から移動先 small cell へハンドオーバを行うことになる。提案方式では、UE が small cell のエリア外に出ても即座にハンドオーバを行わず、t_d 時間の猶予を設定する。もし、t_d 時間内に UE が移動先 small cell のエリアに到着した場合は、移動元 small cell から移動先 small cell へハンドオーバ処理を行う。もし、t_d 時間内に UE が small cell のエリアに到着しない場合は、macro cell へのハンドオーバを実行する。この仕組みによって削減できるハンドオーバの発生数の割合 (R_h) と small cell で処理するパケットの増加率 (ρ_s) および QoS の低下 (Q) を図 18 に示す。

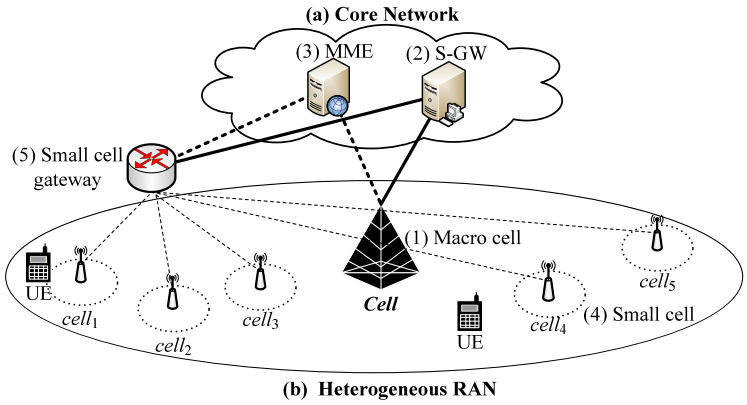
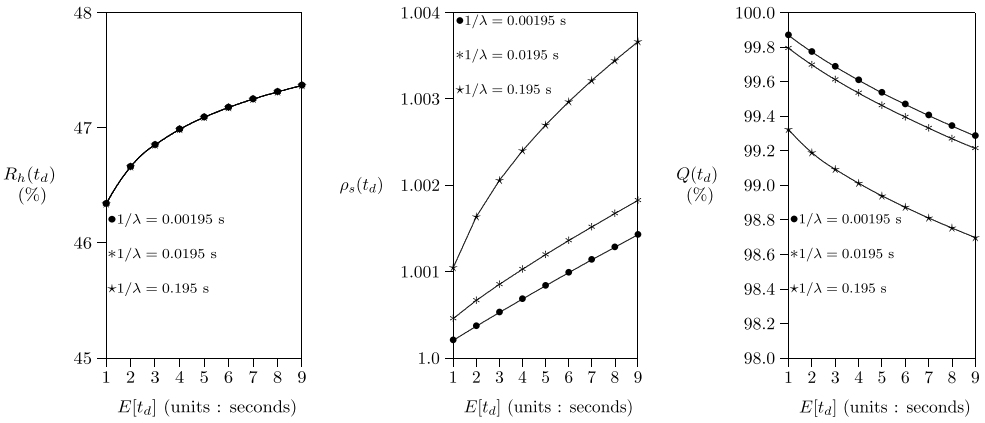


図 17: LTEHetRANarchitecture

3　今後の課題

デタッチの処理負荷を求めるため、OAI に基づくデタッチ処理のプログラム行数を調査する。



(a) Performance of $R_h(t_d)$ (b) Performance of $\rho_f(t_d)$ (c) Performance of $Q(t_d)$

図 18: 結果

参考文献

[1] 武田 和晃, ウリ A. ハプサリ, 高橋 秀明, 藤島 大輔, 繆 震, “LTE Release 13 における IoT を実現する新技術,” *NTT Docomo* テクニカル　ジャーナル, vol. 24, no. 2, 2016 年 7 月.

[2] M. Mahloo, J. M. Soares, and A. Roozbeh, “Techno-Economic Framework for Cloud Infrastructure: A Cost Study of Resource Disaggregation,” in *Proceedings of 2017 Federated Conference on Computer Science and Information Systems (FedCSIS)*, Sep. 2017, pp. 733–742.

[3] “OpenAirInterface.” [Online]. Available: http://www.openairinterface.org/

[4] C. Lee and P. Lin, “Modeling Delay Timer Algorithm for Handover Reduction in Heterogeneous Radio Access Networks,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 16, no. 2, pp. 1144–1156, Feb. 2017.