

モバイルコアネットワークにおける M2M 通信集約手法の解析的評価

長谷川 剛[†] 村田 正幸^{††}

[†] 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 1-43

^{††} 大阪大学 大学院情報科学研究科 〒 565-0871 大阪府吹田市山田丘 1-5

E-mail: †hasegawa@cmc.osaka-u.ac.jp, ††murata@ist.osaka-u.ac.jp

あらまし 本報告では、モバイルコアネットワークにおける M2M 通信負荷を軽減する手法として通信集約に着目し、通信集約がモバイルコアネットワークの負荷や M2M 通信の特性に与える影響を明らかにする。具体的には、通信集約を行う箇所の違いや、集約の度合いが通信のためのベアラ確立にかかる時間に与える影響を数学的に解析し、集約によって軽減されるモバイルコアネットワークの処理負荷や、M2M 通信に新たに発生する遅延時間の特性を評価する。数値評価の結果、通信集約を行うことでモバイルコアネットワーク内のノードの処理負荷が軽減するため、ベアラ確立にかかる時間が小さくなり、モバイルコアネットワークが収容可能な端末数が増加することを明らかにした。特に、MME の処理能力が十分大きい場合に、S-GW において通信集約を行うことで、モバイルコアネットワークが収容可能な端末数を約 6 倍にできることを示した。

キーワード モバイルコアネットワーク、Evolved Packet Core (EPC)、Machine-to-Machine (M2M) 通信、通信集約、コントロールプレーン

Performance analysis of aggregation method for machine type communications in mobile core networks

Go HASEGAWA[†] and Masayuki MURATA^{††}

[†] Cybermedia Center, Osaka University

1-43, Machikaneyama-cho, Toyonaka, Osaka 560-0043, Japan

^{††} Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

1-5 Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871, Japan

E-mail: †hasegawa@cmc.osaka-u.ac.jp, ††murata@ist.osaka-u.ac.jp

Abstract In this report, we focus on the aggregation method for the M2M communications in the mobile core networks to decrease the control plane overhead in the network. We give the mathematical analysis for the bearer establishment latency for each M2M terminal to begin the data transmission. The objective of the analysis is to reveal the effect of the aggregation method on additional load on the mobile core network and the communication performance of M2M terminals. Through numerical results we present that we can decrease the load of the mobile core networks by the aggregation method and reduce the bearer establishment latency. Especially, when we assume enough processing performance for MME, we can increase the capacity of the mobile core network by around six times in terms of the number of accommodated M2M terminals.

Key words Mobile core networks, Evolved Packet Core (EPC), Machine-to-Machine (M2M) Communication, bearer aggregation, Control plane

1. はじめに

携帯電話加入者数の増加や高機能なスマートフォン等の普及により、3G や LTE などのモバイルネットワークにおいて、データプレーンとコントロールプレーンの双方において発生する輻輳への対応が課題となっている。ユーザトラフィックの増

大にともなうデータプレーンの輻輳に対しては、WiFi 等の他ネットワークへのトラフィックオフロードが研究・実用とも進んでいる [1-5]。しかし、このようなトラフィックオフロードはコントロールプレーンの負荷軽減にはほとんど寄与しない。

また、スマートフォンの常駐アプリケーションが定期的に発生させる制御メッセージの通信がモバイルネットワークを圧迫していることが大きな問題となっている。加えて、モバ

インターネットワークの新たな需要拡大を伴う通信形態として、Machine-to-Machine (M2M) 通信が着目されている。M2M 通信は、従来端末のとはその通信特性は大きく異なり [6]、通信データ量は小さいが、端末数が膨大になるとされている。そのため、M2M 通信を行う端末 (以下では M2M 端末と呼ぶ) を従来の携帯電話端末と同じ方式でモバイルネットワークに接続すると、特にコントロールプレーンの輻輳が悪化すると考えられる。M2M 通信の輻輳問題については [7, 8] などでも検討が行われている。

スマートフォンのようなユーザ端末のトラヒックはユーザの端末操作に応じて発生し、通信に発生する遅延時間に対する要求条件が厳しい。一方、M2M 端末が発生させる通信の多くは間欠的、定期的であり、遅延時間に対する制約はユーザ端末に比べると緩い。そのため、M2M 通信に対して制御を加えることで、モバイルコアネットワークの負荷を軽減する手法が検討されている。例えば、文献 [9] では、M2M 端末に要求される機能に限定して端末の通信モジュールを構成し、プロトコルを簡素化することで、端末およびモバイルネットワークの負荷を低下させることを提案している。文献 [10] では、LTE ネットワークに M2M 端末をできるだけ多く、かつ、通信品質を維持しながら収容するための、通信受付制御及びスケジューリング手法を提案している。

また、全ての端末をモバイルネットワークに直接接続するのではなく、端末をグループ化し、グループ内の端末間の通信は Device-to-Device (D2D) 通信 [11] や近距離無線通信などの他の通信手段を用いて行い、モバイルネットワークへの接続はグループを単位として行う、グループ化通信の検討が行われている [12]。これにより、モバイルネットワークで処理される端末、及びベアラ数そのものが削減されることが期待される。また、同様の通信集約をモバイルネットワーク内で行うために、通信集約の機能をモバイルネットワークのノードへ導入し、基地局やゲートウェイノードで処理される複数端末のベアラを 1 本のベアラに集約することで、端末の修正を必要とせずと同様の効果が得られると考えられる。

上述のような通信集約によるネットワークの負荷軽減の度合は、集約を行う場所に依存する。一般的には、端末に近い箇所で通信集約を行うことによって、ネットワークの広い範囲での負荷軽減が期待される。例えば、端末のグループ化による通信集約を行うことによって、モバイルネットワーク全体におけるベアラ数を低減することができる。また、より端末に近い箇所で集約を行う場合、集約箇所において処理しているベアラや端末の数が少ないため、通信集約のための処理負荷が小さいことも利点として挙げられるが、集約処理を行う機能を多くの箇所へ導入する必要がある。一方、通信集約の欠点として、集約箇所において決められた集約の度合に達するまで通信の到着を待つことによって、端末の通信に新たな遅延時間が発生することが挙げられる。この遅延時間は、集約の度合、及び集約箇所における通信の到着頻度に依存して変化し、より端末に近い箇所で集約を行うと、遅延時間が大きくなる。

また、集約効率、ネットワークの負荷軽減、および遅延時間の間にある上述のようなトレードオフ関係は、ネットワークの構成や収容される端末の分布などによっても変化する。例えば、ある基地局に収容されている端末が、異なるゲートウェイを通じて外部ネットワークに接続する場合、それらの通信のベアラを基地局で集約することはできないため、集約効率は低下する。このような場合には、ゲートウェイにおいて集約を行うことで、複数の基地局から 1 つのゲートウェイにやってくるベアラを集約することができるため、集約効率は高くなるが、上述したようにネットワークの負荷軽減の度合が小さくなる。

このように、通信集約によってモバイルネットワークの負荷を軽減する手法には複雑な特性があり、端末の通信特性、集約を行う場所や集約の度合などが、その性能に大きな影響を与える。しかし、既存の研究においては、このような特性は明らかになっておらず、通信集約のためのパラメータ設定に関する指針が存在しない。そこで本報告では、モバイルネットワークにおける M2M 通信の集約の際のパラメータを決定するために、通信集約がモバイルネットワークの負荷や M2M 通信の特性に与える影響を明らかにする。具体的には、端末のグループ化を行う場合やモバイルネットワーク内のノードにおいて集約を行

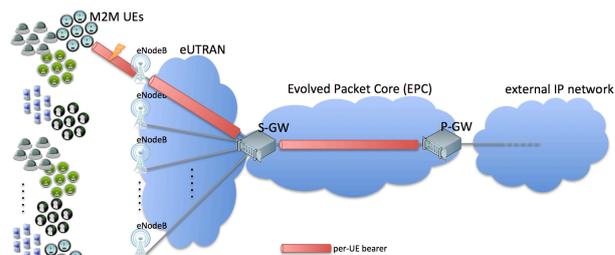


図1 ネットワークモデル

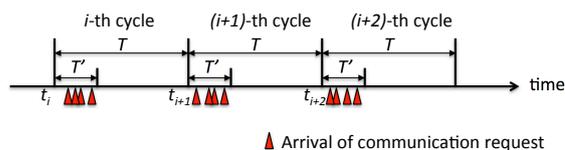


図2 端末の通信モデル

う場合等の、集約箇所の違いや、集約の度合が性能に与える影響を数学的に解析し、集約によって軽減されるモバイルネットワークの処理負荷や、M2M 通信に新たに発生する遅延時間の特性を評価する。最後に、解析結果を基に、収容される M2M 端末の通信特性やネットワーク構成に応じて、適切な集約箇所を選択し、集約の度合を決定するための指針を与える。

2. システムモデル

2.1 ネットワークモデル

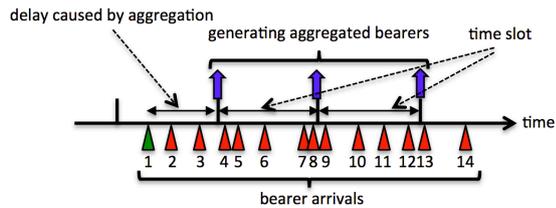
本報告で用いるネットワークモデルを図 1 に示す。ネットワークモデルは、通信を行う M2M 端末群 (M2M UEs)、無線ネットワーク、端末が接続する基地局と端末のモビリティ管理のためのアンカーポイントとなる Serving GateWay (S-GW) を接続する evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (eUTRAN)、S-GW と外部ネットワークとの接続点となる Packet data network GateWay (P-GW) を接続する Evolved Packet Core (EPC) と呼ばれるコアネットワークから構成される。図中には示していないが、EPC には Mobility Management Entity (MME) や Policy and Charging Rules Function (PCRF) などのノードも存在する。一般には S-GW 及び P-GW はネットワーク中に複数存在し、端末の設定内容によって接続される S-GW 及び P-GW が決定される。

図 1 には、1 台の端末が通信を行うために設定されるベアラの様子をあわせて示している。端末からの通信が発生すると、端末はまず eNodeB との間に無線接続を確立する。その後、eNodeB は MME などが保有する端末情報に基づいて、その端末の通信に用いる S-GW および P-GW を決定し、無線ベアラを S-GW との間に確立する。さらに、S-GW は P-GW との間にベアラを確立し、端末に払い出される IP アドレスを取得する。これにより、端末が外部の IP ネットワークに到達可能となる。

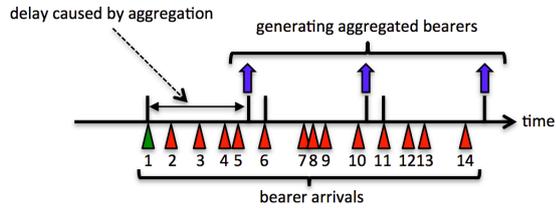
ベアラは端末毎に設定され、通信の有無やその量に関係なく維持される。そのため、モバイルネットワークに接続される端末数が増加すると、ネットワーク内のベアラ数が増加し、それにもなうシグナリントラヒックの処理負荷が増大する。特に、M2M 端末はその数が膨大であるため、M2M 端末をモバイルネットワークに収容するためには、ネットワークの処理負荷を軽減することが重要である。

2.2 端末の通信モデル

本報告においては、M2M 端末から発生する情報を、モバイルネットワークを介して収集するアプリケーションを想定する。各端末は定期的な通信を行い、その周期を T とする。また、各端末は、図 2 に示すように、周期 T の開始から時間 T' ($T' \leq T$) の間に、必ず一度通信が発生させるものとする。



(a) 定期的に集約する場合



(b) 1本目が到着してからの時間経過に応じて集約する場合

図3 通信集約の方法

$T' = T$ の場合には、端末は周期 T 内ののいずれかの時刻に通信を発生させる。本通信モデルは、スマートメータからの情報収集のように、通信に発生する遅延時間の許容値に上限が存在するような端末の通信を想定して構築している。

端末は指定された時間間隔中で、一様分布に従うタイミングで通信を発生させるものとする。そのため、 i 番目の周期の開始時刻を t_i とし、端末が i 番目の周期において、時間幅 $[t_i, t_i + T']$ ($t_i \leq t \leq t_i + T'$) の間に通信を発生させる確率を $p_i(t)$ とすると、 $p_i(t)$ は以下のような分布を持つ。

$$p_i(t) = \frac{t - t_i}{T'} \quad (1)$$

3. 通信集約手法

本章では、本報告において着目している通信集約手法の概要を説明する。最初に、集約手法の概要、および集約によって発生する遅延時間について説明する。次に、集約箇所として3箇所を想定し、それぞれの箇所によって集約を行うことによって得られる利点と欠点について論じる。

3.1 通信集約手法の概要

図3に、ある集約箇所において到着した通信が集約される様子を示す。通信集約により、ネットワーク内に存在するベアラ数を削減できるため、コアネットワークの処理負荷を軽減することができる。一方、本集約手法においては、端末から発生する通信のデータ量そのものを削減することは考慮していないため、ユーザプレーンにおける処理負荷を改善することはできない。

本研究では、通信集約の方法として、図3(a)に示すような、端末の通信周期、通信が到着する端末の台数、及び集約率から決定された間隔(以下ではタイムスロットと呼ぶ)で定期的集約を行う方法、及び、図3(b)に示すような、前回の集約の直後に通信が到着してから、タイムスロットに相当する時間が経過した時点で集約する場合を考える。

これらの集約方法は、集約度に相当する本数に応じて集約する場合に比べて、集約される本数が一定にならない欠点を持つが、一方で、集約で発生する遅延時間が一定値を超えないという利点がある。

本研究においては、集約度を、1つにまとめる通信数と定義する。図3は、集約度を4とする場合を示している。図3(a)は、端末台数に応じて、平均的な集約度が4になるようにタイムスロット長を設定し、定期的集約を行っている様子を表している。図に示すように、通信到着のタイミングによっては、集約度が4とならない場合がある。図3(b)は、前回の集約直後に通信が到着してから、上述のタイムスロット長に相当する

時間が経過した時点で集約を行う集約を行う様子を表している。この場合においても、集約される通信の本数が集約度に一致しない場合がある。

通信集約には、集約のために遅延時間が発生することが欠点として挙げられる。図3においては、1番目に到着した通信(緑の三角)が、集約処理されるまでに発生する遅延時間をあわせて示している。1章において述べたように、遅延時間の大きさは集約箇所や端末の通信特性に影響を受ける。

3.2 集約箇所と通信集約性能の関係

S-GW において通信集約を行う様子を図4(a)に示す。本手法においては、S-GW と P-GW の間のベアラを、eNodeB と S-GW との間のベアラに対して1対1に設定するのではなく、eNodeB と S-GW との間の複数のベアラに対して1本のベアラを用いる。集約された通信は P-GW で元の複数端末からの通信に戻される。この集約により、S-GW と P-GW の間のベアラ数を低減することが可能となり、S-GW や P-GW の処理負荷が軽減される。eNodeB の通信処理負荷は変化しないが、S-GW と P-GW の処理負荷をさらに軽減するために、集約するか否かの判断を eNodeB が行い、その結果を S-GW との通信の際に通知を行うことが考えられる。この場合には eNodeB の処理負荷が増大する。また、異なる eNodeB に接続された端末からの通信を集約することができる。しかし、eNodeB と S-GW との間のベアラ数は削減されないため、モバイルネットワークの処理負荷の軽減度は限定的である。

eNodeB において通信集約を行う様子を図4(b)に示す。本手法においては、eNodeB に収容された端末からの通信を集約する。この場合、eNodeB での集約に関する情報を P-GW に通知する必要がある。S-GW では、eNodeB からの通信は1台の端末からに見えるため、処理負荷は増大しない。集約により、eNodeB と S-GW の間に設定される無線ベアラ数を削減することができる。また、それにとまない、S-GW と P-GW の間に設定されるベアラ数も合わせて削減されるため、S-GW における集約に比べて、モバイルネットワーク全体でのベアラ数の削減効果が大きいの。一方、集約の対象となる端末が、それぞれの eNodeB に収容された端末に限られるため、集約の割合を大きくすることは、遅延時間の増大を伴う。また、異なる S-GW 及び P-GW を用いて通信を行う端末を1つのベアラに集約することはできないため、集約の効率が低下する。

端末のグループ化を行うことによる通信集約を行う様子を図4(c)に示す。本手法は、全ての端末をモバイルネットワークに直接接続するのではなく、端末をグループ化し、選択された代表端末やグループ内に新たに設置するゲートウェイ端末が、モバイルネットワークへの通信を集約して行う。グループ内の端末間通信は Bluetooth 等の近距離通信を用いて行う。本手法は、端末が無線ネットワークに接続を開始する前段階で集約を行うため、eNodeB、S-GW、P-GW などに新たな処理負荷が発生せず、プロトコルの修正も不要であることが利点として挙げられる。また、端末と eNodeB 間で接続されるベアラ数が削減されるため、モバイルネットワークのベアラ数削減だけではなく、無線ネットワークの資源の利用量も削減することができる。一方、集約の対象となる端末数が、3つの手法の中で最も小さくなるため、集約のために発生する遅延時間が大きくなる。また、端末が近距離通信を行うためのネットワークデバイスを提供することも求められる。

3.3 ベアラ確立手順

本節では、LTE においてアイドル状態からアクティブ状態になる際の、ベアラを確立する際のシグナリング手順に基づき、S-GW および eNodeB で集約を行う方法、及び、それに基づいた性能解析方法をまとめた。なお、通信集約を行わない場合のアタッチ時及び通信時のシグナリング手順については、[13] に基づいている。また、UE がネットワークにアタッチする際の手順についても、通信集約を行う場合には手順の変更が必要であるが、本報告においては性能解析の対象としてないため省略する。

図5(a)に、通信集約を行わない場合における、通信時のベアラ確立手順を示す。UE に通信が発生し、その状態がアイドルからアクティブになる際には、まず UE と eNodeB の間で RRC コネクションを確立し、それを利用して MME に対して

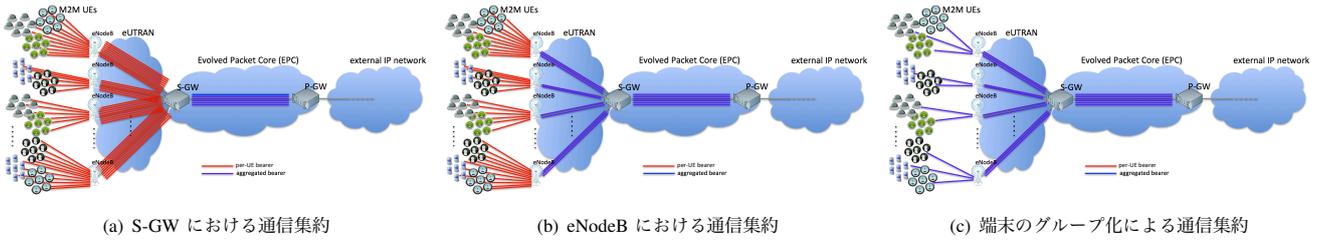


図4 集約箇所が通信集約効率に与える影響

ネットワークサービスに対する要求を送信し、認証処理が行われる。次に、通常の手順においては、MMEはS-GWに対してそのUEに対応するS5/S8ベアラのアクティブ化に関するリクエストを送信する。

3.3.1 S-GWで集約する場合

図5(b)に、S-GWで通信集約を行う場合を示す。この場合は、MMEがS5/S8ベアラのアクティブ化を直ちに行うのではなく、集約本数に応じた時間だけ待機してから、通信要求が発生した複数のUEに1つのS5/S8ベアラを対応付け、アクティブ化を行う。その際、MMEは集約された複数のUEとS5/S8ベアラの対応関係を管理し、それをS-GW及びP-GWに通知する。その後、従来手法と同じ手順でS1ベアラ(eNodeBとS-GW間のベアラ)がUE毎に確立され、UE群の packets 送受信が行われる。

3.3.2 eNodeBで集約する場合

図5(c)に、eNodeBで通信集約を行う場合における、通信時のベアラ確率手順を示す。まずUEとeNodeBの間でRRCコネクションを確立し、その後集約本数に応じた時間だけ待機してから、通信要求が発生した複数のUEに1つのS5/S8ベアラを対応付け、アクティブ化を行う。その後、アクティブ化したS5/S8ベアラに対応するS1ベアラを1本設定する。その際、RRCコネクションの集約されたUE群とベアラの関係はP-GW及びeNodeBで管理される。一方、S-GWでは集約されたUE群に対する1組のベアラを用いた packets 中継となるため、従来手法と同等である。

3.3.3 端末グループ化を行う場合

端末をグループ化することで集約を行う場合は、グループ内の1台のUEがLTEネットワークに接続する。そのため、LTEコアネットワークのベアラ確立手順の変更は不要となる。

4. 性能解析

本章では、通信時のベアラ確立にかかる時間の解析結果を示す。ベアラ確立時間は、通信手順において発生する遅延時間 T_* と、通信集約のために待たされる時間 L_A の和となる。

4.1 通信手順において発生する遅延時間

まず、通信手順において発生する遅延時間 T_* の導出方法を示す。シグナリングメッセージが各ノード間を伝播するためにかかる伝播遅延時間を、UE-eNodeB間は τ_{ue} 、eNodeB-MME間は τ_{em} 、MME-SGW間は τ_{ms} 、eNodeB-SGW間は τ_{es} 、SGW-PGW間は τ_{sp} と定義する。これらの値はネットワーク構成によって決定されるため、通信集約手法の有無には影響を受けない。また、各ノードで1つのシグナリングメッセージを処理するのにかかる処理時間を、UEは t_u 、eNodeBは t_e 、MMEは t_m 、SGWは t_s 、PGWは t_p とする。これらの値は各ノードの処理能力と処理負荷によって決定される。決定方法は後述する。

図5に示した各手法における通信手順を基に、各手順において必要となる時間を導出し、それを総和することによって求める。紙面の都合上詳細は省略するが、通信集約を行わない場合における通信時のベアラ確立にかかる時間 T_{na} は下記のように導出される。

$$T_{na} = L_{RRC} + (4t_u + 4t_e + 8t_m + 5t_s + 3t_p) + (10\tau_{ue} + 10\tau_{em} + 5\tau_{ms} + 5\tau_{sp})$$

また、SGWにおいて通信集約を行う場合における通信時のベアラ確立にかかる時間 T_{as} は下記のように導出される。

$$T_{as} = L_{RRC} + L_A + (4t_u + 4t_e + 7t_m + 5t_s + 3t_p) + t_{ma} + t_{sa} + t_{pa} + (10\tau_{ue} + 10\tau_{em} + 5\tau_{ms} + 5\tau_{sp})$$

さらに、eNodeBにおいて通信集約を行う場合における通信時のベアラ確立にかかる時間 T_{ae} は下記のように導出される。

$$T_{ae} = L_{RRC} + L_A + (4t_u + 4t_e + 6t_m + 5t_s + 2t_p) + 3t_{ma} + t_{sa} + t_{pa} + t_{ea} + (10\tau_{ue} + 10\tau_{em} + 5\tau_{ms} + 5\tau_{sp})$$

ここで L_{RRC} は、RRCコネクションの確立にかかる時間とする。

4.2 ノードの処理遅延時間

次に、ノードの処理遅延時間 t_* の導出方法を示す。各ノードにおいてシグナリングメッセージを処理するためにかかる時間は、シグナリングメッセージの到着頻度とノードの処理能力に基づき、待ち行列モデルを用いて導出する。これにより、通信集約にともなって変化する各ノードにおけるシグナリング処理頻度がベアラ確立時間に与える影響を評価する。ここでは、簡単のために、ノードで行われる処理はシグナリングメッセージの到着の際に発生し、処理の内容に関わらず、ノードにかかる負荷は同じであると仮定する。

まず、図5に示した手順から、それぞれの手法において、UEのベアラ確立のために必要となる、各ノードにおける処理回数を導出した。ただし、手順の最初にあるRRCコネクションの確立にかかる処理は除いた。集約を行わない場合においては、1台のUEあたり、UEで4回、eNodeBで4回、MMEで6回、SGWで5回、PGWで2回の処理が発生する。したがって、 K 台のUEのベアラ確立のために必要な処理回数は、UEで $4K$ 回、eNodeBで $4K$ 回、MMEで $8K$ 回、SGWで $5K$ 回、PGWで $3K$ 回となる。SGWで集約度が K の集約を行う場合において、1本に集約される全てのUEのベアラ確立のために必要となる、各ノードにおける処理回数は、UEで $4K$ 回、eNodeBで $4K$ 回、MMEで $(7K+1)$ 回、SGWで $(K+5)$ 回、PGWで $(K+3)$ 回となる。ただし、集約のためにMME、SGW、及びPGWで新たに発生する処理負荷は、集約度 K に比例した大きさであるとする。eNodeBで集約度が K の集約を行う場合において、1本に集約される全てのUEのベアラ確立のために必要となる、各ノードにおける処理回数は、UEで $4K$ 回、eNodeBで $(4K+1)$ 回、MMEで $(6K+2)$ 回、SGWで $(K+5)$ 回、PGWで $(K+3)$ 回となる。ただし、集約のために新たに発生する処理負荷は、集約度 K に比例した大きさであるとする。

これらの結果から、集約を行うことによって、特にSGW、PGWでのシグナリング処理回数が大きく削減されることがわかる。これはGW間のベアラ数が集約度に応じて削減されるためである。

上述の処理回数と、コアネットワークが収容するUEの総数と、各UEの通信頻度を与えることで、各ノードでのシグナリング処理頻度を与えることができる。

各ノードにおいて必要となる処理時間は、並列数 r のM/G/1/PS待ち行列モデルを用いて導出する。M/G/1/PS待ち行列モデルにおいて、ジョブの到着率を λ 、ワークロード分布を $S(x)$ 、システム利用率を $\rho = \lambda \cdot E[S]$ とすると、リクエストがサーバに到着してから、サービスが終了するまでの平

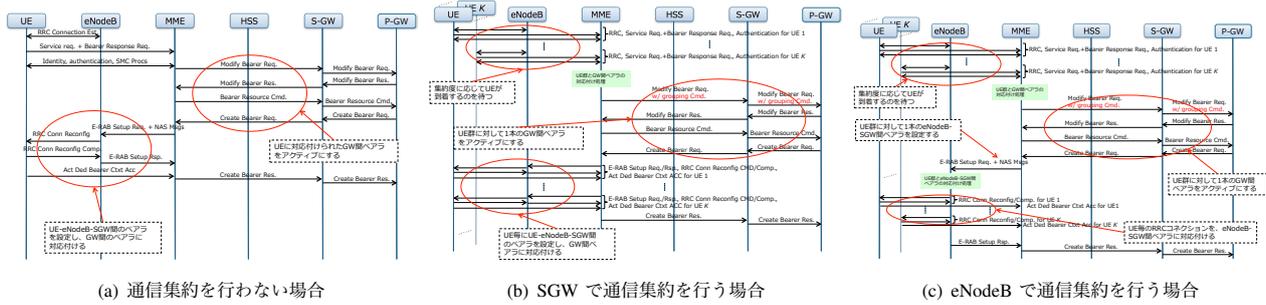


図5 通信時のペアラ確立手順

均レスポンス時間 $E[R]$ は、以下のように表される。

$$E[R] = \frac{\rho^r}{1-\rho} \frac{E[S^2]}{2E[S]} + \frac{1-\rho^r}{1-\rho} E[S] \quad (2)$$

ジョブの到着率として、シグナリング処理頻度を用いて、ワークロード分布は簡単のため指数分布とし、その平均値はノードの処理能力に応じて決定することで、シグナリング処理にかかる時間を導出する。

4.3 集約待ち時間

最後に、通信時のペアラ確立手順のうち、手順開始時に必要となる集約のために発生する遅延時間 L_A の解析を示す。ここでは、定期的に集約を行う場合のみを示すが、1本目が到着してから時間の経過に応じて集約する場合においてもほぼ同様の解析手法が適用できる。

通信の集約には、集約される通信を待つための遅延時間(以降では集約待ち時間と呼ぶ)に加えて、集約箇所における集約処理にかかる遅延時間(集約処理時間と呼ぶ)が発生する。本稿では簡単のために、集約処理にかかる遅延時間は十分小さいものとして、その大きさを無視する。

定期的に集約を行う場合には、集約箇所に着信する通信を発生させる端末数が N_a 、集約度が K であることから、タイムスロット長 Δ_{cyclic} を $\frac{K}{N_a} \cdot T'$ とすることで、各タイムスロットで集約される平均通信本数が K となる。簡単のため、1周期に含まれるタイムスロット総数 $S_{\text{cyclic}} = \frac{N_a}{K}$ は整数 (N_a は K で割り切れる) と仮定する。

通信の到着が一様分布であることに留意すると、定期的な集約を行う場合に、通信に発生する遅延時間の累積分布関数 $D_{\text{cyclic}}(t)$ ($0 \leq t$) は以下ようになる。

$$D_{\text{cyclic}}(t) = \begin{cases} \frac{t}{\Delta_{\text{cyclic}}} & (0 \leq t \leq \Delta_{\text{cyclic}}) \\ 1 & (\Delta_{\text{cyclic}} < t) \end{cases} \quad (3)$$

4.4 数値評価

本章では解析結果の数値例を示し、通信集約がペアラ確立時間に与える影響を評価する。

評価においては、RRCコネクション確立に必要な時間である L_{RRC} は 45 msec とした。また、ノード間の伝播遅延時間を、 $\tau_{\text{ue}} = 5$ msec、 $\tau_{\text{em}} = 7.5$ msec、 $\tau_{\text{ms}} = 1$ msec、 $\tau_{\text{es}} = 7.5$ msec、 $\tau_{\text{sp}} = 1$ msec と定めた。

各ノードにおける、1つのシグナリングメッセージを処理するために必要な時間は指数分布に従う分布を持つものとし、各ノードのメッセージ処理能力は、eNodeBが1,000メッセージ/秒、MME、SGW、およびPGWは10,000メッセージ/秒とした。

図6は、eNodeB数を1,000台、MME、SGW、及びPGWをそれぞれ1台ずつとし、端末の通信周期を600秒とした時の、収容するUEの総数とペアラ確立時間の関係を表している。図には、集約度 K を10、100、1,000と変化させた場合の結果を示している。なお、各グラフにおけるプロットは、システムの利用率が0.9999に達したところで終えている。

図から、集約度が大きくなると、通信集約を行う手法のペアラ確立間が悪化することがわかり、特にeNodeBで集約を行う

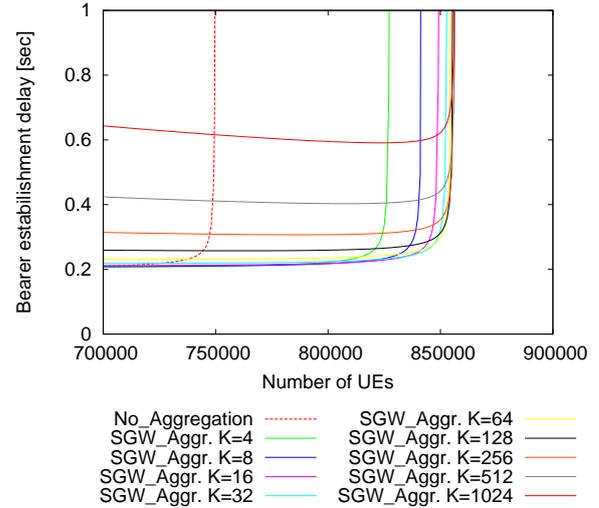


図7 集約度 K と収容可能な UE の総数の関係

場合のペアラ確立時間が大きいことがわかる。また、収容するUE総数が小さくなくても、通信集約を行う手法のペアラ確立時間が増大している。これらは、通信集約を行う手法においては、集約のために待たされる時間が発生するためである。つまり、収容するUEの総数が小さくなる、あるいは、集約度が大きくなると、集約度に応じた通信が到着するのを待つための時間が大きくなる。また、eNodeBで集約を行う場合は、集約の対象となるUEがSGWで集約を行う場合に比べて小さいため、集約待ち時間がさらに増大する。

一方、集約を行うことで、収容可能なUEの総数が増加しており、その増大幅は、集約度が大きいほど大きく、また、eNodeBで集約を行う場合の方が大きいことがわかる。これは、通信集約を行うことで、MMEやGWが処理するペアラ数が削減されるため、ノード負荷が下がるためである。また、解析結果から、集約度 K に応じた通信を処理するためのノード負荷に関して、SGWやPGWよりも、MMEのそれが大きいことがわかった。本評価におけるパラメータ設定はMME、SGW、PGWの処理能力を等しくしているため、収容するUEの総数が大きくなると、MMEの負荷が最も早く増大する。しかし、通信集約を行う手法はMMEにおけるメッセージ処理頻度を低下させ、その幅はeNodeBで集約を行う場合の方が大きいため、収容可能なUEの総数が増加する。

図7に、集約を行わない場合と、SGWで集約を行い集約度 K を変化した場合の、収容するUEの総数とペアラ確立時間の関係を示す。図から、本評価におけるパラメータ設定では、収容可能なUEの総数は、集約を行わない場合には約750,000であるのに対し、SGWにおいて集約を行うことで、最大で約860,000まで増加することがわかる。これは、集約によってMMEやGWの負荷が低下するためである。また、集約度が128より大きくなると収容可能なUEの総数はほとんど増加しない。また、収容するUE数が800,000より大きい場合には、

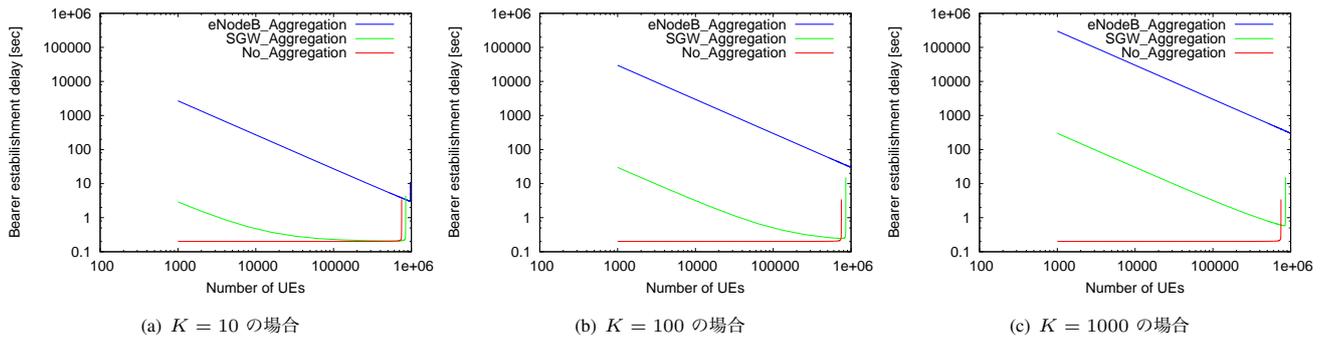


図6 収容 UE の総数とベアラ確立時間の関係

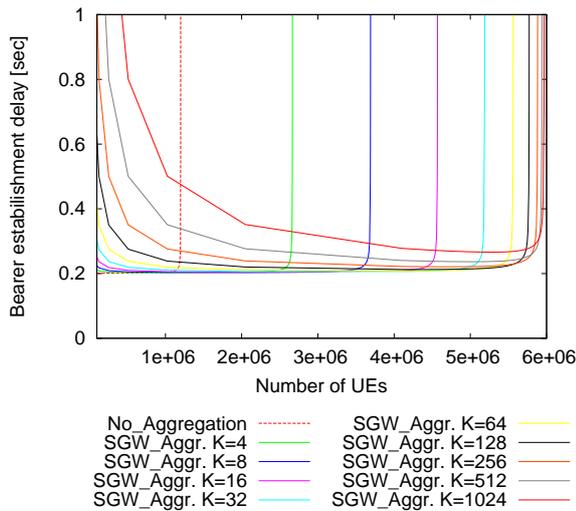


図8 MME の処理能力を 10 倍にした場合

収容する UE 数に応じて集約度を適切に設定することで、ベアラ確立時間を小さく保てることわかる。

図8に、MMEの処理能力を十分大きくするために10倍の100,000メッセージ/秒とし、SGWの処理がボトルネックになる環境を想定した評価結果を示す。図から、MMEの処理能力を十分大きくすることで、集約を行わない場合においても収容可能なUEの総数が増大するが、SGWにおいて集約を行うことによる収容可能なUEの総数が増大幅が、図7の場合に比べて大きく、最大で約6倍のUEを収容できることわかる。これは、通信集約によるノード処理負荷の軽減度合が、MMEと比べて大きいためである。

5. まとめと今後の課題

本報告では、M2Mサービスをモバイルコアネットワークに効率的に収容するための手段として、通信集約手法に着目し、数学的解析による性能評価を行った。性能評価はモバイルコアネットワーク内のベアラ数、及び端末がベアラを確立するまでにかかる遅延時間に着目し、通信集約の利点と欠点を考慮した評価を行った。評価の結果、集約の度合を適切に設定することによって、ベアラ確立にかかる時間の増大を抑え、モバイルコアネットワークが収容可能な端末数を増加することができることを明らかにした。

今後の課題として、センサ端末などのM2M端末がデータ収集を行う方法を検討し、端末グループ化によるモバイルコアネットワークの負荷軽減方法との関係を明らかにすることが挙げられる。また、M2M端末の通信に見られる周期性を予測・同定し、それに応じて動的にモバイルコアネットワーク内の制御を行う手法などの検討が挙げられる。

謝辞

本研究を進めるにあたり、株式会社NTTドコモ先進技術研究所 滝田亘氏、清水敬司氏、田村基氏より有益な助言をいただいた。ここに記し謝意を示す。

文献

- [1] A. de la Oliva, C. J. Bernardos, M. Calderon, T. Melia, and J. C. Zuniga, "IP flow mobility: Smart traffic offload for future wireless networks," *IEEE Communication Magazine*, vol. 49, pp. 124–132, Oct. 2011.
- [2] Cisco Systems, Inc., "Architecture for mobile data offload over Wi-Fi access networks," Available from <http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/service-provider-wi-fi/white-paper.c11-701018.pdf>.
- [3] 3GPP TS 24.312, "Access network discovery and selection function (ANDSF) management object (MO)," 2014.
- [4] A. Balasubramanian, R. Mahajan, and A. Venkataramani, "Augmenting mobile 3G using WiFi," in *Proceedings of MobiSys 2010*, pp. 209–222, June 2010.
- [5] K. Lee, I. Rhee, J. Lee, S. Chong, and Y. Yi, "Mobile data offloading: How much can WiFi deliver?," in *Proceedings of CoNEXT 2010*, Nov. 2010.
- [6] M. Z. Shafiq, L. Ji, A. X. Liu, J. Pang, and J. Wang, "A first look at cellular machine-to-machine traffic - large scale measurement and characterization," in *Proceedings of ACM SIGMETRICS 2012*, June 2012.
- [7] D. Bouallouche, "Congestion control in the context of machine type communications in 3GPP LTE networks," *Master thesis internship report, University of Rennes*, Aug. 2012.
- [8] R. Vaidya, C. Yadav, J. Kunkumath, and P. Yadati, "Network congestion control: Mechanisms for congestion avoidance and recovery," in *Proceedings of ACWR 2011*, Dec. 2011.
- [9] Y. Chen and W. Wang, "Machine-to-machine communication in LTE-A," in *Proceedings of VTC2010-Fall*, pp. 1–4, Sept. 2010.
- [10] K. Jun, "Enabling massive machine-to-machine communications in LTE-Advanced," in *Proceedings of GPC 2013*, pp. 563–569, May 2013.
- [11] K. Doppler, M. Rinne, C. Wijting, C. B. Ribeiro, and K. Hugl, "Device-to-device communication as an underlay to LTE-Advanced networks," *IEEE Communication Magazine*, vol. 47, pp. 42–49, Dec. 2009.
- [12] S.-Y. Lien, K.-C. Chen, and Y. Lin, "Toward ubiquitous massive accesses in 3GPP machine-to-machine communications," *IEEE Communication Magazine*, vol. 49, pp. 66–74, Apr. 2011.
- [13] V. S. Rao and R. Gajula, "Protocol signaling procedures in LTE," *White Paper, Radisys Corporation*, Sept. 2011.