

M2M/IoT 端末の同時接続要求を考慮した モバイルコアネットワークの実験的評価

上野 真生[†] 長谷川 剛^{††} 村田 正幸[†]

[†] 大阪大学大学院情報科学研究科 〒560-0871 大阪府吹田市山田丘 1-5

^{††} 大阪大学サイバーメディアセンター 〒560-0043 大阪府豊中市待兼山町 1-32

E-mail: [†]{m-ueno,murata}@ist.osaka-u.ac.jp, ^{††}hasegawa@cmc.osaka-u.ac.jp

あらまし スマートフォン等の携帯端末利用者の増加や端末の高機能化、また、最近注目されている、M2M/IoT 端末の収容によって、Long Term Evolution (LTE) や第5世代移動通信システムなどのモバイルネットワークにおける輻輳への対応が重要な課題となっている。M2M/IoT 端末の収容について、先行研究では様々な手法が提案・評価されているものの、それらは主に数学的な解析を基にしており、実際にその手法を適用したモバイルネットワークでの実験的な評価は行われていない。本論文では、仮想化プラットフォーム上で、モバイルコアネットワークを構築するための実ソフトウェアを用い、端末が通信を行う際に必要となるシグナリングプロトコルの処理遅延時間を評価した。モバイルコアネットワークの構築には OpenAirInterface を用い、ユーザ端末は Docker コンテナを用いることで、複数の端末がコアネットワークに接続する環境を構築した。評価の結果、1 コア 1 GHz の CPU を持つ仮想マシンに MME の機能を持たせた場合、40 台のユーザ端末からの接続要求が同時に発生することによって、MME における処理時間が最大で 510% 増加することが分かった。

キーワード モバイルコアネットワーク, M2M/IoT 通信, Long Term Evolution (LTE), シグナリング処理, virtualized Evolved Packet Core (vEPC)

1. はじめに

近年におけるスマートフォン等の携帯端末利用者の増加、及び端末の高機能化によって、Long Term Evolution (LTE) [1] や第5世代移動通信システム (5G) [2] などのモバイルネットワークにおける、輻輳への対応が重要な課題となっている。また、特に最近では、モバイルネットワークに接続される端末として Machine-to-Machine (M2M) や Internet of Things (IoT) 端末が注目されており、特にコントロールプレーンにおけるトラフィック量の増加が懸念されている。

M2M/IoT 通信を行う端末の中には、従来の携帯端末とは異なり、通信データ量や通信頻度は少ないものの、それらの端末数が膨大になること、また、複数の端末からの通信が周期的かつ同期的に発生するというような通信特性を持つものがある。このような特徴を持つ M2M/IoT 端末をネットワークに接続する方法として、従来のセルラ無線とは異なる、Low Power, Wide Area (LPWA) [3] と呼ばれる、省電力でありかつ広域をカバーすることが可能な無線ネットワークが提案されている。非セルラ系 LPWA として、LoRa AllianceTM が提案する Long Range WAN (LoRaWANTM) [4]、及び SIGFOX 社が提案する SIGFOX [5]、Wi-Fi Alliance[®] が提案する Wi-Fi HaLowTM [6] などが存在しており、非セルラ系無線による M2M/IoT 通信収容の広がりが見られている。

しかしながら、LPWA の実現のためには、新たなインフラ網

を構築する必要があるなど、コスト面における課題が存在している。これに対し、従来のセルラ無線に M2M/IoT 端末を収容する方式では、既存のインフラ網を有効に活用できるという利点がある。また、LoRaWAN などの非セルラ LPWA では QoS の確保が難しいことや、レイテンシやデータ転送速度がセルラ無線と比較して劣ることなどが指摘されており [7]、M2M/IoT アプリケーションによってはセルラを利用することが望ましい場合があることが分かる。

その反面、多数の M2M/IoT 端末を収容すると、それらの端末の通信特性に起因する輻輳の問題が発生すると考えられている。そのため、従来の端末とは異なる接続方式を用いることが、3GPP 等の標準化団体などで検討されている [8]。既存の研究では、M2M/IoT 端末の収容のための様々な手法が提案されているが [9-12]、それらの多くは数学的な解析やシミュレーションにとどまっている。

我々の研究グループでは、この問題に対し、M2M/IoT 端末を収容することに適したモバイルコアネットワークについての研究を進めている [13, 14]。特に文献 [14] では、複数のモバイルコアネットワークアーキテクチャのモデルについて、待ち行列理論に基づく数学的解析を行い、数値例を挙げることによって性能評価を行っている。評価の際に必要な各ノードにおけるシグナリング処理負荷の重みは、LTE および Evolved Packet Core (EPC) ネットワークの C 言語による実装である OpenAirInterface (OAI) [15] における実装コードの命令文数から決定されている。しかし、実際のシグナリング処理は、実

装コードのコンパイル後に生成される実行コードによって行われるため、実装コードの命令文数が各ノードにおける実際のシグナリング処理負荷量に対して相関を持つとは限らない。また、命令文数の決定の際に、条件分岐が考慮されていない。そのため、モバイルコアネットワークを構成するノードの C/U プレーン分離や、各ノードへの資源配分方法を検討するためには、シグナリング処理負荷を実システム上で観測する必要がある。

本論文では、M2M/IoT 端末からの同時接続要求がモバイルコアネットワークに与える影響を実験的に評価する。まず、オープンソースのモバイルコアネットワーク実装を用いて、実験ネットワークを構築する。次に、複数のユーザ端末が接続要求を行う際の時間的同期幅を変化させながら、接続実験を行うことによって、複数のユーザ端末からの接続要求が集中することが、モバイルコアネットワークにおける性能に与える影響について議論する。

本論文の構成は以下の通りである。2. 章では、本論文において評価対象となるモバイルコアネットワークの構成、及びシグナリング手順について述べる。3. 章では、実験ネットワーク構成、設定内容、および実験手法と評価手法について述べる。4. 章では、3. 章で述べた実験環境下で行った実験の結果、また、それらの結果に基づく考察を行う。最後に、5. 章で本論文のまとめ、及び今後の課題について述べる。

2. モバイルコアネットワーク

2.1 ネットワーク構成

図 1 に、モバイルコアネットワークのノード、及びそれらを接続するインターフェースを示す。図中の各ノードは、以下に示すような機能を持つ。

- **User Equipment (UE):** スマートフォンやタブレット、M2M/IoT などの端末。
- **evolved Node Base (eNodeB):** UE や MME、S-GW と制御メッセージやユーザデータを交換する無線基地局。
- **Mobility Management Entity (MME):** UE の認証や無線圏内での UE ハンドオーバー、パケットのルーティング設定などを行うために必要となる、シグナリング処理における中核を担うノード。
- **Home Subscriber Server (HSS):** ユーザごとの契約情報や認証データ、端末の位置情報など、ユーザ固有の情報を管理するデータベースノード。
- **Serving Gateway (S-GW):** MME からの制御に基づいて、UE と P-GW の間で IP パケットの伝送を行うノード。UE が eNodeB 間を移動した際のアンカーポイントとしても機能する。
- **Packet Data Network Gateway (P-GW):** LTE ネットワークの外側 (“External IP network” と表記) と IP パケットを交換するノード。

特に、MME、HSS、S-GW、P-GW は、モバイルネットワークにおける主要な機能を担う Evolved Packet Core (EPC) を構成するノードである。それぞれのノードは、次に示すような、IP ネットワーク上に構築される論理的なインターフェースに

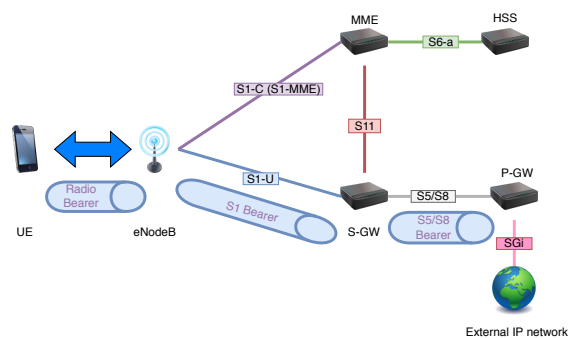


図 1 モバイルコアネットワーク

よって接続される。

- **S1-C (S1-MME):** eNodeB と MME を接続し、eNodeB 経由で MME と UE 間のメッセージを交換する制御プレーンインターフェース。
- **S1-U:** eNodeB と S-GW を接続し、eNodeB 経由で UE と S-GW 間の IP パケットを交換するデータプレーンインターフェース。
- **S6-a:** MME と HSS を接続し、認証情報や位置情報を交換する制御プレーンインターフェース。
- **S11:** MME と S-GW を接続し、UE ごとのベアラ情報などのメッセージを交換する制御プレーンインターフェース。
- **S5/S8:** S-GW と P-GW を接続し、IP パケットの伝達を行うデータプレーンインターフェース。
- **SGi:** P-GW と外部ネットワークを接続し、IP パケットの伝達を行うデータプレーンインターフェース。

2.2 シグナリング手順

図 1 に示されているモバイルネットワークにおいて、UE が外部 IP ネットワークと通信するには、UE と eNodeB、eNodeB と S-GW、S-GW と P-GW の間にそれぞれベアラを UE 毎に確立する必要がある。図 2 は、UE が通信を開始する前の、ベアラ確立のためのシグナリング手順を示したものである。この図にはいくつかの略語が使用されている。req., res. ans., cmp. はそれぞれ request, response, answer, complete を意味する。Ctx., Msg. はそれぞれ Context, Message の省略である。また、UE と eNodeB は単一のノードとして表現されているため、UE と eNodeB 間で行われるシグナリング処理は省略している。

この図に示されるように、UE が通信を開始する前には、多数のシグナリングメッセージの交換が行われている。特に、データパケットが小さく、周期的な通信を行うような M2M/IoT 端末を収容する場合、モバイルコアネットワークにおけるシグナリングメッセージ処理負荷の影響は相対的に大きくなる。そのため、C/U 分離やノードの仮想化などの手法を適用することにより、コストを削減することが求められる。

3. 実験環境

3.1 OpenAirInterface (OAI)

本論文における実験に使用するモバイルコアネットワーク、

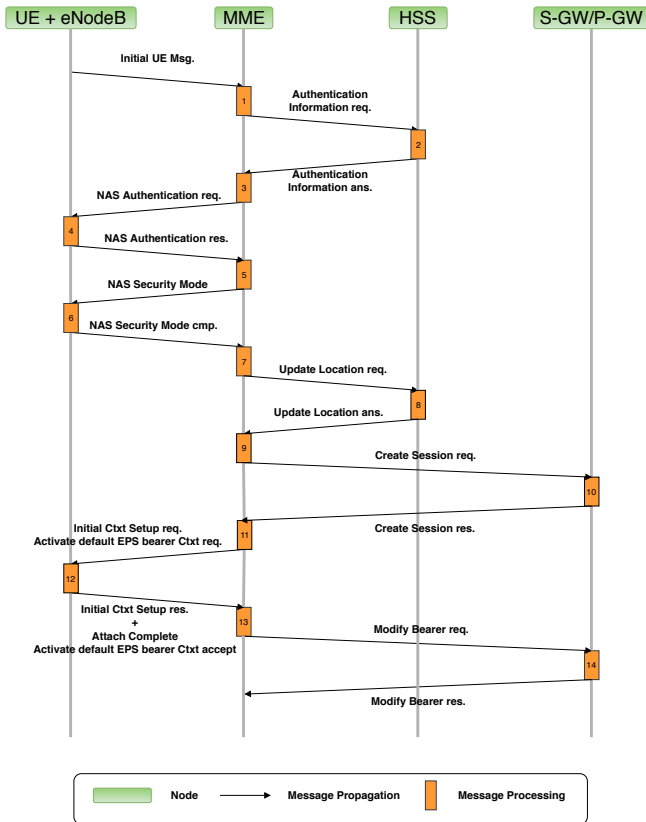


図2 アタッチ処理におけるシグナリング処理手順

UE や eNodeB などの実験環境は、LTE/EPC の実装である OAI を用いた。OAI は UE や eNodeB を実机上、もしくはエミュレータ上で動作させる機能と、EPC ノードをサーバ上で実現する機能を持つ。OAI では S-GW および P-GW の機能は単一のノードして実装されており、S5/S8 インターフェースはプロセス間通信によって実現されている。そこで、以降では S-GW と P-GW を併せて SP-GW と呼称する。

3.2 ネットワーク環境

図3に、実験環境におけるネットワーク環境を示す。MME, HSS, SP-GW は1台の仮想化ホスト上に作成された個別の仮想マシンにそれぞれインストールされている。仮想化ホストには、VMWare ESXi 6.0 update 2 を用いている。UE および eNodeB は、OAI に含まれる OAISIM と呼ばれるシミュレータによって実現した。また、複数の UE および eNodeB を動作させるために、Docker [16] コンテナを複数動作させ、それぞれのコンテナ上で1つずつ OAISIM を動作させた。以降では、これらのコンテナそれぞれを UE+eNodeB コンテナと表記し、コンテナを動作させているホストを Docker ホストと表記する。なお、現在の OAISIM の制限により、eNodeB は各 UE ごとに存在する。表1に、実験に用いた各ノードの仕様を示す。

各 UE+eNodeB コンテナは、Docker ホスト内に作成された単一の仮想ブリッジ (docker1) 上に接続される。docker1 ブリッジのアップリンクは、Docker ホスト内の eth2 ネットワークインターフェースに接続されており、各 UE+eNodeB コンテナは eth2 を通じて外部ネットワークと通信する。実験環境

は著者の所属する研究室内 LAN に構築しているが、他のトラヒックの影響を抑えるため、SGi を除くすべての LTE 論理インターフェースは研究室内 LAN から独立したセグメントに配置した。図3に示すネットワークのうち、192.168.3.0/22 は研究室内 LAN であり、SGi インターフェースが配置されている。172.1.0.0/16 は、S1-C/S1-U インターフェース用のネットワークセグメントである。192.168.4.0/24 は S6-a および S11 インターフェース用のネットワークセグメントである。

実験結果の評価は、パケットキャプチャ (tcpdump) から得られるパケットキャプチャデータを基に行う。パケットキャプチャは、次に示す2つのネットワークインターフェース上で行った。

- **MME 上の eth2:** S1-C インターフェースを通過する S1 Application Protocol (S1AP) シグナリングパケットの監視を行う。

- **Packet Capture Host 上の eth0:** S6-a インターフェースを通過する Diameter シグナリングパケット、及び S11 インターフェースを通過する GPRS Tunneling Protocol version 2 (GTPv2) シグナリングパケットの監視を行う。

パケットキャプチャデータには、実験中に S1-C, S1-U, S6-a, S11 インターフェースを通過するすべてのパケットが記録される。キャプチャされた各シグナリングパケットには、UE ごとの識別子が含まれているため、これらを用いて、UE ごとのベアラ確立時間の評価を行う。

また、2地点で取得されるパケットキャプチャデータのタイムスタンプのずれを抑制するため、MME と Packet Capture Host では Network Time Protocol (NTP) を用いた時刻の設定を行っている。具体的には、MME が NTP サーバとして稼働しており、Packet Capture Host は参照先 NTP サーバとして MME を選択している。また、他のノードの時計も同期させるため、HSS, SP-GW, Docker ホストも MME を NTP サーバとして参照している。UE+eNodeB コンテナは、Docker ホストと時計を共有することで時刻同期されている。

3.3 実験方法

本論文で行う実験では、複数台の UE からのバースト的な接続 (アタッチ) 要求が EPC ノードの性能とベアラ確立時間に与える影響を評価する。そのために、次に示す手順によって、複数の UE が短時間にアタッチ処理を開始する状況を実現する。

- (1) Docker ホストは、必要数の UE+eNodeB コンテナを起動させる。このとき、コンテナに T_{expect} なる値を環境変数として与える。
- (2) Docker ホストでは、リスナーと呼ばれるスクリプトを起動する。リスナーは、UE+eNodeB コンテナからの UDP パケットをリスナーの起動時点から 60 [sec] の間受信するプロセスを起動するスクリプトである。
- (3) 各コンテナは、eNodeB が起動する直前に、Docker ホストへ UDP パケットを1回送信する。パケット送信後、eNodeB を起動する。
- (4) Docker ホストは、UDP パケットを送信した UE+eNodeB コンテナに対し、UDP パケット受信処理

表 1 各ノードの仕様

Node Name	Operating System	Kernel Version	CPU Clock [GHz]	CPU Core	Memory Size [GB]
Docker host	Ubuntu 14.04 LTS	4.2.0-42-lowlatency	2.27	40	256
MME	Ubuntu 14.04 LTS	3.13.0-24-generic	1	1	1
HSS	Ubuntu 14.04 LTS	3.13.0-24-generic	1	1	4
SP-GW	Ubuntu 14.04 LTS	4.7.5	1	1	4

の終了後から 180 [sec] 後の時刻を同期時刻として通知する。

- (5) Docker コンテナは UE+eNodeB コンテナに対し、UE を起動するコマンドを実行するように指示する。
- (6) UE+eNodeB コンテナ上で動作する eNodeB は、Initial UE Msg. を送出するタイミングの調整を以下の手順により行う。
 - (a) $(0, T_{expect})$ [sec] の間のランダムな値を選択し、これを t_{adjust} とする。
 - (b) Docker ホストから通知された同期時刻と t_{adjust} の和で求められる時刻を、そのコンテナにおけるメッセージ送信時刻とする。
 - (c) メッセージ送信時刻まで待機した後、Initial UE Msg. を MME に送信する。

この方法により、複数の UE+eNodeB コンテナ上で動作している UE からのアタッチ要求メッセージ (図 2 における Initial UE Msg.) を、短時間に集中して MME に送信する。また、 T_{expect} の値を変化させることで、アタッチ要求メッセージの集中度を変化させることも可能である。

3.4 評価方法

実験において評価する UE のベアラ確立時間を、その UE の識別子が含まれる Initial UE Msg. が MME に到着した時刻と、同一の UE の識別子を含む Modify Bearer res. が MME に到着した時刻の差と定義する。ベアラ確立時間には、UE+eNodeB コンテナと MME 間、MME と HSS 間、MME と S-GW 間の伝搬遅延時間、及び MME, HSS, SP-GW, eNodeB におけるシグナリングメッセージ処理時間が含まれる。また、同様にして、図 2 内に示されている Message Processing の処理時間を、対応するパケットの到着時刻と送出時刻の差を用いて評価する。

4. 実験結果と考察

4.1 同期精度

3.3 節で記述した実験方法に従い、5 種類の T_{expect} を設定し、それぞれ 10 回の実験を行った。実験では、40 個の UE+eNodeB コンテナを用いた。表 2 は、UE+eNodeB コンテナに与えた T_{expect} に対して、実験で得られた実際の同期精度を示したものである。ここで、同期精度とは、実験中最初に MME に到着した Initial UE Msg. の到着時刻と、実験中最後に MME に到着した Initial UE Msg. の到着時刻の差である。表 2 に示す結果は、10 回の実験で得られた実際の同期精度の最小値と最大値である。表 2 に示す結果より、 T_{expect} の値に関わらず、実際の同期精度は T_{expect} [sec] に近い値が得られており、 T_{expect} の値によって、UE+eNodeB コンテナ内の UE

表 2 T_{expect} の値と実際の同期精度

T_{expect} [s]	Actual Synchronization Accuracy [ms]
0	$1.6 \times 10^1 - 9.6 \times 10^1$
0.25	$2.1 \times 10^2 - 2.5 \times 10^2$
0.5	$4.4 \times 10^2 - 5.0 \times 10^2$
0.75	$6.7 \times 10^2 - 7.5 \times 10^2$
1.0	$9.5 \times 10^2 - 1.1 \times 10^3$

からのアタッチ要求の集中度が変化することが分かる。

4.2 ベアラ確立時間

図 4 は、UE+eNodeB コンテナに与えた T_{expect} と、40 台の UE のベアラ確立時間の平均値を示したものである。図から、 T_{expect} が小さくなると、ベアラ確立時間が増加することが分かる。これは、40 台の UE からの接続要求が、より短い時間に集中して発生することによるものである。図 5 は、各 EPC ノードにおけるシグナリングメッセージ処理時間を、 T_{expect} の関数として示したものである。UE+eNodeB コンテナの処理時間は、UE および eNodeB の機能が OASISIM シミュレータで動作していることから省略している。HSS, SP-GW におけるシグナリングメッセージ処理時間は T_{expect} が小さくなるにつれてわずかに増加している一方で、MME におけるシグナリングメッセージ処理時間は T_{expect} が小さくなるにつれて大きく増加していることが分かる。具体的には、 $T_{expect} = 0$ [sec] のとき、 $T_{expect} = 1.0$ [sec] の場合と比較して、MME でのシグナリングメッセージ処理時間は約 510% 増加している。また、MME でのシグナリングメッセージ処理時間は、 $T_{expect} = 0.5$ [sec] 以上ではほぼ変化しないことが分かる。

4.3 MME におけるキュー長

図 6 は、MME におけるキュー長を、 T_{expect} の値ごとに示したものである。ここで、MME におけるキュー長は次の方法に従って計算した。

- ある時刻に MME にシグナリングパケットが到着した場合、その時刻における MME におけるキュー長を 1 加算する。
- ある時刻に MME からシグナリングパケットが送出された場合、その時刻における MME におけるキュー長を 1 減算する。

なお、本図においては 10 回の実験すべての結果をプロットしている。

図から、 T_{expect} の値が、MME におけるキュー長に影響を与えることが分かる。図 6(a) においては、MME におけるキュー長の変化に 2 つのピークが観測できる。1 つ目のピークは、40 台の UE からの初期接続要求メッセージ (Initial UE Msg.) が、短時間に集中して MME に到着することによって発生する。 T_{expect} が大きくなると、接続要求の集中度が低下するため、図 6(b) – 6(e) では 1 つ目のピークが徐々に消失している。図 6(a) に現れる 2 つ目のピークは、MME からの Initial Cttx Setup req. の送出が遅延することにより発生する。具体的には、MME に到着する Create Session res. の到着レートが、MME 上での Initial Cttx Setup req. の処理・送出レートを上回るため、MME におけるキュー長が増加する。2 つ目のピー

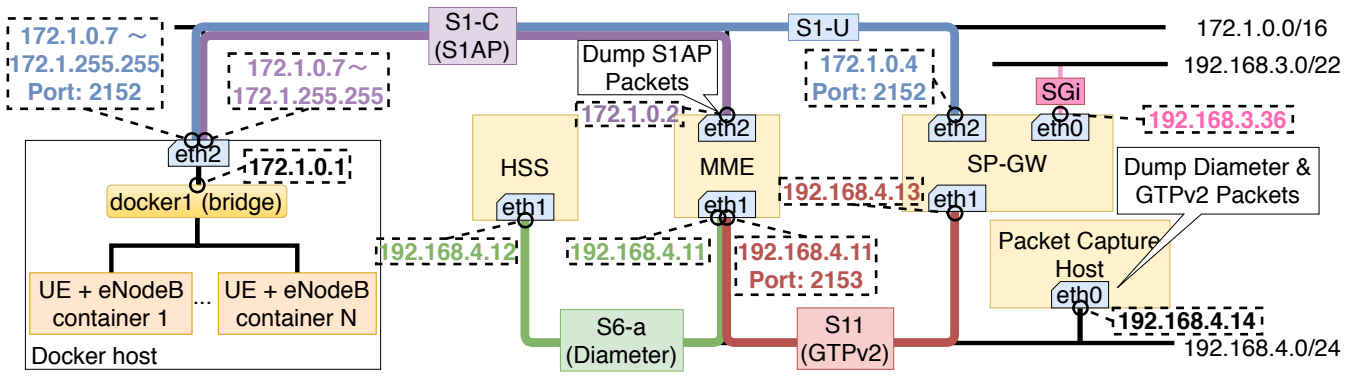


図3 実験ネットワーク環境

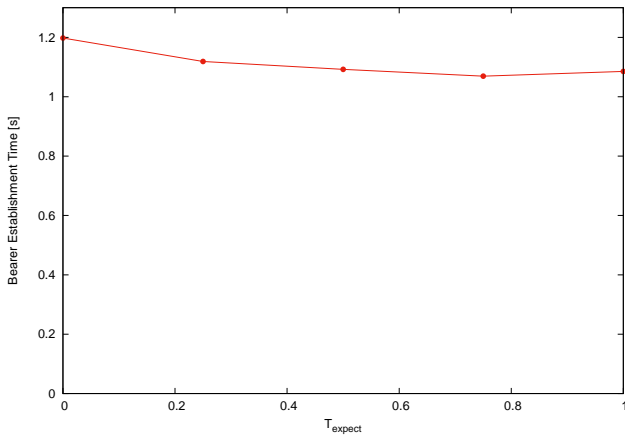


図4 ベアラ確立時間

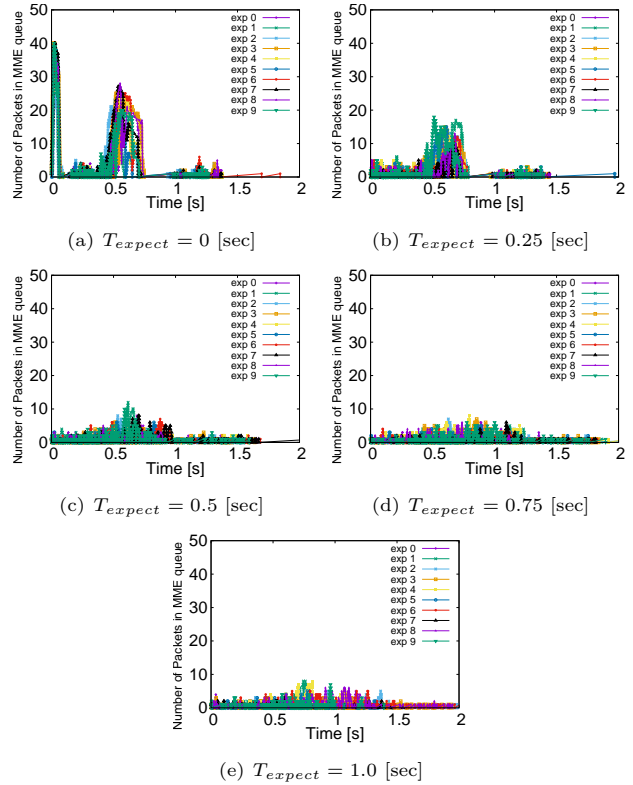


図6 MMEにおけるキュー長

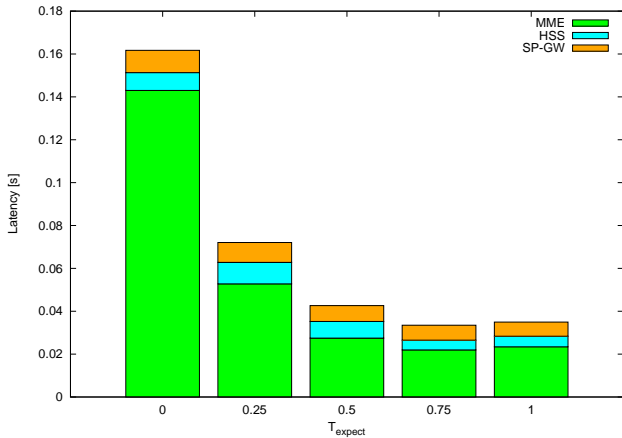


図5 EPC ノードにおけるメッセージ処理時間

ク値も1つ目のピーク値と同様に、 T_{expect} の値が増加するにつれて減少する。

4.4 考察

図5に示すように、ベアラ確立時間の増加の主な要因は、MMEにおけるシグナリングメッセージ処理時間の増加である。さらに、図6に示すように、MMEにおけるキュー長の増加が、シグナリングメッセージ処理時間に大きな影響を与える。これらの結果は40台のUEによるものであることから、更に多数のUEの収容を考慮すると、MMEにおけるメッセージ処

理時間の増加は、重大な問題になると考えられる。M2M/IoT端末の中には、通信の際の packet size が小さいという特性を持つものが存在することから、ベアラ確立時間の増加は通信の際の大きなオーバーヘッドになることが考えられる。

MMEでの処理負荷の増大に対処する最も単純な方法として、MMEに割り当てる資源量を増強することが挙げられる。しかしながら、多くのM2M/IoT端末は従来の端末よりもAverage Revenue Per Unit (ARPU)が小さいため、資源量の増強のコストを回収することは困難であると考えられる。例えば、文献[17]では、M2M/IoT端末のARPUは2.20ドル/月であると示されている。さらに、M2M/IoT端末の中には周期的な通信を行うものが存在しており、すべての端末が常にネットワークを利用するとは限らない。これらの理由により、ネットワークに接続されるUE数が少なくなった場合に、増強した資源が使用されず、無駄になることも考えられる。従って、資源量の

増強は、ネットワークオペレータにとって常に望ましい方法であるとは言えない。従って、M2M/IoT 端末の収容を考慮した場合には、サーバの仮想化や最適な資源分配、Software Defined Networking (SDN) 技術を用いた C/U プレーン分離などの方法を採用することが、より重要であると考えられる。

上記の問題に対処する別の方法として、UE からの接続要求を意図的に分散させることが考えられる。実験結果に示すように、UE からの接続要求の集中度を軽減させることにより、MME でのシグナリングメッセージ処理時間を大きく減少させることが可能である。従って、多数の M2M/IoT 端末をモバイルコアネットワークに収容する場合にも、 T_{expect} の値を増加させることにより、MME の負荷を軽減することが可能であると考えられる。しかしながら、接続要求の分散のために T_{expect} を導入することにより、実際の MME の負荷に関わらず、M2M/IoT 端末からのデータ送信に一定の遅延が生じる。具体的には、平均で $T_{expect}/2$ [sec] 遅延することになる。従って、 T_{expect} によるベアラ確立時間の削減が、データ送信の遅延に見合うかどうかを議論する必要がある。図 5 より、MME でのシグナリングメッセージ処理時間は、 T_{expect} が 0.5 [sec] 以上の場合、 $T_{expect} = 0$ [sec] の場合と比較して、およそ 0.1 [sec] 減少している。しかしこの場合、端末からのデータ送信は平均で 0.25 [sec] 以上遅延することになるため、 T_{expect} を 0.5 [sec] 以上に設定することは、本実験環境において 40 台の UE を収容する場合には適さないことが分かる。一方で、 $T_{expect} = 0.25$ [sec] とした場合、UE からのデータ送信は平均で 0.125 [sec] 遅延するものの、MME でのシグナリングメッセージ処理時間はおよそ 0.1 [sec] 減少する。従って、40 台の UE を収容する場合には、 $T_{expect} = 0.25$ [sec] とすることがより適切であると考えられる。これらは、本論文における実験環境下での結果であり、適切な T_{expect} の設定値は、収容される端末数や、コアノードに割り当てられる資源量など、様々な要因によって変化することが考えられる。

5. まとめと今後の課題

本論文では、M2M/IoT 端末からのバースト的なアクセスの影響を評価するため、モバイルコアネットワークの実験的な評価を行った。まず、モバイルコアネットワーク及びエミュレータ上で動作するユーザ端末のオープンソース実装に基づく実験環境を構築した。次に、UE からの接続要求が集中する状況を想定した実験を行い、ベアラ確立時間や各ノードにおけるシグナリング処理時間を評価した。その結果、UE からの集中した接続要求により、MME での処理時間が最大でおよそ 510% 増加することが分かった。また、この処理時間の増加は、主に MME におけるキュー長の増加によって発生することが分かった。

今後の研究方針として、本論文で行った実験よりも多くの UE からの同時アクセス要求の影響を実験的に評価することが挙げられる。これにより、より現実に近い環境下で、シグナリング処理負荷を評価するとともに、多数の UE を収容する際に必要となる MME の資源量の見積もりが可能になると考え

る。また、実験結果から、シグナリング処理時間のモデル化を行い、我々の研究グループによる数学的解析によるモバイルコアネットワークの性能評価へ適用することを考えている。さらに、M2M/IoT 端末を収容するための様々な方式の効果を実験的に評価することも考えている。

文 献

- [1] D. Astely, E. Dahlman, A. Furuskär, Y. Jading, M. Lindström and S. Parkvall: "LTE: the evolution of mobile broadband", IEEE Communications Magazine, **47**, 4, pp. 44–51 (2009).
- [2] P. Marsch, I. D. Silva, O. Bulakci, M. Tesanovic, S. E. E. Ayoubi, T. Rosowski, A. Kalokylos and M. Boldi: "5G Radio Access Network Architecture: Design Guidelines and Key Considerations", IEEE Communications Magazine, **54**, 11, pp. 24–32 (2016).
- [3] U. Raza, P. Kulkarni and M. Sooriyabandara: "Low Power Wide Area Networks: An Overview", IEEE Communications Surveys Tutorials, **PP**, 99, pp. 1–1 (2017).
- [4] L. Alliance: "LoRaWAN-what is it?", A technical overview of LoRa and LoRaWAN (2015).
- [5] "Sigfox - The Global Communications Service Provider for the Internet of Things (IoT)", available at <https://www.sigfox.com>.
- [6] "Wi-Fi HaLow", available at <https://www.wi-fi.org/discover-wi-fi/wi-fi-halow>.
- [7] R. S. Sinha, Y. Wei and S.-H. Hwang: "A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT", ICT Express, **3**, 1, pp. 14–21 (2017).
- [8] Third Generation Partnership Project, TS45.820, V13.1.0: "Cellular System Support for Ultra-low Complexity and Low Throughput Internet of Things (CIoT)" (2015).
- [9] A. Tawbeh, H. Safa and A. R. Dhaini: "A Hybrid SDN/NFV Architecture for Future LTE Networks", Proceedings of 2017 IEEE International Conference on Communications (ICC), pp. 1–6 (2017).
- [10] A. Basta, W. Kellerer, M. Hoffmann, H. J. Morper and K. Hoffmann: "Applying NFV and SDN to LTE Mobile Core Gateways, The Functions Placement Problem", Proceedings of the 4th Workshop on All Things Cellular: Operations, Applications, & Challenges, ACM New York, NY, USA, pp. 33–38 (2014).
- [11] Z. A. Qazi, V. Sekar and S. R. Das: "A Framework to Quantify the Benefits of Network Functions Virtualization in Cellular Networks", CoRR, **abs/1406.5634**, (2014).
- [12] F. Yousaf, J. Lessmann, P. Loureiro and S. Schmid: "Soft-EPC, Dynamic Instantiation of Mobile Core Network Entities for Efficient Resource Utilization", Proceedings of Communications (ICC), 2013 IEEE International Conference on, pp. 3602–3606 (2013).
- [13] G. Hasegawa and M. Murata: "Joint Bearer Aggregation and Control-Data Plane Separation in LTE EPC for Increasing M2M Communication Capacity", 2015 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), pp. 1–6 (2015).
- [14] S. Abe, G. Hasegawa and M. Murata: "Effects of C/U Plane Separation and Bearer Aggregation in Mobile Core Network", IEEE Transactions on Network and Service Management, **15**, 2, pp. 611–624 (2018).
- [15] "OpenAirInterface", available at <http://www.openairinterface.org>.
- [16] "Docker - Build, Ship, and Run Any App, Anywhere", available at <https://www.docker.com/>.
- [17] S. Kechiche: "Cellular M2M forecasts and assumptions: 2010-2020", Technical report, GSMA Intelligence (2014).