

超低遅延・超高信頼通信を実現する経路制御方式の スケーラビリティを向上する手法の提案

Anar Zorig[†] 片山 陽平[†] 樽林 亮介[†] 岩科 滋[†]

[†]株式会社 NTT ドコモ 先進技術研究所 〒239-8536 神奈川県横須賀市光の丘 3-6 ドコモ R&D センタ

E-mail: †{anar.zorig.nf, youhei.katayama.zr, ryousuke.kurebayashi.pz, iwashina}@nttdocomo.com

あらまし 5G のユースケースに端末間の超低遅延・超高信頼通信 (URLLC) がある。Evolved Packet System の Core Network では、全てのユーザデータが外部ネットワークとの接続点にある Packet Data Network Gateway (P-GW) を経由するという経路集約を行っているため、端末間の通信経路が冗長となり URLLC の要件を満たせない。しかし、経路集約を行わずに端末間を最短経路で接続すると Core Network が保持する経路数が端末数の二乗に比例して爆発的に増加するため経路情報管理のスケーラビリティが失われる。本稿では、通信要求を受けて確立された端末間通信の経路情報のみを Core Network に保持させる手法を提案し、低遅延性と経路情報管理の高いスケーラビリティを両立させることを示す。

キーワード 超低遅延・超高信頼通信、スケーラビリティ、経路制御

An Approach to Enhance Network Routing Scalability for Ultra-Reliable and Low Latency Communications

Anar ZORIG[†] Yohei KATAYAMA[†] Ryosuke KUREBAYASHI[†] and Shigeru IWASHINA[†]

[†]Research Laboratories, NTT DOCOMO, INC. DOCOMO R&D center, 3-6 Hikarino-oka, Yokosuka-shi, Knagawa, 239-8536, Japan

E-mail: †{anar.zorig.nf, youhei.katayama.zr, ryousuke.kurebayashi.pz, iwashina}@nttdocomo.com

Abstract The fifth generation (5G) 3GPP system is required to support Ultra-Reliable and Low Latency Communications (URLLC). Some use cases require low end-to-end latency from 1ms up to 10ms between User Equipment (UE) devices. The use cases and requirements cannot be met with Evolved Packet System (EPS) since a route of use data traffic is anchored to a Packet Data Network Gateway (P-GW) to make the packet routing and forwarding of the Core Network scalable to a large number of UE devices in the EPS architecture. The amount of information for packet routing and forwarding of the Core Network is proportional to the square of the number of UE devices when the Core Network provides shortest paths between UE devices for addressing URLLC. We propose a highly scalable routing mechanism where the Core Network keeps packet routing and forwarding information of established communication paths between UE devices for URLLC.

Keywords Ultra-Reliable and Low Latency Communication (URLLC), Scalability, Routing Control

1. はじめに

近年、Internet of things (IoT) が注目されている[1]。IoT が注目される要因として、移動通信システムの発展や IPv6 (Internet Protocol version 6) の対応が進むなど環境が整ってきたことが挙げられる。移動通信システムの標準化団体である 3GPP (the 3rd Generation Partnership Project) では、第 5 世代 (5G) の移動通信システムの標準化が行われている。5G では継続的なトラフィック増加に対応するためのさらなるブロードバンド化に加えて、IoT に対応するために多端末接続と超低遅延・超高信頼通信 (Ultra-Reliable and Low Latency Communications, URLLC) をサポートするアー

キテクチャが必要とされている[2]。URLLC のユースケースとして、3GPP では次の様なサービス例が示されている[3]。

- 近距離におけるリアルタイム制御：工場内等の近距離にある機器へリアルタイムに制御通信を行って機器制御するユースケースである。通信要件の一つに低遅延性 (1~10ms) が示されている。
- 救急車でのリモート診断：救急車内で遠隔から診断処置するユースケースである。具体的には、双方向の高精細映像会議や医療機器のリアルタイム制御通信が想定されている。通信要件の一つに低遅延性 (1~10ms) が示されている。

これらのユースケースは地理的に近い地域にある端末間で低遅延に通信可能であることを求めるが、従来の移動通信システム (Evolved Packet System, EPS) [4] では実現できない。

2. Evolved Packet System (EPS)

2.1. U-plane 構成

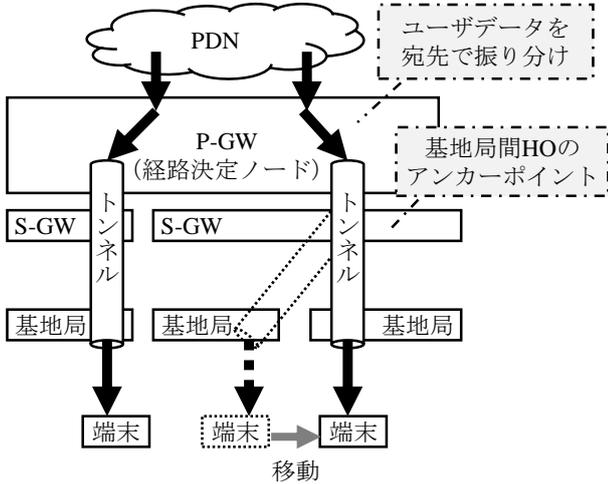


図 1 EPS の U-plane 構成

EPS では端末のユーザーデータを運ぶ User-plane (U-plane) と、端末が移動通信システムと制御信号をやり取りする Control-plane (C-plane) が分離されている。この内、厳しい遅延要件が求められるのは U-plane である。EPS における U-plane 構成を図 1 に示す。EPS では C-plane 信号によって移動通信システム内に端末と外部ネットワーク (Packet Data Network, PDN) を接続するトンネルが確立されることで端末と PDN が通信可能となる。EPS における Core Network の entities とその役割 (抜粋) は以下の通りである：

- PDN Gateway (P-GW) : PDN との接点に位置し、PDN から送信されたユーザーデータを宛先となる端末へ向かうトンネルに振り分ける機能と、端末から送信されたユーザーデータをトンネルから取り出して PDN に送信する機能を持つ。トンネル端点 (Tunnel Endpoint, TE) は P-GW に固定され、端末が移動しても PDN の経路情報は変更されない。多数の TE を P-GW に持たせる経路集約が為され、経路情報管理にスケラビリティがある。
- Serving Gateway (S-GW) : 基地局と Core Network の境界に位置し、基地局間ハンドオーバー(HO) 時の固定中継点 (アンカーポイント) の機能を持つ。本稿では P-GW のようにユーザーデータの宛先となる端末へ向かう経路を保持するノードを経路決定ノードと定義する。

2.2. 端末間通信の通信経路

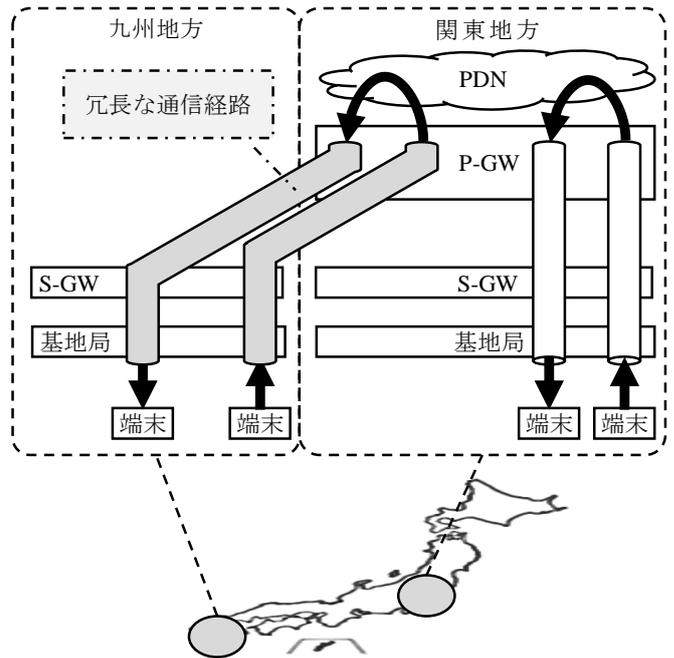


図 2 EPS における端末間通信の通信経路例

EPS において端末間通信を行う場合 (例えば通話) の通信経路例を図 2 に示す。地理的に近い地域にある端末間で通信をする場合に P-GW が配置される地域と端末が在圏する地域の距離も近い場合には通信遅延が小さい。例えば P-GW と両端末が東京にある場合には往復で数 ms 程度の通信遅延であり、第 1 章のユースケースで例示したような URLLC の要件を満たす。

一方で、地理的に近い地域にある端末間で通信する場合であっても P-GW が配置される地域と端末が在圏する地域の距離が離れている場合には通信遅延が大きい。例えば P-GW が東京、両端末が鹿児島にある場合には 10ms を超える通信遅延であり、前記要件を満たせない。

2.3. 端末間の URLLC 実現に向けた課題分析

EPS の構成では、端末と P-GW が地理的に離れていると地理的に近い地域にある端末間の通信であっても遅延が大きくなる。通信遅延を小さくするには地域毎に宛先となる端末へ向かう経路を決定し、短い経路で通信ができるようにする必要がある。

3. 先行研究

3.1. Distributed Mobility Management (DMM)

Distributed Mobility Management (DMM) [5] では PDN との接点に位置するノード (DMM-GW) を地域毎に分散配置する構成を取る。各 DMM-GW はユーザーデータの宛先となる端末へ向かう経路を保持するため経路決定ノードである。この構成では同じ経路決定ノ

ードに收容される端末間の通信遅延が小さい。例えば、九州地方（離島を除く）を一つの地域とし、DMM-GWを福岡に配置する構成を取ると、端末間通信を行う両端末が鹿児島にある場合であっても往復の通信遅延が数 ms となり第 1 章のユースケースで例示したような URLLC の要件を満たす。

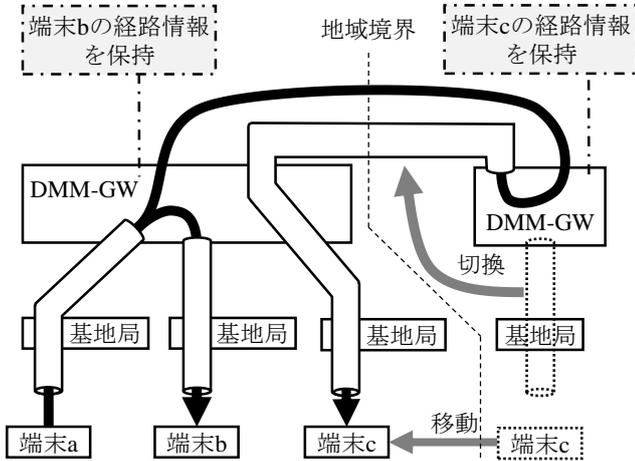


図 3 DMM の課題

DMM の課題はセッションの継続性と最短経路の設定を両立できない点である。この課題を図 3 を用いて説明する。端末 c のように通信中の端末が地域を跨って移動した場合、セッションを継続するために端末 c を宛先とするユーザデータは移動前の DMM-GW をアンカーポイントとして経由するため遅延が増大する。アンカーポイントを移動先の DMM-GW に切り替えて最短経路を取るためにはセッションを作り直す必要がありセッションの継続性が失われる。

3.2. Global HA to HA Protocol (GHH)

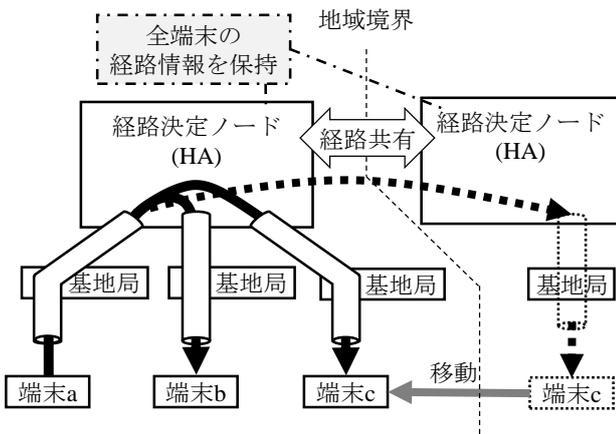


図 4 GHH の構成例

Global HA to HA protocol (GHH)[6][7] では経路決定ノード（文献中の Home Agent, HA）が地理的に分散配置され、各経路決定ノードが全ての端末の経路情報を

保持する構成を取る。図 4 に GHH の構成例を示す。端末が移動してセッションに対応する経路情報が更新されると全ての経路決定ノード間で経路情報が更新される。そのため GHH ではセッションの継続性を維持しながら最短経路となる経路決定ノードを用いて通信ができる。

GHH の課題は移動通信システムのように端末数が多い場合に経路決定ノード全体で保持する経路情報量も大きくなりスケーラビリティが低い点である。また、各端末の経路情報を全経路決定ノードが保持する為、各端末が移動する毎に全経路決定ノードに経路情報の更新が必要であり経路更新の負荷が高い。

4. 提案手法

4.1. 専用トンネル設定手法

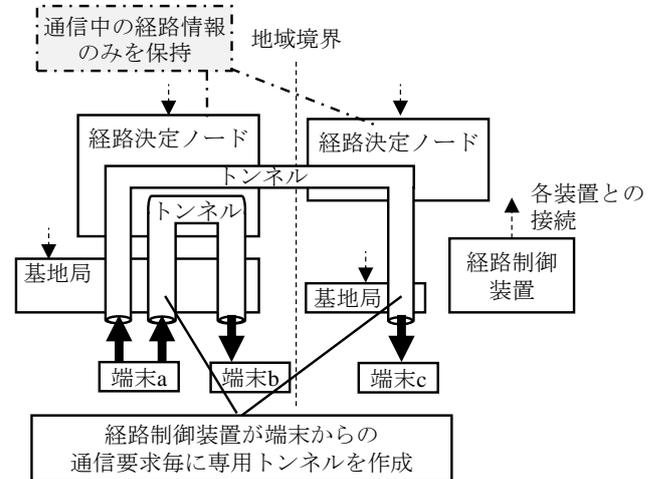


図 5 専用トンネル設定手法の構成

図 5 に本提案手法の構成を示す。本手法は移動通信システム内の経路制御装置が端末から端末間通信の確立要求を受けた場合のみ移動通信システム内にトンネルを確立する。本手法におけるトンネルは送信元基地局、経路決定ノード、送信先基地局の間を結び、端末間通信毎に専用のものが確立される。そのため本手法を専用トンネル設定手法と呼ぶことにする。送信元端末から送信されたユーザデータはトンネルを経由して宛先端末へ送信される。

本手法の利点は端末間通信を行っている端末数が限られる場合に経路決定ノード全体で保持する経路情報が小さく抑えられ、かつ最短経路を取ることができる点である。一方、各端末が同時に行う端末間通信の接続数（同時接続数）が増えると端末数と同時接続数の積に比例して経路数（転送エントリ数）とトンネル数（TE エントリ数）が増加し、最大では端末数の二乗に比例する値となる。すなわち、同時接続数に対するスケーラビリティに課題がある。

4.2. 共用トンネル設定手法

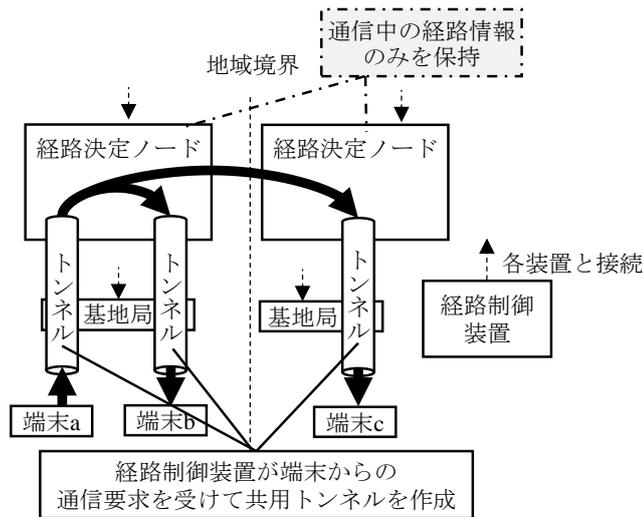


図 6 共用トンネル設定手法

図 6 に本提案手法の構成を示す。本手法は専用トンネル設定手法と同様に移動通信システム内の経路制御装置が端末から端末間通信の確立要求を受けた場合のみ移動通信システム内にトンネルを確立する。しかし、専用トンネル設定手法とは異なり、端末と経路決定ノード間のトンネルが複数の端末間通信で共用される。経路決定ノードでは共用トンネルから取り出されたユーザデータに含まれる宛先端末の情報を用いて最短経路となる転送先の経路決定ノードが決定される。

本手法の利点は端末間通信を行っている端末数が限られる場合に経路決定ノード全体で保持する経路情報が小さく抑えられ、かつ最短経路を取ることができる点である。専用トンネル設定手法と比べて、各端末が同時に行う端末間通信の接続数（同時接続数）が増えても経路数（転送エントリ数）とトンネル数（TE エントリ数）は一定に抑えられる。

5. 評価

本稿では EPS、DMM、GHH、専用トンネル設定手法（図凡例：提案①）、共用トンネル設定手法（図凡例：提案②）の低遅延性と経路情報管理のスケラビリティを評価して比較する。評価指標として、a) 端末間通信遅延、b) 端末数に対する経路決定ノード全体の保持するトンネル端点（TE）エントリ数、c) 端末数に対する経路決定ノード全体の保持する転送エントリ数、の 3 つを用いる。

5.1. 想定する地理的配置

通信遅延の評価は地理的な距離が関係するため、評価に用いる地理的な配置を定義する。本評価では EPS の S-GW、及び他 4 つの手法の経路決定ノードは地方単位に分散配置されるものとする。ここでいう地方は

日本の一般的な地域の分け方である以下の 8 地方¹を指し、EPS の S-GW もしくは経路決定ノード（EPS の P-GW 除く）は各地方で人口が最大の都市に設置されるものとする：

- ・北海道地方：札幌
- ・東北地方：仙台
- ・関東地方：東京
- ・中部地方：名古屋
- ・近畿地方：大阪
- ・中国地方：広島
- ・四国地方：愛媛
- ・九州地方：福岡

EPS の P-GW に関してはトラフィックが集中する東京に設置するものとする。

移動通信システムの物理トポロジ（伝送路等）は通信事業者ごとの設備状況によって異なる為、本評価では単純な装置間の直線距離から通信遅延の概算値を求める（評価結果の値は小さく見積もられることに留意）。ここで使う装置間の直線距離は、国土地理院の都道府県庁間の距離 [8] を基に計算する。全ての基地局（Baseband Unit 部分）は各都道府県庁所在地に集中配備されるものとする。無線部（Remote Radio Unit 部分）は基地局から分離され、各県内全域をカバーする。また、各基地局は同じ地方の経路決定ノードに收容されるものとする。

5.2. 端末間通信遅延の最小値と最大値

各手法における通信遅延の最小値と最大値を評価する。遅延算出時に用いる値を以下に示す：

- ・無線区間遅延：1ms (5G 目標値 [9]、距離非依存)
- ・光の伝搬遅延：5 μ s/km
- ・転送処理遅延：0.2ms/装置

転送処理遅延が発生する装置は基地局、EPS の S-GW、経路決定ノード（EPS の P-GW 含む）、PDN とする。そして、端末間通信を行う端末間の距離は、URLLC のユースケースで例示した救急車の平均到着時間（約 8 分） [10] と法低速の 60km/h から半径 7.5km 以内端末との通信を想定する。すなわち、端末間通信の範囲は同一県内もしくは陸地若しくは道路（橋）にて繋がっている隣接県間までとする。本条件を満たすように全国各地の 2 点を選択し各手法の通信遅延の最小値と最大値を算出して通信遅延の取り得る範囲を算出する。

EPS の端末間通信遅延は送信元基地局、送信元 S-GW、P-GW、PDN、P-GW、宛先 S-GW、宛先基地局の経路距離に依存し、その他の手法では、送信元基地局、送信元経路決定ノード、宛先経路決定ノード、宛先基地

¹ なお、沖縄や離島については地理的に特殊であり特別な対応を取ることが考えられるため今後の評価で検討することとして今回の評価には含まない。

局の間の距離に依存する。なお、EPS は他の手法に比べて経由する装置が多いため転送処理遅延が大きい。各手法の通信遅延が最小値と最大値となるときの両端末の所在地は表 1 の通りである。

表 1 各手法において通信遅延が最小値と最大値となる場合の両端末の所在地

手法	両端末の所在地	
	遅延最小	遅延最大
EPS	東京と東京	鹿児島と鹿児島
DMM / GHH / 提案 (専用) / 提案 (共用)		福島と栃木

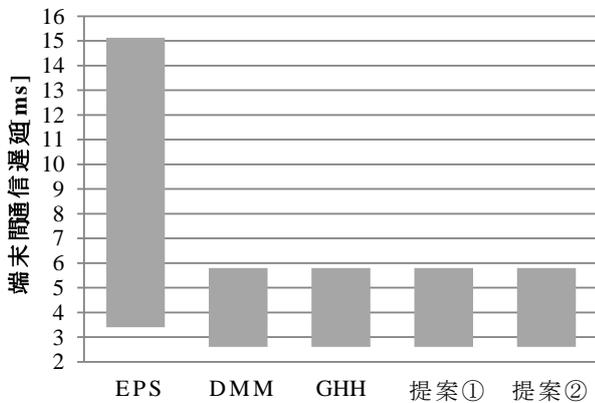


図 7 端末間通信遅延の範囲

図 7 に各手法を用いた場合の端末間通信遅延の範囲 (最小値と最大値) を示す。EPS は通信遅延の最大値が 15ms を超え、第 1 章のユースケースで例示したような URLLC の要件 (通信遅延 10ms 以下) を満たさないことが分かる。本評価は理想的な伝送を仮定しており通信遅延の値が小さく見積もられているものの、他の手法では通信遅延の最大値が 5.8ms 以下で前記要件を満たすことが分かる。

5.3. 端末数に対する TE エントリ数

端末間通信を行う端末数 N を増加させる時の経路決定ノード全体に設定されるトンネル端点 (TE) エントリ数 y を評価する。評価にあたり各手法における y を定式化する。EPS、DMM、GHH では各端末から経路決定ノードに対して常に 1 つのトンネルが接続されるため $y=N$ である。共用トンネル手法では、端末間通信を行う端末数に応じて経路決定ノードに接続されるトンネル数が決まる。全ての端末が少なくとも 1 つの端末と端末間通信を行っているときに最大値を取り、このとき $y=N$ である。専用トンネル設定手法では、各端末が同時に行う端末間通信の接続数 (平均同時接続数 m)

と端末間通信の状況によって経路決定ノード全体に設定される TE エントリ数 f が変化する。端末間通信が地域内でのみ行われる場合 $y=Nm$ ($m < N$) である。端末間通信が地域間 (2 つの経路決定ノードに跨って) でのみ行われる場合 $y=2Nm$ ($m < N$) である。端末間通信が地域内と地域間で行われる場合には $Nm < y < 2Nm$ である。

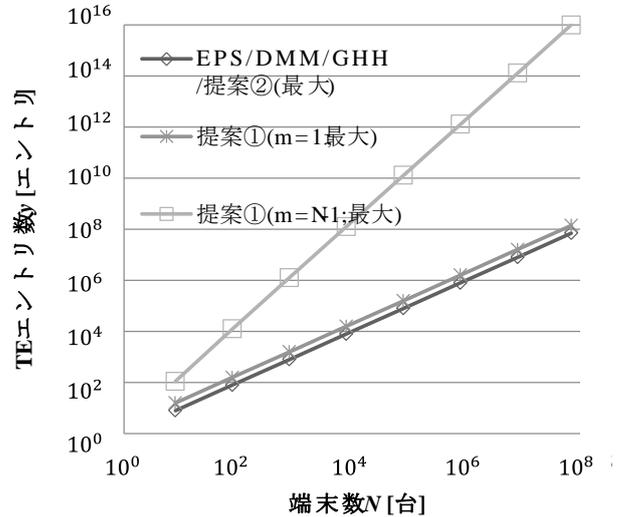


図 8 端末数に対する TE エントリ数

図 8 に評価結果を示す。専用トンネル手法に関しては $m=1, 100, N-1$ のそれぞれにおける下限値と上限値を示している。評価結果より専用トンネル手法は平均同時接続数が非常に小さい場合 ($m \leq 1$) には端末数に対するスケーラビリティが他の手法と同等以上であるが平均同時接続数が大きくなると TE エントリ数が非常に大きくなるため平均同時接続数に対するスケーラビリティが低いことが分かる。また、共用トンネル手法は最大でも他の手法と同等の TE エントリ数であり端末数に対するスケーラビリティが高いと言える。

5.4. 端末数に対する転送エントリ数

移动通信システムに接続される端末数 N を増加させた時の経路決定ノード全体に設定される転送エントリ数 f を評価する。評価にあたり各手法における f を定式化する。EPS、DMM では各端末がいずれか 1 つの経路決定ノードに転送エントリを持つため $f=N$ である。GHH では各端末が全経路決定ノードに転送エントリを持つため経路決定ノード数を R とすると $f=RN$ である。なお、 R の値は第 5.1 節より $R=8$ とする。共用トンネル設定手法では端末間通信の状況によって表現式が異なる。端末間通信が地域内でのみ行われる場合 $f \leq N$ である。端末間通信が地域内だけでなく地域間 (2 つの経路決定ノードに跨って) でも行われる場合 $y \leq RN$ である。専用トンネル設定手法では、各端末が同時に行う端末間通信の接続数 (平均同時接続数 m) と

文 献

- [1] Denise Lund, Carrie MacGillivray, Vernon Turner, Mario Morales“Worldwide and Regional Internet of Things (IoT) 2014–2020,”MARKET ANALYSIS, May 2014.
- [2] 3GPP SP-160958:“New WID: 5G System Architecture – Phase 1,”December 2016.
- [3] 3GPP TS 22.891 V14.2.0 “Feasibility Study on New Services and Markets Technology Enablers,”September 2016.
- [4] 3GPP TS 23.401 V14.0.0: “General Packet Radio Service (GPRS) enhancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) access”, 2016.
- [5] Fabio Giust, Luca Cominardi, and Carlos J. Bernardos“Distributed Mobility Management for Future 5G Networks: Overview and Analysis of Existing Approaches,”IEEE Communications Magazine, January 2015.
- [6] Wakikawa, Ryuji, Guillaume Valadon, and Jun Murai. "Migrating home agents towards internet-scale mobility deployments." Proceedings of the 2006 ACM CoNEXT conference. ACM, 2006.
- [7] Zhang, Lixia, Ryuji Wakikawa, and Zhenkai Zhu. "Support mobility in the global internet." Proceedings of the 1st ACM workshop on mobile internet through cellular networks. ACM, 2009.
- [8] 国土地理院,“都道府県庁間の距離,”
[Online] Available at:
<http://www.gsi.go.jp/KOKUJYOHO/kenchokan.html>
- [9] NTT ドコモ, “5G ホワイトペーパー”, [Online] Available at:
https://www.nttdocomo.co.jp/binary/pdf/corporate/technology/whitepaper_5g/DOCOMO_5G_White_PaperJP_20141006.pdf
- [10] 総務省, “平成 27 年版 救急・救助の現況”, [Online] Available at:
https://www.fdma.go.jp/neuter/topics/houdou/h27/12/271222_houdou_2.pdf

端末間通信の状況によって経路決定ノード全体に設定される転送エントリ数が増える。端末間通信が地域内でのみ行われる場合 $y=Nm$ ($m<N$) である。端末間通信が地域間 (2 つの経路決定ノードに跨って) でのみ行われる場合 $y=2Nm$ ($m<N$) である。端末間通信が地域内と地域間で行われる場合には $Nm<y<2Nm$ である。

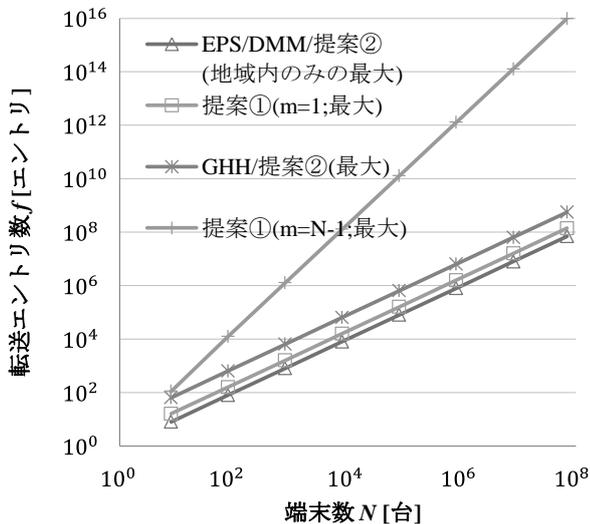


図 9 端末数に対する転送エントリ数

図 9 に評価結果を示す。専用トンネル手法に関しては $m=1, 100, N-1$ のそれぞれにおける下限値と上限値を示している。評価結果より専用トンネル手法は平均同時接続数が非常に小さい場合 ($m \leq 1$) には端末数に対するスケーラビリティが他の手法と同等以上だが平均同時接続数が大きくなると転送エントリ数が非常に大きくなるため平均同時接続数に対するスケーラビリティが低いことが分かる。共用トンネル手法では転送エントリ数の最大が GHH と同程度の転送エントリ数である。しかしながら、端末間通信の行われる範囲が隣接地方までに限定される場合には EPS/DMM と同程度の値に近づき、GHH よりも端末数に対するスケーラビリティが高い。

6. まとめ

本稿では URLLC を実現する手法間の比較評価を行った。評価結果より、地域毎に配置される経路決定ノードと端末間で通信要求毎にトンネルを確立し、このトンネルを複数の端末間通信で共用する提案手法 (共用トンネル設定手法) が、低遅延性と経路情報管理のスケーラビリティを両立する最良の方式であることが示された。経路情報管理のスケーラビリティに関する評価指標として経路決定ノードが保持するトンネル端点 (TE) エントリ数と転送エントリ数を評価したが、今後は経路制御負荷についても評価する。