

アプリケーション品質に基づく 通信トラフィック制御技術の研究

里田 浩三

概要

急速に進化、普及するモバイルネットワークは、社会の様々な分野で利用されている。モバイルデータのトラフィック量は 2017 年から 2022 年までに 7 倍増加すると見込まれている。このようなモバイル通信のトレンドに対し、通信キャリアは基地局の増加、新たな無線周波数帯の導入、5G などの高速通信方式により対応を試みている。しかし、モバイル通信はトラフィック量が増加するだけでなく、アプリケーションの多様化も進んでいる。電話による音声通信、テキストメッセージが主体であったモバイル通信は、現在では、ビデオ、オーディオ、Web や SNS、ソフトウェアダウンロードなど、様々なアプリケーションで利用されている。このようなトラフィック傾向に対し、基地局の増加等の対応だけでは、アプリケーション通信の品質を確保するのは容易ではない。

本論文では、モバイルネットワークのアプリケーション通信品質を確保、向上するため、アプリケーション品質の向上を妨げる原因を下記であると仮定した。

1. 通信キャリアを流れるトラフィックのうち、インターネット上のクラウドサービスのトラフィックが増加していること
2. 多様なアプリケーショントラフィックが混在していること
3. トラフィック量の変動により、通信のために十分な無線リソースを確保できないこと

これらの課題はモバイルネットワークのアクセスネットワークの制御に課題があるとし、アプリケーション品質を確保、向上するため、コアネットワーク、基地局、端末で通信制御を行うモバイルネットワークアーキテクチャを提案する。

2 章では、それぞれの原因に対し、既存の研究の取り組みと既存研究の課題を紹介し、本研究のアプローチを説明する。

3 章では、インターネットではトランスポートプロトコルとして TCP が主に用いられるが、モバイルネットワークでは TCP 性能が充分に出ないことを明らかにする。これ

に対し、インターネットとモバイルネットワークの境界となる通信キャリアのコアネットワーク内に中継サーバを配備し、中継サーバにおいてモバイルネットワークに最適な TCP 制御を行うアーキテクチャを提案する。また、中継サーバと基地局と連携する TCP アルゴリズムを提案し、モバイルネットワークの変動に追従して高い通信スループットと短い通信遅延を両立することを示す。これにより、TCP を用いるインターネットアプリケーションの性能を向上することができる。

4章では、モバイルネットワークでは様々なアプリケーションが利用されていることを想定し、アプリケーションごとの特性に基づいた基地局のスケジューリング方式を提案する。モバイルネットワークでは様々なアプリケーションが利用されてきているが、特にモバイルネットワークの基地局ではアプリケーションを区別せず、もしくは登録されたアプリケーションのみで無線リソースの割り当てを行っている。そのため、インターネットの多様なアプリケーションの通信品質の確保が困難である。これに対し、アプリケーションごとの特性に基づいた基地局のスケジューリング方式を提案する。モバイルネットワークのユーザは、体感品質 (QoE, Quality of Experience) が一定以上であると通信に満足するが、それ以下になると通信状況に不満を感じる傾向にある。そのため、QoE が一定以上であるユーザ数 (許容端末数) を増やすことを目的とし、特にビデオストリーミングと Web 閲覧のユーザが混在している場面を想定して、基地局が携帯端末 (UE, User Equipment) に無線リソースを割り当てるスケジューリングプロセスにおいて、ビデオストリーミングと Web 閲覧の割り当て優先度を決定する。端末が移動する環境を想定したシミュレーションにより、提案方式は従来方式と比較して、Web 閲覧端末の平均 QoE を最大 1.48 ポイント向上できること、ビデオ視聴端末と Web 閲覧端末の許容端末数を最大 2.1 倍増加させることができることを示す。

5章では、基地局に通信トラフィックが集中することで、基地局から UE への通信に十分な無線リソースが割り当てられない、という問題に対し、リアルタイム性が求められないトラフィック (ダウンロードトラフィックなど) は、UE が自律的に基地局が混雑するピーク負荷の時間を避けて、空きリソースが出るまで遅延させるオフピークデータ通信方式を提案する。基地局の通信トラフィック量は時間により大きく変動するため、基地局が混雑する環境でも、基地局の無線リソースに空きができる時間があることが知られている。このような空きリソースを活用することでオフピークデータ通信方式を実現する。また、オフピークデータ通信を実現するための最大の課題である、UE における、パッシブな UE と基地局間の利用可能帯域推定手法を提案する。推定方式は LTE の実験ネットワークおよび商用ネットワークの両方で評価し、UE でパッシブに測定した無線指標を使って利用可能帯域を高精度に推定できていることを示す。利用可能帯域推定を用いて、

UE が非リアルタイムトラフィックのダウンロードタイミングを自律的にシフトすることで、リアルタイム通信の通信品質を劣化させずに基地局のピーク負荷を軽減することができる。

以上の研究により、モバイルネットワークのアプリケーション通信品質の向上が可能であり、通信キャリアのモバイルネットワークへの投資効果の向上も期待できる。

より大容量のモバイル通信を収容するため、5G の導入が進んでいる。5G でも通信方式は同様の考え方が導入されており、今後も、提案手法により、モバイル通信に対するユーザの体感品質を向上し、かつ通信インフラの投資効果を向上することが期待される。

目次

第 1 章	序論	10
1.1	研究背景	10
1.2	モバイルネットワークにおける課題 – アプリケーション品質の確保 –	10
1.3	アプリケーション品質確保のためのモバイルネットワークアーキテクチャの提案	14
1.4	研究目的	16
1.5	本論文の構成	17
第 2 章	アプリケーション品質に基づく通信トラフィック制御に関する先行研究	18
2.1	クラウドサービスのトラフィック増加	18
2.2	多様なアプリケーショントラフィックの混在	22
2.3	ピークトラフィック時の無線リソース不足	25
2.4	本研究のアプローチ	29
第 3 章	TCP 中継器における基地局連携によるモバイルネットワークの TCP 高速化	32
3.1	はじめに	32
3.2	モバイルネットワークにおける TCP 性能向上方式	33
3.3	評価・考察	40
3.4	本章のまとめ	52
第 4 章	アプリケーション QoE に基づいた基地局スケジューリング方式の提案	53
4.1	はじめに	53
4.2	モバイル通信におけるスケジューリング方式	54
4.3	アプリケーション特性に基づく基地局スケジューリング方式	60
4.4	評価・考察	65

4.5	本章のまとめ	74
第 5 章	オフピークデータ通信のためのパッシブ型利用可能帯域推定方式	80
5.1	はじめに	80
5.2	オフピークデータ通信システムアーキテクチャ	81
5.3	利用可能帯域推定方式の提案	84
5.4	RB 利用率および利用帯域推定方式の評価	91
5.5	オフピークデータ通信への適用	99
5.6	本章のまとめ	100
第 6 章	結論	101
6.1	研究のまとめ	101
6.2	今後の課題	103
	参考文献	106

目次

1.1	モバイルネットワークアーキテクチャ	14
1.2	提案するモバイルネットワークアーキテクチャ	16
3.1	中継サーバを導入したネットワークアーキテクチャ	34
3.2	基地局バッファの挙動	35
3.3	基地局連携による TCP 高速化方式の構成	36
3.4	TCP 高速化方式のブロック図	36
3.5	基地局の滞留バッファ量変動と提案方式のの目標バッファ量	38
3.6	TCP 高速化方式の評価システム構成	40
3.7	実網評価実験に用いた帯域変動データ	41
3.8	各方式の RTT (CDF)	46
3.9	データセット A における各 TCP のインフライトバッファ量の推移	47
3.10	データセット B における各 TCP のインフライトバッファ量の推移	48
4.1	基地局スケジューリング方式で想定するシステムアーキテクチャ	54
4.2	基地局における通信プロトコル変換	55
4.3	基地局における MAC スケジューリング方式	56
4.4	基地局におけるリソースブロックの基本構成	57
4.5	リソースブロック割り当てアルゴリズム	58
4.6	提案方式 2 の Web, ビデオに対する重み特性	64
4.7	端末移動時のビデオ視聴 QoE の CDF (ビデオ端末と Web 端末は同数)	76
4.8	端末移動時の Web 閲覧 QoE の CDF (ビデオ端末と Web 端末は同数)	77
4.9	ビデオ, Web 端末割合を変化させた時のビデオ視聴 QoE の CDF	78
4.10	ビデオ, Web 端末割合を変化させた時の Web 閲覧 QoE の CDF	79
5.1	オフピークデータ通信システムアーキテクチャ	81

5.2	基地局におけるアンテナ数 1 および 2 の場合の RB 構成	85
5.3	MCS 決定シーケンス	86
5.4	LTE 実験ネットワークを利用した評価システム構成	91
5.5	段階負荷評価における RB 利用率推定結果	92
5.6	段階負荷評価における RB 利用率推定結果の AVR の累積分布関数 . . .	93
5.7	ランダム負荷評価における RB 利用率推定結果	94
5.8	ランダム負荷評価における RB 利用率推定結果の AVR の累積分布関数 .	95
5.9	商用 LTE ネットワークを用いた評価システム構成	96
5.10	利用可能帯域推定精度	97
5.11	利用可能帯域推定結果の AVR の累積分布関数	98

表目次

2.1	クラウドサービスの品質確保のための TCP 性能向上に対する先行研究 と提案手法の位置づけ	22
2.2	アプリケーションが混在する環境における品質確保に対する先行研究と 提案手法の位置づけ	26
2.3	オフピークデータ通信を実現するための利用可能帯域推定に対する先行 研究と提案手法の位置づけ	30
3.1	TCP 高速化方式の LTE 評価環境諸元	40
3.2	各方式の平均スループット (単位: Mbps)	44
3.3	各方式の平均利用効率と標準偏差	44
3.4	各方式の最大 RTT [単位:秒]	45
4.1	LTE システム帯域とリソースブロック数の関係	56
4.2	基地局スケジューリング方式評価のためのシミュレーションパラメータ	65
4.3	CQI=10 のビデオ視聴, Web 閲覧 QoE 評価結果	67
4.4	CQI=6 のビデオ視聴, Web 閲覧 QoE 評価結果	67
4.5	端末移動評価のビデオ視聴, Web 閲覧平均 QoE	69
4.6	端末移動評価のビデオ視聴, Web 閲覧許容端末割合	69
4.7	ビデオ, Web 端末割合を変化させた時のビデオ視聴, Web 閲覧平均 QoE	71
4.8	ビデオ, Web 端末割合を変化させた時のビデオ視聴, Web 閲覧許容端末 割合	71
5.1	オフピークデータ通信システムアーキテクチャ分類	81
5.2	CQI, MCS と TBS index の対応表	88
5.3	MCS, TBS index の対応表	89
5.4	TBS ($nRB = 1, \dots, 10$)	90

5.5	評価に利用した LTE 実験ネットワークの仕様	91
-----	-----------------------------------	----

第 1 章

序論

1.1 研究背景

モバイルネットワーク，高性能スマートフォンの進化・普及により，モバイル通信が重要な社会のインフラと認められて久しい．CISCO の調査によると，グローバルのモバイルデータトラフィックは 2017 年から 2022 年までに 7 倍増加すると見込まれている [1]．さらなる高速通信や，より低遅延アプリケーションの利用のため，第 5 世代のモバイル通信 (5G) も期待されている．モバイルネットワークで利用されるアプリケーションも多様になってきている．モバイル通信は電話による音声通信，テキストメッセージが主なトラフィックであったが，2019 年では，ビデオ，オーディオ，Web や SNS，ソフトウェアダウンロードなどが多くのトラフィックを占めると報告されている [2]．特にビデオサービスの利用の伸びが大きいと予測されており，同報告では，モバイルトラフィックのうちビデオトラフィックのシェアは 2018 年の 60% から 2024 年には 74% を占めるに到ると予測している．さらに，インターネットゲーム，VR (Virtual Reality) や AR (Augmented Reality) などの低遅延や広帯域を必要とするアプリケーション，IoT (Internet of Things) などのネットワークに接続した機器による通信の需要も大きくなると予測している．

1.2 モバイルネットワークにおける課題 – アプリケーション品質の確保 –

前節で述べたような大容量の通信需要に対応するため，通信キャリアは基地局の増加，新たな無線周波数帯の導入，5G などの高速通信方式の開発を進めている．しかし，通信キャリアにとって，様々なアプリケーション通信の品質を確保するのは容易ではない．こ

の原因として、

1. 通信キャリアを流れるトラフィックのうち、インターネット上の Web 閲覧、ビデオストリーミングサービスなど、クラウドサービスのトラフィックが増加していること
2. 多様なアプリケーショントラフィックが混在していること
3. トラフィック量の変動により、通信のために十分な無線リソースを確保できないこと

が挙げられる。

以下で、これらの原因により、アプリケーション通信の品質確保が容易ではないことを説明する。

1.2.1 クラウドサービスのトラフィック増加

CISCO によれば、通信キャリアを流れるトラフィックの多くはインターネット上のクラウドサービスのトラフィックであり、その割合は増加している [1]。このレポートでは、2017 年に全トラフィックの約 80% を占めるインターネットトラフィックが、2022 年には 88% にまで増加すると予測している。クラウドサービスでは、ほとんどのサービスがトランスポートプロトコルとして TCP (Transmission Control Protocol) を利用していることも特徴である [3]。

従来、通信キャリアでは、通信品質の確保のため、パケットロス率の保証や通信帯域確保を行ってきた。通信キャリアが独自で行っていた映像サービス [4] や音声通信サービス [5] は、UDP (User Datagram Protocol) で通信が行われていたため、それぞれのサービスに応じた通信帯域を確保し、パケットロス率を保証することで、映像品質、音声品質が確保できた。

一方、TCP ではプロトコルとして輻輳制御、再送制御を有することが知られている。輻輳制御は、利用可能な通信速度での通信を目標とし、かつ、ネットワークの輻輳を防ぐため、ネットワークへのデータ送信量を制御することである。アプリケーション品質を確保するため、通信キャリアが通信帯域を確保したとしても、TCP が輻輳制御によりデータ送信量を変化させるため、確保した帯域を使いきれるとは限らない。

再送制御は、ロスしたパケットを再送することで、パケットロスを防止することである。アプリケーションとしてロスが発生することがなくなるため、パケットロス率保証は意味をなさない。

さらに、インターネットアプリケーションでは、UDP が用いられてきた映像サービスや音声サービスにも TCP が利用されることが多くなっている [6, 7, 8]. このため、クラウドサービスの品質を向上するためには、5G や基地局などの物理レイヤでの高速化に加え、TCP 性能の向上が求められる。

1.2.2 多様なアプリケーショントラフィックの混在

前節で述べた通りモバイルネットワークにはビデオ、オーディオ、Web や SNS、ソフトウェアダウンロードなどのアプリケーションが混在している。これらのアプリケーションでは、アプリケーション品質として求められる要件が異なる。例えば、ビデオアプリケーションの場合、ビデオストリーミングでは映像が途切れないように、一定の通信速度が得られることが望ましい。一方、Web や SNS の場合は、Web ページ閲覧要求をしてからできるだけ早く Web データがダウンロードされて表示されることが望まれる。さらに、同じビデオアプリケーションでも、ビデオ通話の場合はリアルタイムで通信することも望まれる。このように、多様なアプリケーショントラフィックが混在するモバイルネットワークでは、アプリケーションごとに異なった要件に対する通信品質の確保が重要になってくる。

多様なアプリケーション品質確保のため、3GPP (The 3rd Generation Partnership Project) では、すべてのデータ通信を同様に扱うのではなく、アプリケーションごとに求められる遅延、帯域、アプリケーションごとの優先順位を QCI (QoS Class Identifier) として定めている [9]. QCI が設定された通信セッションでは、規定された遅延、帯域で通信するように基地局で通信制御が行われる。

しかし、QCI を利用した通信は通信キャリアが行うサービスを想定しているため、通信キャリアのコア網にある PCRF (Policy and Charging Rule Function) に登録したアプリケーションのみが対象となる。先に述べた通り、通信キャリアを流れるトラフィックはほとんどがインターネットのトラフィックである。インターネットでは決められたアプリケーションだけではなく、様々なアプリケーションが利用され、また新たなアプリケーションの利用が進んでいるため、すべてを PCRF に登録するのは現実的ではない。また、同じアプリケーションでも状態が異なるとパケットの優先度が変わり、固定的な優先度設定では対応できないことが考えられる。例えばビデオストリーミングでは、映像が途切れないことがアプリケーション品質の確保のために重要である。端末のバッファに十分データが蓄積されている状態と、ほとんどデータがない状態では、後者の方が映像が途切れる可能性が高いため、後者のパケットを優先すべきある。このように、多様なインター

ネットアプリケーションに対応するためには、静的に決められた QCI だけでなく、アプリケーションに適した優先度をつけて通信することが重要である。

1.2.3 ピークトラフィック時の無線リソース不足

モバイル通信の需要増加に対応するため、通信キャリアは基地局を増設している。しかし、基地局に収容できるトラフィック量は限界があるため、端末の通信要求に対して無線リソースを割り当てることができないことがある。特に基地局のトラフィック量は変動が大きく、トラフィック量が少ない時間帯や多い時間帯が発生する。このため、同じ場所でも十分な通信速度が得られる時間帯と通信速度が十分に出ない時間帯がある。

AT&T は商用モバイルネットワークのトラフィックを分析し、基地局におけるトラフィック量が多くなるピーク負荷が、一日にわたって頻繁に発生していると報告している [10]。このレポートでは、トラフィックのピークが発生する時間を最大 20 秒ずらすことができれば、新たな基地局設備を増強せず、またユーザの体感品質 (QoE, Quality of Experience) をさげることなく、平均 40% のトラフィックのピーク負荷を軽減することも報告している。

モバイルネットワークでは様々なアプリケーションが利用されており、それらのアプリケーションは大きくリアルタイムトラフィックと非リアルタイムトラフィックに分類可能である。リアルタイムトラフィックとは、データ到着時刻がアプリケーションの利用品質に影響を与えるトラフィック、例えば、音声通信、ビデオストリーミングや Web 閲覧などである。非リアルタイムトラフィックとは、データ到着が遅れてもアプリケーションの利用品質にあまり影響を与えないトラフィックであり、コンテンツのダウンロードトラフィックやソフトウェアのアップデートトラフィックなどが当てはまる。

基地局ではこれらのトラフィックを区別せず、同様に扱っている。このため、トラフィック負荷のピーク時に非リアルタイムトラフィックを伝送すると、リアルタイムトラフィックの到着が遅れ、リアルタイムトラフィックのアプリケーション品質が劣化する。

以上により、トラフィックのピーク負荷時には非リアルタイムトラフィックを送信せず、リアルタイムトラフィックを優先し、ピーク負荷ではない時間に非リアルタイムトラフィックを送信する仕組みが求められる。

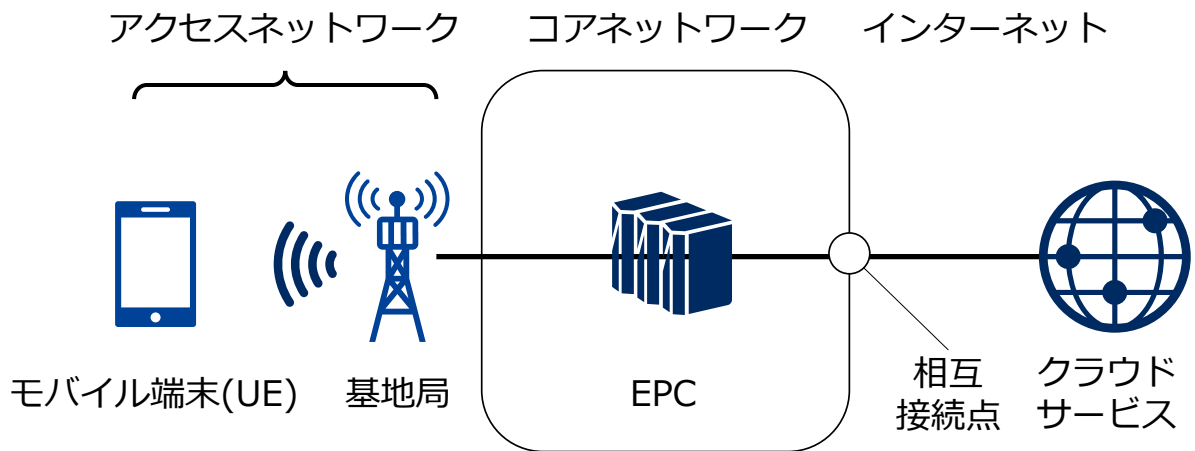


図 1.1 モバイルネットワークアーキテクチャ

1.3 アプリケーション品質確保のためのモバイルネットワークアーキテクチャの提案

モバイルネットワークのアーキテクチャを図 1.1 に示す。モバイルネットワークは大きく、アクセスネットワーク、コアネットワーク、インターネットに分けられ、それぞれのネットワークを経由してデータ通信が行われる。

UE は無線を使って基地局に接続される。このネットワークをアクセスネットワークと呼ぶ。通常、基地局には複数の UE が接続される。基地局とインターネットの間にはコアネットワークと呼ばれるネットワークがある。コアネットワークは、UE や基地局の管理、インターネットのデータ通信のゲートウェイなどから構成される。LTE の場合のコアネットワークは EPC (Evolved Packet Core) と呼ばれる。一般的にアクセスネットワークとコアネットワークがモバイルキャリアのネットワークである。コアネットワークから先は、相互接続点と呼ばれる他のネットワークとの接続点を経由してインターネットにつながる。

ここで説明したモバイルネットワークにおいて、インターネットから UE までのデータ通信のボトルネックになる可能性が最も高い場所はアクセスネットワークである。アクセスネットワークは有限な電波資源を複数の UE で共有するため、UE の混雑によりボトルネックになりやすい。

一方、コアネットワークは利用増に対する回線の増強が容易であること、インターネットは混雑時にはボトルネックリンクを回避する手段があること、さらに、コアネットワー

ク、インターネットはアクセスネットワークに比較して十分な回線容量を持っていることから、ボトルネックリンクになりにくい。

今後 5G などによりアクセスネットワークが進化しても、基本的なアクセスネットワークの構成や方式は変わらないため、この課題は存在し、モバイルネットワークにおいて解決すべき本質的な課題である。

前節で述べたモバイルネットワークの課題に対して、これまでモバイルキャリアは主に電波資源の利用効率向上、端末間の公平性を重視した通信制御を行ってきた。しかし、電波資源や公平性のみの考慮では、アプリケーションの利用品質が確保できない。本論文では、コアネットワーク、基地局、UE で統合して通信制御を行うことで、アプリケーション品質を確保するモバイルネットワークアーキテクチャおよび通信制御方式を提案する。

提案するモバイルネットワークアーキテクチャを図 1.2 に示す。提案アーキテクチャでは、コアネットワーク、基地局、UE のそれぞれで通信制御を行うことでアプリケーション品質を確保する。

■コアネットワークにおける通信制御 インターネットで多く利用される TCP 通信は、アクセスネットワークで十分な通信速度が得られないという課題が報告されている。この課題に対応するため、本アーキテクチャでは、アクセスネットワークに比べ通信速度が十分確保できるコアネットワークにおいて、インターネットの通信プロトコルをアクセスネットワークに適したプロトコルに変換する。具体的にはコアネットワークにインターネット通信を中継する中継サーバを導入し、中継サーバでプロトコル変換を行う。これにより、ボトルネックになりやすいアクセスネットワークで、インターネット通信の通信速度、利用品質を確保する。

■基地局における通信制御 基地局では、有限な無線資源を複数の UE に割り当てるスケジューラが課題である。特に UE が増加し、基地局が混雑する状況では、すべての UE に対して公平に無線資源を割り当てることはできない。これに対し、本論文のアーキテクチャにおける基地局では、利用するアプリケーションの品質や状態に応じてパケット優先度を決定するスケジューラを導入する。アプリケーションの品質に応じた通信制御を行うことで、アプリケーション品質に満足するユーザを増やすことを目的とする。

■UE における通信制御 アクセスネットワークが非常に混雑しているピーク負荷の状況において、UE が自律的に優先しなくてもよい通信を遅らせる。通常、モバイルネットワークでは、UE は無線資源の割り当てに関与しないが、ピーク負荷時に自律的に通信制御を行い、基地局の負荷を減少させることで、他のユーザのアプリケーション品質を確保

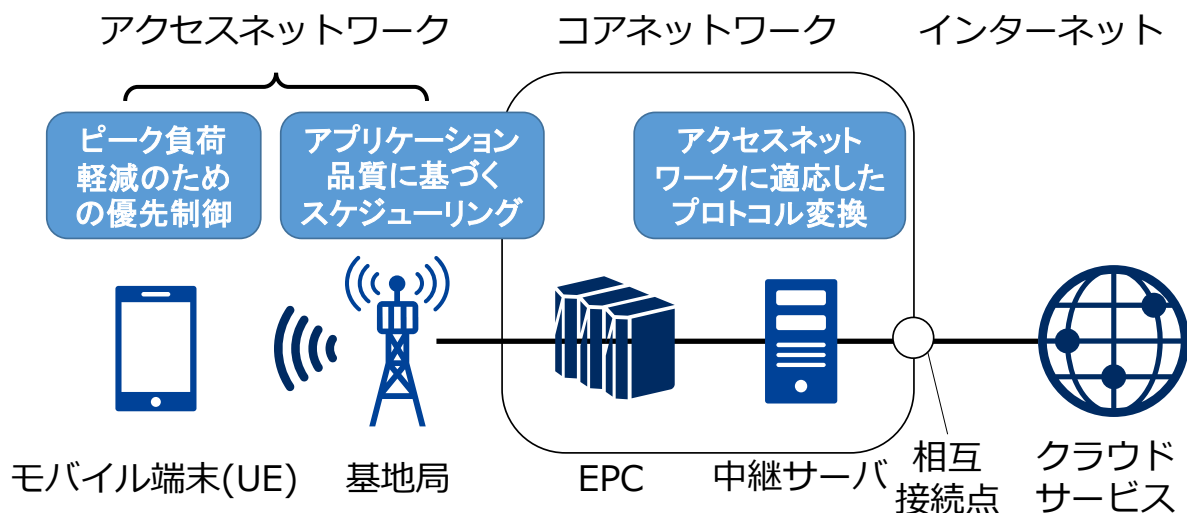


図 1.2 提案するモバイルネットワークアーキテクチャ

することが可能である。

1.4 研究目的

本研究の目的は、モバイルネットワークのアプリケーション品質を確保することである。そのため、前節で述べたモバイルネットワークアーキテクチャにおいて、ユーザが利用するアプリケーション品質を考慮した通信制御方式を提案する。モバイルネットワークのコアネットワーク、基地局、端末 (UE) に通信制御方式を導入することで、インターネット通信の TCP 性能の向上、アプリケーションごとの特性に基づいた基地局スケジューリングによるアプリケーションごとの品質確保および、ピークトラフィック時でもリアルタイム通信の品質確保が可能である。

本論文の貢献は下記の通りである。

- アプリケーション品質を確保するためのモバイルネットワークアーキテクチャを提案した。
- コアネットワークにおいて TCP 性能を向上する通信制御方式を提案し、従来方式と比較して高い TCP スループットを短い往復遅延 (RTT, Round Trip Time) で実現できることを示した。
- 基地局におけるアプリケーション品質を考慮したスケジューリング方式を提案した。ビデオ視聴と Web 閲覧が混在する環境における評価を行い、Web 閲覧端末の平均 QoE を最大 1.48 ポイント向上できること、またビデオ視聴端末と Web 閲覧

端末のアプリケーション品質が一定以上得られる許容端末の数を最大 2.1 倍増加させることができることを示した。

- UE において、基地局と UE 間の利用可能帯域をパッシブに推定できる推定方式を提案し、推定結果を用いて非リアルタイムトラフィックをピークトラフィックから遅延させることで、基地局負荷を軽減できることを示した。

これらの提案方式は今後導入が進む 5G 等の通信方式にも有効であり、提案方式により、モバイルネットワークのアプリケーション品質を向上し、モバイルネットワークへの投資効果を向上可能であることを示した。

1.5 本論文の構成

以下、2 章において、本章で述べたモバイルネットワークの課題についての先行研究の取り組みとその課題について紹介する。3 章において、モバイルネットワークにおける TCP 性能の向上方式の提案方式を、4 章において、アプリケーションごとの特性に基づいた基地局スケジューリング方式の提案方式を、5 章において、ピークトラフィックを軽減するオフピークデータ通信方式の提案方式を説明し、6 章でまとめを行う。

第2章

アプリケーション品質に基づく通信 トラフィック制御に関する先行研究

前章ではモバイルネットワークにおいてアプリケーションの品質を確保するには、以下の課題があると説明した。

1. 通信キャリアを流れるトラフィックのうち、インターネット上のクラウドサービスのトラフィックが増加していること
2. 多様なアプリケーショントラフィックが混在していること
3. トラフィック量の変動により、通信のために十分な無線リソースを確保できないこと

本章では、それぞれの課題に関して、先行研究の紹介とその課題を指摘し、本研究のアプローチについて説明する。

2.1 クラウドサービスのトラフィック増加

1章で述べたように、通信キャリアを流れるトラフィックの80%以上はインターネット上のクラウドサービスのトラフィックが占めている [1]。通信キャリアでは従来から、通信品質確保のためパケットロス率の保証や通信帯域確保を行ってきた。これは、通信キャリアが想定しているサービスが、UDPを用いた音声通信サービスや映像配信サービスであったからである。音声通信品質、映像配信品質を確保するためには、サービスに応じた通信帯域を確保し、パケットロス率を保証すれば十分であった。

しかし、クラウドサービスでは、ほとんどのサービスがトランスポートプロトコルとし

て TCP を利用している [3]。TCP ではプロトコルとして輻輳制御、再送制御を有することが知られている。輻輳制御は、ネットワークの輻輳を防ぐため、ネットワークへのデータ送信量を制御することである。アプリケーション品質を確保するため、通信帯域を確保したとしても、TCP が輻輳制御によりデータ送信量を変化させるため、確保した帯域を使いきれるとは限らない。再送制御は、ロスしたパケットを再送することで、プロトコル的にパケットロスを防止することである。アプリケーションとしてロスが発生することがなくなるため、パケットロス率保証は意味をなさない。

このため、クラウドサービスの品質を向上するためには、これまでの UDP 通信のためのパケットロス率の保証や通信帯域確保ではなく、モバイルネットワークにおける TCP 性能の向上が求められる。

2.1.1 TCP 性能向上に関する研究

TCP では輻輳制御のため、通信帯域に空き領域があるにも関わらず、スループットを抑制することが課題となっており、モバイルネットワークに限らず、TCP 性能、特にスループット向上の取り組みに関しては多くの研究がなされてきた。代表的な TCP 性能向上方式として TCP BBR (Bottleneck Bandwidth and Round-trip propagation time) が挙げられる [11]。TCP BBR では送信端末からの送信レートを定期的に変動させることで通信可能な通信速度を推定し、最適な送信レートを算出している。

近年、モバイルネットワークにおける TCP 性能の劣化が指摘されるようになってきた。Liu ら [12] は、3G/HSPA 環境におけるダウンロード実験で、既存の TCP はモバイルネットワークの帯域を十分に利用できていないことを指摘した。Li ら [13] は、長期にわたる実測により、高速鉄道で 3G/4G を利用した場合に TCP スループット、RTT が劣化することを示した。

従来の有線ネットワークとモバイルネットワークの大きな特性の違いを引き起こしているのが、モバイルネットワークの基地局にあるバッファである [14, 15, 16]。モバイルネットワークの基地局バッファは、電波資源の利用効率向上、無線エラーによるロスデータの再送のために用意されるが、このバッファにより、モバイルネットワークにおける TCP のスループットおよび RTT が悪化していることが指摘されている。近年のインターネットの高速化により、インターネット内に多くのデータが蓄積され、TCP の性能が出ない Bufferbloat が指摘されている [17]。モバイルネットワークの基地局バッファによる TCP 性能劣化も、モバイルネットワークにおける Bufferbloat と言うことができる。しかし、インターネットとモバイルネットワークのバッファの挙動が大きく異なるため、モバイル

ネットワークに適した TCP 性能向上方式が求められている。

Liu ら [12] は、モバイルオペレータ網内へのプロキシサーバの導入を提案し、インターネット側の TCP とモバイル側の TCP を分けることで性能が向上することを示した。Kim ら [18] は、インターネット側の TCP とモバイル側の TCP を分ける Split-TCP により、3G、4G 環境におけるスループットが最大 2 倍になることを実網で示した。従来の TCP では、有線ネットワークとネットワーク内に存在するルータの挙動を想定した TCP アルゴリズムを用いていたが、モバイルネットワークの挙動は有線ネットワークと大きく異なるため、TCP セッションをそれぞれの網内に閉じて制御することで性能向上が可能であることを示している。

Kumar ら [15] は、基地局バッファの影響で遅延が増加し、インタラクティブなアプリケーションの性能劣化につながると指摘した。一方、シミュレーションにより、遅延を低減するためにバッファを少なくすると、スループットが落ちることも合わせて示した。

2.1.2 モバイルネットワークにおける TCP 輻輳制御に関する研究

このようなモバイルネットワークの特性に対応し、モバイルネットワークの TCP 性能向上のため、TCP の輻輳制御を最適化する研究も実施されている。Kanagarathinam ら [19] は、モバイルネットワークの無線エラーは輻輳ではないため、TCP の輻輳制御を行うべきではないと主張した。可用帯域の推定値と実際に転送している転送レートとのずれからパケットロスの原因が無線エラーか輻輳由来かを判断し、無線エラーの場合は輻輳制御を行わないことで無線の変動に対応している。Leong ら [20] は、TCP のスループット向上と RTT 低減の両立を目指す TCP 輻輳制御方式を提案している。基地局バッファによる遅延は下り方向にのみ発生するため、上り遅延を考慮せず、下り遅延のみを考慮した輻輳制御方式を考案し、遅延を最大 1/2 に低減している。Chen ら [21] は、モバイルネットワークの利用可能帯域が長期的な傾向や一定周期の変動傾向があると指摘した。長期傾向、周期変動を考慮することで可用帯域の推定精度が向上し、平均スループットが最大 72% 向上したと報告している。Jiang ら [22] は、受信端末における受信ウィンドウ (RWIN) を動的に制御することで、モバイルネットワーク内のバッファに蓄積されたデータの端末への送信を促し、TCP の RTT の短縮およびスループット向上を実現した。

2.1.3 TCP トラフィックを想定したモバイル機器の最適化の研究

以上は TCP アルゴリズムやパラメータ制御による TCP 性能向上の研究であるが、TCP トラフィックが流れていることを想定してモバイルネットワーク内の機器の挙動を最適化する研究も行われている。Shojaedin ら [16] は、基地局から端末へのデータ送信タイミングを決定するスケジューリングアルゴリズムが TCP の挙動に合っていないことを示し、Q-MW と呼ばれる TCP の挙動を考慮したスケジューリング方式を提案し、シミュレーションより平均 10% のスループット向上を実現した。

Zhu ら [23] は、TCP、モバイルネットワークを独立で制御するのではなく、モバイルネットワークと連携することで TCP 性能向上を行う Loosely-Coupled TCP/Closely-Coupled TCP を提案した。基地局における端末への無線資源割当情報を利用し、送信レートを制御する。本方式は主にリアルタイム性向上のための低遅延化を目指しており、37% の遅延短縮効果を得ている。

Jin ら [24], Lee ら [25] は、4G と Wi-Fi, 5G と 4G の複数回線を利用し、Multi-path TCP により TCP スループットを向上する方式を提案している。両者とも複数回線それぞれの回線のスループット、RTT に基づき、それぞれの回線で通信するデータ量を調整する TCP アルゴリズムにより、TCP 性能の向上を目指している。

2.1.4 クラウドサービスの品質確保のための TCP 性能向上に対するアプローチ

以上、先行研究では、モバイルネットワークにおける TCP 性能の劣化が報告されており、その大きな原因は基地局に存在するバッファであると指摘されている。しかし、これまで基地局のバッファ量を用いることで TCP 性能を向上させる研究は取り組まれてこなかった。本研究では、基地局から基地局バッファに蓄積されたデータ量 (バッファ量) に基づき、TCP の輻輳制御を行うことで TCP 性能を向上する TCP アルゴリズムを提案する。ここでいう TCP 性能とは TCP スループット向上と遅延低減を両立することを示す。

これまで指摘された通り、モバイルネットワークとインターネットは特性が異なるため、本研究でも、モバイルネットワーク内に TCP 中継機を導入し、インターネットを経由するクラウドサーバと TCP 中継機間の TCP とモバイルネットワークを経由する TCP 中継機と UE 間の TCP を分離する。提案する TCP アルゴリズムは、TCP 中継機が基地局から基地局バッファ量を取得し、TCP 中継機上で動作させることで、TCP 中継機と

表 2.1 クラウドサービスの品質確保のための TCP 性能向上に対する先行研究と提案手法の位置づけ

TCP 制御の場所	対象とする TCP 性能	
	スループット	往復遅延 (RTT)
クラウドサービス	特徴: TCP の解析・制御が容易. アクセスネットワークへの適応が困難	
	Kanagarathinam [19], Chen [21]	
	Leong ら [20], Jiang ら [22]	
コアネットワーク	特徴: アクセスネットワークへの適応が比較的容易. TCP の解析, 制御が容易.	
	Liu ら [12], Kim [18]	
	提案手法	
基地局	特徴: アクセスネットワークへの適応が容易. TCP の解析・制御は困難.	
	Shojaedin [16]	Zhu[23]
端末 (UE)	特徴: アクセスネットワークへの適応は容易. UE での TCP 制御は限定的.	
	Jiang [22]	

UE 間の TCP 性能を向上することを目的とする.

表 2.1 に先行研究と本研究の位置づけ, 特徴についてまとめた.

2.2 多様なアプリケーショントラフィックの混在

前章で述べた通りモバイルネットワークにはビデオ, オーディオ, Web や SNS, ソフトウェアダウンロードなどのアプリケーションが混在している. これらのアプリケーションでは, アプリケーション品質として求められる要件が異なるため, アプリケーションごとに異なった要件に対する通信品質の確保が重要になってくる.

3GPP では, すべてのデータ通信を同様に扱うのではなく, アプリケーションごとに求められる遅延, 帯域, アプリケーションごとの優先順位を QCI として定めている [9]. QCI が設定された通信セッションでは, 規定された遅延, 帯域で通信するように基地局で

通信制御が行われる。

しかし、QCI による優先度設定を利用した通信は通信キャリアが行うサービスを想定しているため、通信キャリアのコア網にある PCRF に登録したアプリケーションのみが対象となる。先に述べた通り、通信キャリアを流れるトラフィックはほとんどがインターネットのトラフィックである。インターネットでは決められたアプリケーションだけではなく、様々なアプリケーションが利用され、また新たなアプリケーションの利用が進んでいるため、すべてを PCRF に登録するのは現実的ではない。また、同じアプリケーションでも状態が異なるとパケットの優先度が変わり、固定的な優先度設定では対応できないことが考えられる。このように、多様なインターネットアプリケーションに対応するためには、静的に決められた QCI だけでなく、アプリケーションに適した優先度をつけて通信することが重要である。

2.2.1 基地局スケジューリングによる QoS およびアプリケーション品質確保に関する研究

モバイルネットワークでは、基地局が利用する電波資源を複数のユーザで共有するため、基地局におけるパケットスケジューリングが大きな特徴であり、アプリケーション品質および公平性の確保のため、数多くの研究がなされてきた。

Capozzi らは LTE ネットワークのダウンリンクで利用されるスケジューリング方式についてサーベイを行った [26]。基地局と端末間の電波状況を利用するかどうか (Channel-aware/unaware) とアプリケーション QoS を考慮するかどうか (QoS-aware/unaware) の二軸で分類し、複雑性・スケーラビリティ、電波利用の効率性、公平性、QoS (パケット遅延、パケットロス率、スループット) の観点でスケジューリング方式を整理した。

Capozzi らが整理した QoS 指標に加え、ユーザが利用するアプリケーション品質を考慮したスケジューリング方式の研究も増えてきている。その多くが、低遅延が求められる音声通信 (VoIP, Voice over IP) や高いスループットを要求する映像通信を対象としている [27, 28, 29, 30]。例えば、Asadollahi らは、既存の LOG RULE スケジューラ、E2M スケジューラを組み合わせた Channel-aware/QoS-aware スケジューリング方式を提案し、ビデオと VoIP トラフィックの遅延低減を実現した [27]。

2.2.2 インターネットトラフィックの品質を考慮した基地局スケジューリング方式の研究

近年では、通信帯域の多くをインターネットトラフィックが占めることを背景に、インターネットトラフィックの品質を考慮したスケジューリング方式の提案も増えている。既存のスケジューリング方式は、遅延低減、スループット向上、パケットロス率低下をめざしているが、インターネットトラフィックはほとんどが TCP を利用しているため、パケットレベルでの制御が TCP の性能向上につながるとは限らない。そのため、Ramesh らは、TCP スループットを改善する基地局 MAC スケジューラを提案した [31]。TCP ではダウンリンクだけでなく、確認応答 (ACK/NACK) のため、アップリンクのスケジューラの改善も重要であることを指摘している。また、Adesh らは、様々な TCP Variant に対して、基地局スケジューラが与える影響を評価し、アプリケーションの特性、基地局のバッファ量により、よりよい TCP を選択すべきであるとした [32]。

さらにインターネットアプリケーションの挙動、特に、インターネットアプリケーションの中でも多くのトラフィックを占めるビデオを対象としたスケジューリング方式の研究も増えてきた。

Jabbar らは、モバイルネットワークにおけるビデオストリーミング視聴について、クライアントに蓄積されたバッファ量と端末の電波強度から、バッファが枯渇する確率を求め、無線リソース割り当てを決定するアルゴリズムを提案した [33]。シミュレーションから、ビデオのビットレートが安定しかつ、ビデオバッファ量も多くなり、体感品質が高くなることを示している。クライアントバッファ量がビデオストリーミングの視聴品質に与える影響を考慮したスケジューリング方式になっている。

Rodrigues らは、ビデオストリーミングの端末バッファ量および推定値をもとに、端末のバッファ量が少ないほど優先度を高くするスケジューリング方式を提案した [34]。シミュレーションによる評価では、QoE 指標によりビデオユーザの QoE を測定し、QoE が 3 以上のユーザ (満足しているユーザ) が増加することを示した。スループットや遅延といったネットワーク指標ではなく、ユーザ観点の評価指標を利用している点が新しい。

ビデオストリーミングに加えて、特にビデオの次にインターネットトラフィックの多くを占める Web アプリケーションを考慮したスケジューリング方式も研究されてきた。Yoon らは、ビデオと Web が混在した環境において、ビデオストリーミングの品質向上のため、再生停止可能性が高い端末を優先するスケジューリング方式を提案し、ビデオの再生停止が減少し、ビデオの体感品質が向上することを示した [35]。

Heder らは、ビデオストリーミングと Web アプリケーションの複数端末の体感品質を向上させることを目的としたスケジューラを提案した [36]. ビデオセッションはビデオのビットレート, Web セッションはダウンロードの残り時間を基にして, 必要な帯域を設定し, 必要帯域を満たすようなスケジューリングを行う. シミュレーション評価で, ビデオ視聴を取りやめるユーザ数が減ること, Web はダウンロード時間が短くなることを示した.

Web アプリケーションの体感品質は, ユーザがページ閲覧を許容する限界である許容遅延があることが指摘されている [37, 38]. 西川らは, 許容遅延を満たすユーザ数を最大にすることを目的としたスケジューリングを提案した [39]. これは, Rodrigues らの QoE が 3 以上を評価指標としたことと同じ考え方である [34]. 平均 QoE やスループットを上げるだけでなく, 満足するユーザ数を増やすことが重要であると言える.

2.2.3 アプリケーションが混在する環境における品質確保に対するアプローチ

以上のように, モバイルネットワークにおいて, アプリケーション品質および公平性を確保するために基地局のスケジューリング制御の研究が多く行われてきた. 近年では, ビデオストリーミングの再生停止を防止するためや, Web ダウンロード時間を短くするためなど, アプリケーション品質を考慮したスケジューリング方式も提案されている. しかし, 多くは単独のアプリケーションの品質を確保するにとどまっており, 複数アプリケーションが混在した場合のスケジューリング方式についてはほとんど論じられていない. 本研究では, モバイルネットワークの基地局において, 複数のアプリケーションごとの特性に基づき体感品質を定式化し, スケジューリング方式を提案する. 特に, 多くのユーザが複数アプリケーションを利用している環境を想定し, 平均的な体感品質を上げるのではなく, アプリケーションごとに体感品質が許容できるユーザ数を増加することを目的としたスケジューリング方式を提案する.

表 2.2 に先行研究と本研究の位置づけ, 特徴についてまとめた.

2.3 ピークトラフィック時の無線リソース不足

モバイル通信の需要増加に対応するため, 通信キャリアは基地局を増設している. しかし, 基地局に収容できるトラフィック量は限界があるため, 端末の通信要求に対して無線リソースを割り当てることができないことがある.

表 2.2 アプリケーションが混在する環境における品質確保に対する先行研究と提案手法の位置づけ

考慮するアプリケーション	特徴	
考慮なし	通信品質 (パケット遅延, パケットロス率, スループット) のみを考慮.	Capozzi [26].
特定のアプリケーション	登録されたアプリケーション (3GPP), ビデオ, 音声通信の遅延, スループットのみを考慮.	3GPP [9], Vasquez-Toledo [28], Tabany [29], Asadollahi [27]. Lee[30], Jabbar[33], Rodrigues[34]
複数アプリケーションのうち特定アプリの品質	複数アプリの混在環境を想定. 混在アプリのうち, ある特定アプリの品質向上を目指している.	Ramesh [31], Adesh [32], Heder[36], Yoon[35]
複数アプリケーションの品質を同時に向上	複数アプリの混在環境を想定し, かつ複数アプリケーションの品質を同時に向上することを目的としている.	提案手法

AT&T は商用モバイルネットワークのトラフィックを分析し, 基地局におけるトラフィック量が多くなるピーク負荷が, 一日にわたって頻繁に発生していると報告している [10]. このレポートでは, トラフィックのピークが発生する時間を最大 20 秒ずらすことができれば, 新たな基地局設備を増強せず, またユーザの体感品質 (QoE, Quality of Experience) を下げることなく, トラフィックのピーク負荷量を平均 40% 軽減することができることも報告している.

モバイルネットワークでは様々なアプリケーションが利用されており, それらのアプリケーションは大きくリアルタイムトラフィックと非リアルタイムトラフィックに分類可能である. 基地局ではこれらのトラフィックを区別せず, 同様に扱っているため, トラ

フィック負荷のピーク時に非リアルタイムトラフィックを伝送すると、リアルタイムトラフィックの到着が遅れ、リアルタイムトラフィックのアプリケーション品質が劣化する。

以上により、トラフィックのピーク負荷時には非リアルタイムトラフィックを送信せず、リアルタイムトラフィックを優先し、ピーク負荷ではない時間に非リアルタイムトラフィックを送信する仕組みが求められる。

2.3.1 オフピークデータ通信に関する研究

AT&T の報告 [10] は、非リアルタイムトラフィックの通信をトラフィック負荷がピークとなるタイミングをずらすことで、ユーザの体感品質を下げずにトラフィック負荷を下げるができるオフピークデータ通信について示唆している。

リアルタイムトラフィックを非リアルタイムトラフィックより優先する方法については、前節で述べた通り、3GPP では、アプリケーションごとの優先順位を QCI として定めている [9]。QCI によりリアルタイムトラフィック、非リアルタイムトラフィックに設定された通信セッションでは、基地局で通信制御が行われるため、オフピークデータ通信が実現できる。しかし、QCI による優先度設定は、通信キャリアが行うサービスのみを想定しており、インターネットのトラフィックでは利用できないことが課題である。

Kitahara らは、UE が自動的にオフピークを推定し、ピークトラフィック時には、UE 自ら非リアルタイムトラフィックの通信を遅らせることで、ピークトラフィックを削減するオフピークデータ通信システムを提案している [40]。Kitahara らの研究では UE がオフピークを推定するために、UE が過去の利用帯域の履歴により基地局の負荷が高いかどうか (ピークトラフィックかどうか) を推定している。しかしながら、基地局の負荷を推定するために、試験的にデータ通信を行っており、負荷を増大させてしまうという欠点がある。

オフピークデータ通信システムの可能性は示唆しているものの、試験的なデータ通信を行わずにピーク負荷を検出するための研究が求められる。

2.3.2 モバイルネットワークの利用可能帯域推定に関する研究

通信アプリケーションの品質向上、ネットワークの利用効率向上の両面から、モバイルネットワークにおいてユーザが利用できる通信速度 (利用可能帯域) を推定することが重要になってきている。これは、モバイルネットワークが広く使われるようになり、またビデオストリーミングのような大容量アプリケーションなど、様々なアプリケーションが利

用されてきており、ユーザがモバイルネットワークの利用可能帯域に関心を持つようになったことが原因の一つである。例えば、LTE では仕様上 150 Mbps の通信速度が出るが、実際にユーザの利用可能帯域は、他のユーザ間の電波リソースの共有、電波干渉や UE の移動による電波品質の変動により、基地局と UE 間のモバイルアクセスネットワークにおける利用可能帯域が大きく変動する。このため、ユーザ、通信キャリアともにモバイルネットワークの利用可能帯域を推定することが重要な課題になっている。

これまで提案されている多くの利用可能帯域推定はアクティブ型利用可能帯域推定と呼ばれ、推定のためのパケット (プローブパケット) を送信することで利用可能帯域を推定している [41, 42, 43, 44, 45, 46, 47]。しかし、プローブパケットは、アプリケーション通信以外の通信を発生させるため、基地局の負荷が増大する。それに加えて、UE ではパケットを送信するために、無線通信リンクを待機状態から接続状態に変更する必要がある。無線通信リンクの接続状態は待機状態に比べると電力消費が多いため、プローブパケットの利用は UE の電池消費に影響が出る。このため、利用可能帯域推定のためにプローブパケットを利用しないパッシブ型の利用可能帯域推定技術が求められる。

UE がパッシブに基地局負荷を推定する方法も提案されている [48]。提案手法は電波強度から基地局負荷を推定しているが、隣接基地局の干渉を考慮にいないため、基地局負荷のおおかまかトレンドを予測することにとどまっている。

UE が取得できる電波品質指標、すなわち RSRP (Reference Signal Receive Power), RSRQ (Reference Signal Receive Quality), SINR (Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio) から LTE のダウンロードスループットをモデル化した研究もされている [49, 50]。これらの研究により、電波品質指標と利用可能帯域が関係することが示されているが、予測精度については今後の研究とされている。

Aceto らは、UE で取得可能な基地局と UE 間の電波品質を用いることで利用可能帯域が推定可能であることを示唆している [51]。

Iordache らも、SINR と LTE の利用可能帯域 [bit/s/Hz] の関係について報告している [52]。基地局の混雑度推定として提案済みの利用されていないリソースブロック (Resource Block, RB) の数の推定方式 [53, 54] と組み合わせることで、利用可能帯域推定が可能である。しかし、3GPP 仕様では利用可能帯域は両者の単純な組み合わせではなく、利用可能帯域は RB 利用率に依存していることが示されており、より精度の高い推定方式が求められる [55]。

2.3.3 機械学習を用いて利用可能帯域を推定する研究

近年では、機械学習手法を導入して利用可能帯域を推定する手法がいくつも提案されている [56, 57, 58, 59, 60].

Yue ら, Raca らの研究は電波品質指標である RSRP, RSRQ および CQI (Channel Quality Indicator) の時系列データを学習することで利用可能帯域の推定方式を提案している [56, 57, 58]. これらの研究は、学習データとしてプローブパケットによるダウンロード速度や PDCP (Packet Data Convergence Protocol) スループットや PDCP 遅延を利用しており、アクティブ型推定方式に分類できる.

Falkenberg らは、機械学習を利用したパッシブ型推定方式を提案している [59]. 本研究では、電波品質指標のみを用いているが、UE 以外の電波測定装置で測定した電波指標も用いており、現実環境への適用のハードルが高い.

Nikolov らは、ニューラルネットワークを用いた LTE のアップリンクスループットをパッシブに推定する手法を提案している [60].

2.3.4 オフピークデータ通信を実現するための利用可能帯域推定のアプローチ

以上、利用可能帯域を推定するため、アクティブ型、パッシブ型および機械学習を利用する研究について紹介した. 本研究の目的はオフピークデータ通信の実現であり、ピーク時のトラフィックを増加させるアクティブ型の利用可能帯域推定方式は目的に合致しないため、パッシブ型の方式が必要である. また、機械学習は利用可能帯域を推定するために有用な方式であるが、学習データの有効性や環境依存性について考慮する必要がある. 解析的な推定方式と機械学習方式を組み合わせることで、より有効な推定方式の提案が可能であると考えられる. このため、本研究では、パッシブな手法により解析的に利用可能帯域を推定する方式を提案する.

表 2.3 に先行研究と本研究の位置づけ、特徴についてまとめた.

2.4 本研究のアプローチ

以上、モバイルネットワークでアプリケーション品質を確保するために前章で挙げた課題に対するアプローチをまとめる.

表 2.3 オフピークデータ通信を実現するための利用可能帯域推定に対する先行研究と提案手法の位置づけ

利用可能帯域推定に用いる情報	特徴	
試験通信によるパケットの挙動	推定のためにパケット通信を必要とするため、ピーク負荷の増大や端末の電力を多く消費.	Kitahara [40], Sato [41], Dovrolis [42], Hu [43], Jain [44], Strauss [45], Lakshminarayanan [46], Li [47].
試験通信によるパケットの挙動と端末で取得できる電波品質指標	推定のためにパケット通信を必要としているため、ピーク負荷の増大などの欠点がある.	Yue [56], Raca [57, 58]
複数の端末で取得した電波品質指標 (RSRP, RSRQ, CQI など)	端末で取得できる情報のみを利用し、ピーク負荷の増大などの欠点はない. しかし、複数の端末の情報を必要としているため、実現が困難.	Falkenberg [59]
端末で取得した電波品質指標 (RSRP, RSRQ, CQI など)	一台の端末で取得できる情報のみを利用. 提案手法以外は、利用可能帯域推定の可能性を示したのみであり、実網による詳細評価は未検証.	提案手法, Chakraborty [48], Cainey [49], Pervez [50], Aceto [51]

2.4.1 インターネット上のクラウドサービスの増加

通信キャリアのトラフィックのほとんどを占めるインターネット上のクラウドサービスの品質を確保するため、モバイルネットワークにおいて、多くのクラウドサービスで利用されている TCP の性能を向上する. 特に、本研究ではモバイルネットワークの基地局と

連携する TCP アルゴリズムを提案する。本提案では、モバイルネットワークの特徴である基地局に蓄積されるバッファ量に基づくことで、モバイルネットワークにおける TCP のスループット向上，遅延低減の両立を目指す。

2.4.2 多様なアプリケーショントラフィックの混在

モバイルネットワークでは、インターネットの多様なトラフィックが混在して利用されており、それらのトラフィックの品質を確保するため、モバイルネットワークの基地局において、ビデオ，Web 単体のアプリケーション QoE ではなく、複数のアプリケーションごとの特性と体感品質に基づいたスケジューリング方式を提案する。特に、アプリケーションごとに体感品質が許容できるユーザ数を増加することを目的としたスケジューリング方式を提案する。

2.4.3 ピークトラフィック時の無線リソース不足

ピークトラフィック時でも非リアルタイム通信トラフィックの優先度を下げることによって、ピーク負荷を下げ、リアルタイム通信トラフィックに無線リソースを割り当てるオフピークデータ通信を実現する。オフピークデータ通信では、ピークトラフィックであるかどうかを検知する手法が最も重要な課題であり、本研究では、ピークトラフィックの検知のために追加トラフィックを必要としないパッシブ型の利用可能帯域推定方式を提案する。

以下の章で、それぞれの方式について説明する。

第 3 章

TCP 中継器における基地局連携によるモバイルネットワークの TCP 高速化

3.1 はじめに

本章では，通信キャリアを流れるトラフィックのほとんどを占めるクラウドサービスのアプリケーション品質を向上するため，クラウドサービスで用いられる TCP 性能の向上方式を提案する。

クラウドサービスには様々なアプリケーションがあり，通信スループットを要求するアプリケーション，低遅延を要求するアプリケーションなど，様々である。しかし，モバイルネットワークの基地局には大容量バッファが存在しているため，スループットと低遅延の両立が難しいことも知られている [61]。

そのため，本章では，モバイルネットワークにおいて，通信スループットの向上と低遅延を両立する TCP の性能向上方式を提案する。特にモバイルネットワークの基地局に大量のデータが蓄積されることによる TCP 性能劣化を改善するため，基地局に蓄積されているデータ量に基づいて TCP の送信レートを制御する方式を提案する。これにより，基地局から送信可能な通信速度をできるだけ達成しつつ，基地局に多くのデータを蓄積せず，TCP の往復遅延を短くすることができる。

以下，3.2 節で基地局と連携した TCP 性能向上方式の提案，3.3 節で提案方式の評価・考察を行い，3.4 節でまとめる。

3.2 モバイルネットワークにおける TCP 性能向上方式

モバイルネットワークにおける TCP 性能の向上のため，本章では中継サーバと基地局連携により，大きく変動するモバイルネットワークの特性にリアルタイムに追随する通信制御方式を提案する．

従来モバイルネットワークの基地局では，セル単位のスループット，管理端末数，電波品質や基地局でのバッファ量といったモバイルネットワーク特性を把握しているが，これらの情報を中継サーバに通知することで，中継サーバでモバイルネットワークに最適な TCP 制御を可能とする．モバイルネットワークの状況にあった輻輳制御を実施することにより，変動の激しいモバイルネットワークにおいて低遅延を維持しつつ，通信スループットを最大化する．

3.2.1 アーキテクチャ

図 3.1 にモバイルネットワークの基本的な構成を示す．モバイル端末は無線ネットワーク（アクセスネットワーク）で基地局に接続され，モバイルネットワークの通信を管理するコアネットワークを通り，インターネットに接続される．クラウドサービスを利用する場合，クラウドサーバからインターネット，コアネットワーク，アクセスネットワークを経由して端末にデータがダウンロードされる．Liu ら [12] は，モバイルオペレータのネットワーク内に mobile accelerator と呼ばれる HTTP Proxy を導入し，mobile accelerator でモバイルに最適化した TCP を利用することを提案している．インターネットとモバイルネットワーク，特にアクセスネットワークではその特性が大きく異なることから，本研究でも，モバイルネットワーク向けに TCP 性能を向上するため，モバイルオペレータのコアネットワーク内に TCP を終端する中継サーバを導入する．ここでは，コアネットワーク内のどこに中継サーバを置くかは規定しないが，基地局に近い場所に配置することを想定する．また，中継サーバは透過プロキシ [62] として動作する．中継サーバで TCP を終端しており，モバイルネットワークの TCP はインターネットのクラウドサーバ間の TCP と関係なく動作するため，クラウドサーバ側の TCP は任意の輻輳アルゴリズムを利用できる．一方，中継サーバとモバイル端末間では，モバイルネットワークの変動に対応可能な TCP アルゴリズムを利用して，TCP スループットを向上する．

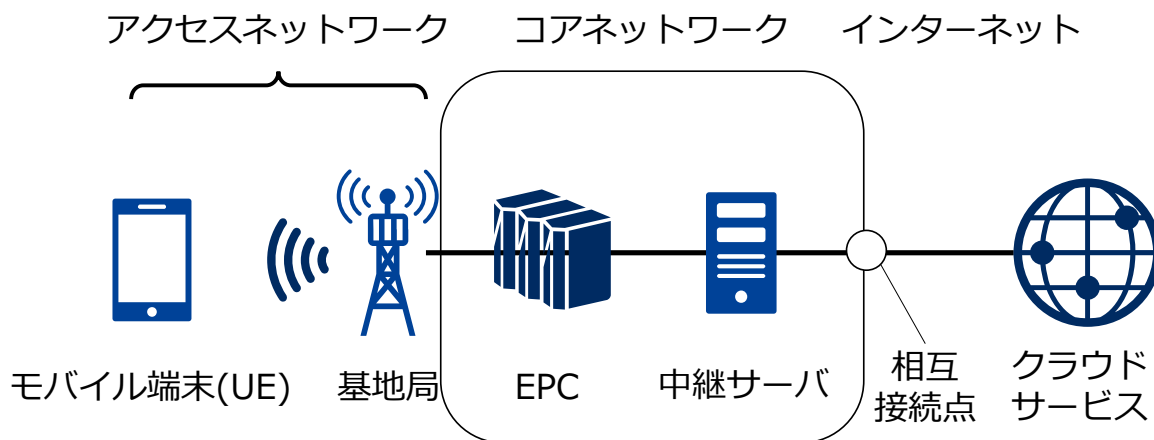


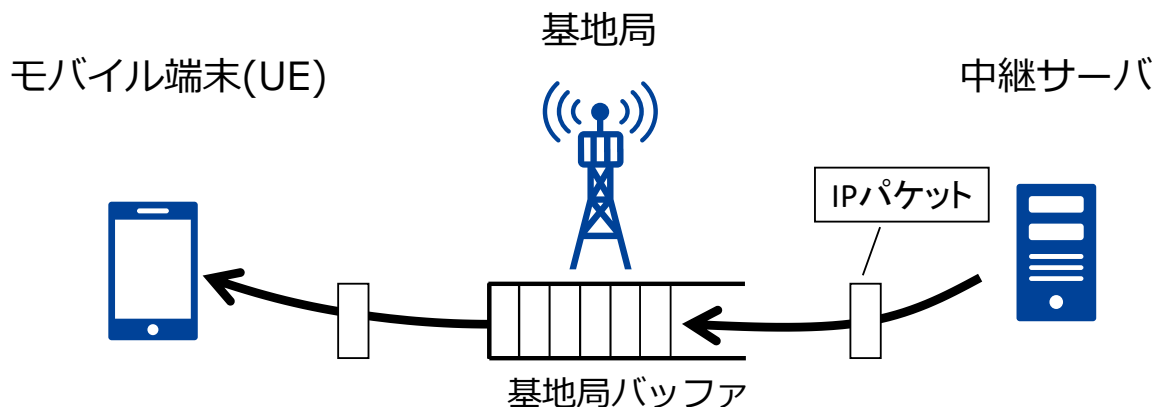
図 3.1 中継サーバを導入したネットワークアーキテクチャ

3.2.2 基地局バッファ量に基づいた TCP 送信レート制御

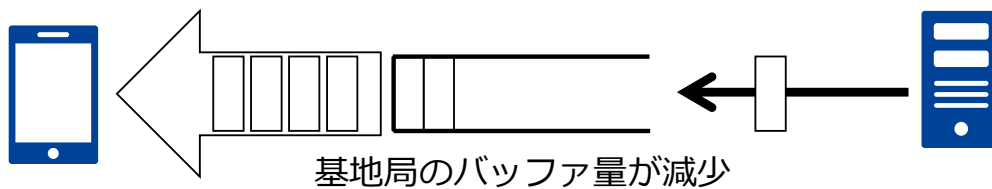
モバイル端末に対するダウンリンク方向のスループットのボトルネックは、無線品質によって大きく利用可能帯域が変動する端末と基地局間となる。提案する TCP 送信レート制御は無線区間のネットワーク性能を推定し、送信レートを合わせることを目標とする。本章では、ネットワーク性能推定のため基地局のバッファ量を用いる。

基地局におけるバッファの挙動を図 3.2 で説明する。基地局では利用可能帯域の変動に対応するためにバッファをもっており、中継サーバからの受信データを保持し、端末に対して無線リソースが割り当てられると、バッファからデータを読み出して送信する。端末に多くの無線リソースが割り当てられる、すなわち端末と基地局間の利用可能帯域が多くなると、基地局バッファから多くのデータが読み出され、基地局に滞留しているバッファ量が減少する。逆に、端末に割り当てられる無線リソースが少ない、すなわち端末と基地局間の利用可能帯域が少なくなると、基地局バッファから読み出されるデータ量が減少し、基地局に滞留しているバッファ量が増大する。このとき、無線リソースが割り当てられたのに、バッファに送信すべきデータが蓄積されていないと、送信機会を失うことになり、利用可能な無線リソースに比して送信レートが下回る、すなわち TCP がネットワーク性能を最大限利用できていないことになる。

一方、無線リソースが最大限に割り当てられた場合でも、送信しきれずにバッファに蓄積されたままになっているデータが存在していると、TCP の RTT が大きくなる。この場合、TCP はネットワーク性能を最大限利用しているが、RTT が必要以上に大きくなっ



無線スループットが良い



無線スループットが悪い

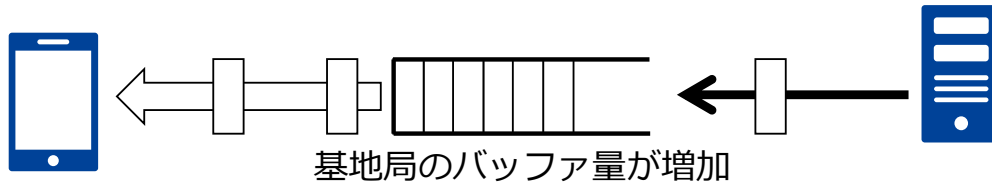


図 3.2 基地局バッファの挙動

ていることを示している。

これを踏まえると、基地局のバッファを観測すると無線の利用可能帯域が推測でき、また、無線リソースが最大限割り当てられた場合の利用可能帯域と、割り当てが最小限の場合の利用可能帯域の差を吸収できるだけのデータを持つのが必要十分である。

本説明は基地局には端末 (UE) ごとにバッファが存在していることを前提にしている [14, 15, 16]. しかし、実際は基地局では UE ごとにバッファを持つか、全 UE で共通のバッファを持つかは実装依存であり、規定されていない。以下、本稿では UE ごとにバッファを持つことを想定して議論を進める。このため、基地局で全 UE で共通のバッファを持つ場合は、UE ごとのパケットを抽出する機能を基地局に装備することを前提とする。また、実装上バッファ量は有限である。ここではバッファ量の上限は規定しない

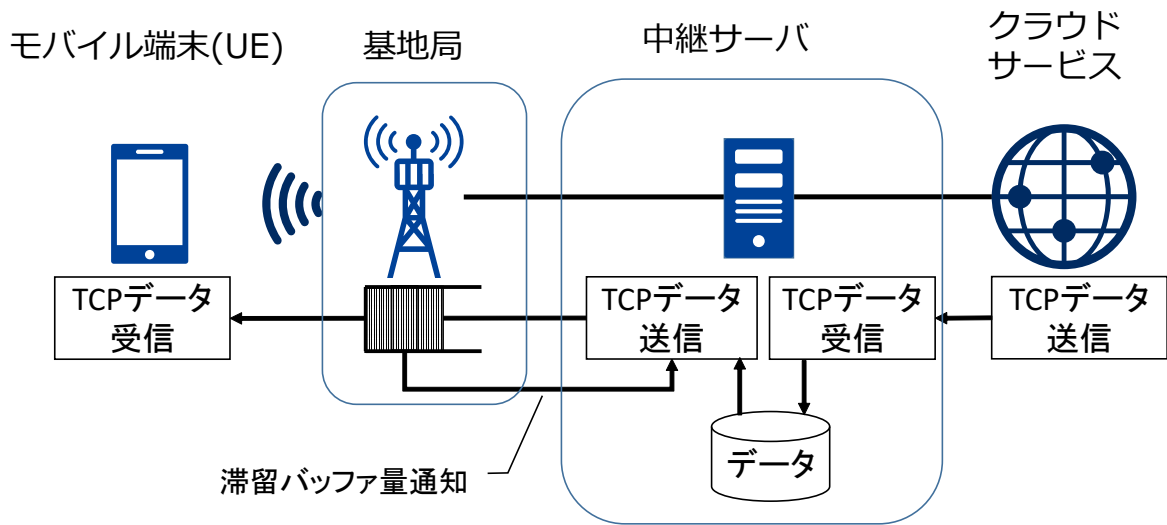


図 3.3 基地局連携による TCP 高速化方式の構成

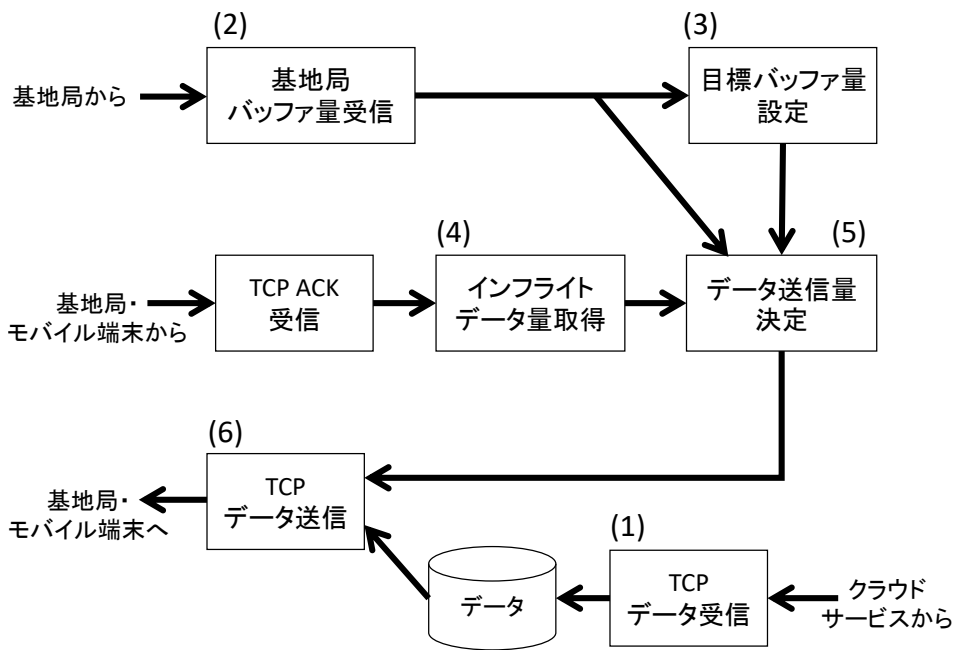


図 3.4 TCP 高速化方式のブロック図

が、バッファ量は実網を利用して推定した数 MB 程度を想定する。

3.2.3 基地局バッファ量に基づく TCP 送信レート決定アルゴリズム

基地局と連携して中継サーバで TCP を最適化するアーキテクチャを図 3.3 に示す。本アーキテクチャでは、中継サーバでクラウドサービスの TCP セッションを終端し、インターネット側の TCP セッションとモバイルネットワーク側の TCP セッションに分割する。インターネット側から受信した TCP データを一旦バッファに保持し、モバイルネットワーク側の TCP セッションはバッファからデータを読み出して送信する。モバイルネットワーク側の TCP セッションは、基地局のバッファに蓄積されながら基地局からモバイル端末に送信されているので、本セッションの送信済みデータが基地局のバッファにどれだけ蓄積されているか (滞留バッファ量) を基地局から中継サーバに通知し、滞留バッファ量をもとに TCP データ送信の制御を行う。

中継サーバからモバイル端末に対して送信する TCP の輻輳制御のブロックを図 3.4 に、輻輳制御の基本的なアルゴリズムは下記に示す。図 3.4 中のブロックに付与した数字は下記のアロリズムの番号に対応する。

1. クラウドサーバからの TCP セッションのデータを受信し、データバッファに蓄積。
2. 基地局バッファに蓄積されている現在の滞留バッファ量を受信。
3. 基地局に蓄積しておくべき目標バッファ量の決定。
4. TCP 通信の送信済みデータ量，端末からの確認応答 (ACK) 受信済みデータ量から現在 TCP が送信済みで未 ACK のデータ量 (インフライトデータ量) の算出。
5. 現在のインフライトバッファ量，基地局バッファ量と目標バッファ量から，送信すべきデータ通信量の決定。
6. 求めたデータ通信量分をデータバッファから読み出し，基地局・モバイル端末へ送信。

以下，上記アルゴリズムの (3)，(5) の具体的なアルゴリズムについて説明する。

目標バッファ量決定

基地局に滞留しておくべきバッファ量は，無線リソースが最大限割り当てられた場合の利用可能帯域と，割り当てが最小限の場合の利用可能帯域の差を吸収できるだけのデータ量である。前述した通り，ここで述べるバッファ量は，基地局が端末 (UE) ごとにバッファを持ち，それぞれの UE ごとのバッファ量である。

無線区間で利用可能な利用可能帯域は時間によって大きく変動し，最大利用可能帯域と

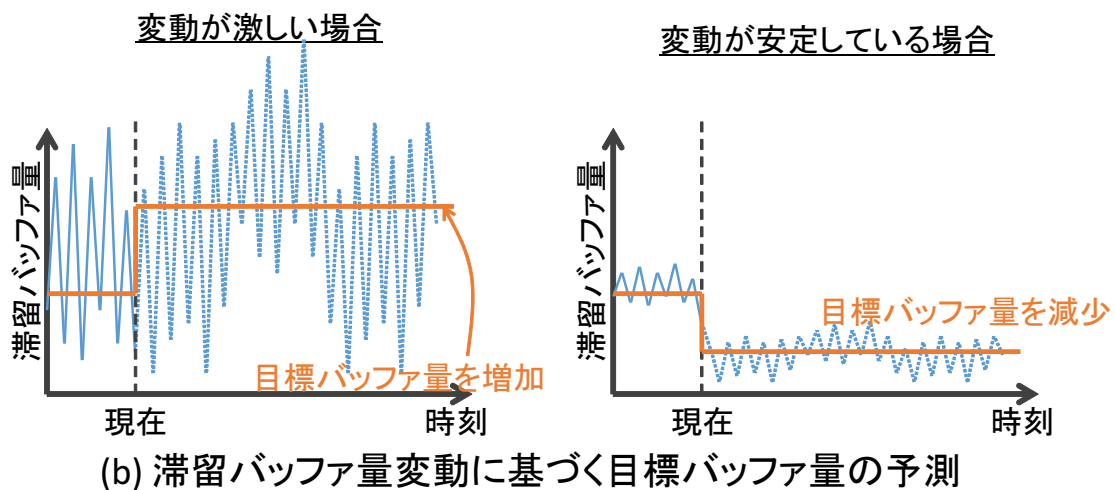
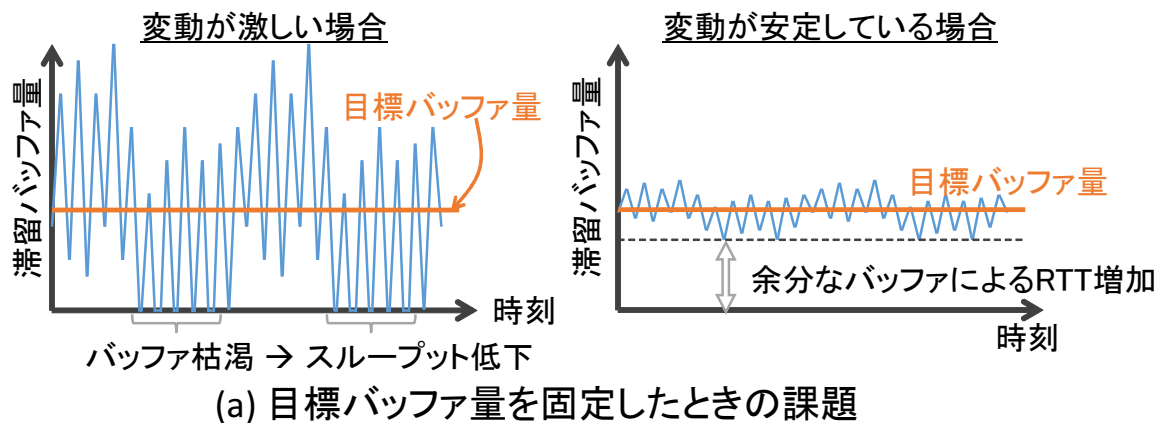


図 3.5 基地局の滞留バッファ量変動と提案方式のの目標バッファ量

最小利用可能帯域との差が小さいときもあれば、大きいときもあり、時間的に変化する。図 3.5 に示すように、無線の利用可能帯域が変動すると、基地局に蓄積されるバッファ量も大きく変動する。図 3.5(a) の左図では、無線の利用可能帯域が大きく変動する場合を図示している。無線の利用可能帯域が大きくなると、多くのデータが通信可能となるため、基地局に滞留しているバッファ量が少なくなる。目標バッファ量が変動に対して小さく設定されてしまうと、図中でバッファ枯渇と書かれている時刻で滞留バッファ量が 0 になることがある。滞留バッファ量が 0 になるとき、無線通信の利用可能帯域があるにもかかわらず、基地局から送信するデータがなく、電波の利用効率、スループットが低下する。図 3.5(a) の右図は、無線の利用可能帯域の変動が小さい場合を図示しており、同様に目標バッファ量が固定の場合だと、データが余分にバッファされるため、RTT が増加する。以上のように、目標バッファ量を固定すると、変化に追従できない。

本提案では、滞留バッファ量の履歴を用いて、無線帯域を使い切るために必要な滞留バッファ量の目標値を決定する。ある時刻 t における目標バッファ量を $b_g(t)$ [バイト]、基地局から受信した滞留バッファ量を $b_b(t)$ [バイト] としたとき、目標バッファ量 $b_g(t)$ [バイト] は次のように求める。

$$b_g(t) = \begin{cases} B_0 & (t = 0) \\ \alpha \left(\max_{0 \leq \tau \leq t} b_b(\tau) - \min_{0 \leq \tau \leq t} b_b(\tau) \right) & (0 < t \leq T_c) \\ \alpha \left(\max_{t-T_c \leq \tau \leq t} b_b(\tau) - \min_{t-T_c \leq \tau \leq t} b_b(\tau) \right) & (t > T_c) \end{cases} \quad (3.1)$$

ここで、 B_0 [バイト] は目標とする滞留基地局バッファ量の初期値、 T_c [秒] はどこまで過去の履歴をさかのぼって計算に利用するかを示す。本式では、 T_c 秒前までの基地局のバッファ量の最大値と最小値の差を求め、そこに係数 α を乗算している。 α は通常 1 以上の一定値を取る。過去の履歴から、無線リソースが最大限割り当てられた場合でも滞留バッファ量が 0 にならず、かつ、割り当てが最小限の場合でも滞留バッファ量が過剰にならないように目標バッファ量を設定する。

送信データ量決定

提案する TCP アルゴリズムでは、送信データ量を制御することで、現在基地局に蓄積されているバッファ量 $b_b(t)$ [バイト] を、目標値 $b_g(t)$ [バイト] に近づけるように制御する。ここでは、PID 制御により TCP の送信制御に用いる輻輳ウィンドウ量 $CW(t)$ [バイト] を決定する手法を例示する。輻輳ウィンドウとは、TCP が一度に送信できる最大のデータ量のことであり、輻輳ウィンドウはネットワークの輻輳が発生しない範囲で大きくし、輻輳を検知すると輻輳ウィンドウを小さくする。

$$b_e(t) = b_g(t) - b_b(t) \quad (3.2)$$

$$CW(t) = CW(t_{prev}) + K_p b_e(t) + K_i \int_0^t b_e(\tau) d\tau + K_d \frac{db_e(t)}{dt} \quad (3.3)$$

t_{prev} は前回 ACK を受信し、 CW の制御を行った時刻である。ここでは、目標バッファ量 b_g 、基地局での滞留バッファ量 b_b 、輻輳ウィンドウ量 CW は連続量として表している

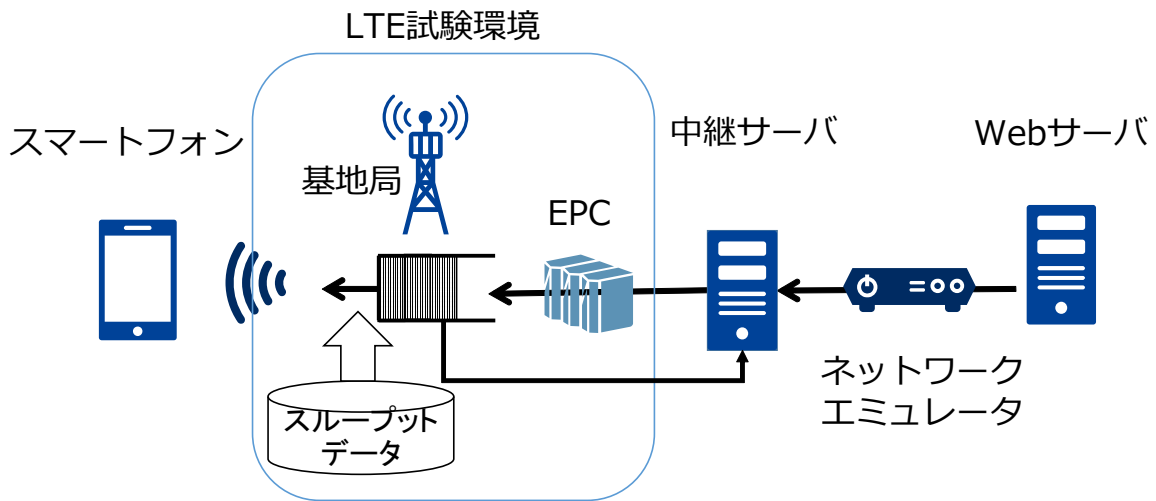


図 3.6 TCP 高速化方式の評価システム構成

表 3.1 TCP 高速化方式の LTE 評価環境諸元

EPC	3GPP Rel.11 対応テストベッド
eNodeB	3GPP Rel.11 対応テストベッド
周波数帯	2.66GHz (Band 7)
帯域幅	20MHz
送信モード	TM 4 (Closed-loop spatial multiplexing)
UE	LTE UE category 3 対応端末 (DL 100Mbps/UL 50Mbps)

が、実際の動作は TCP の動作に準拠し、ACK を受信したタイミングで b_g , b_b , CW を決定し、中継サーバからデータ通信を行う。

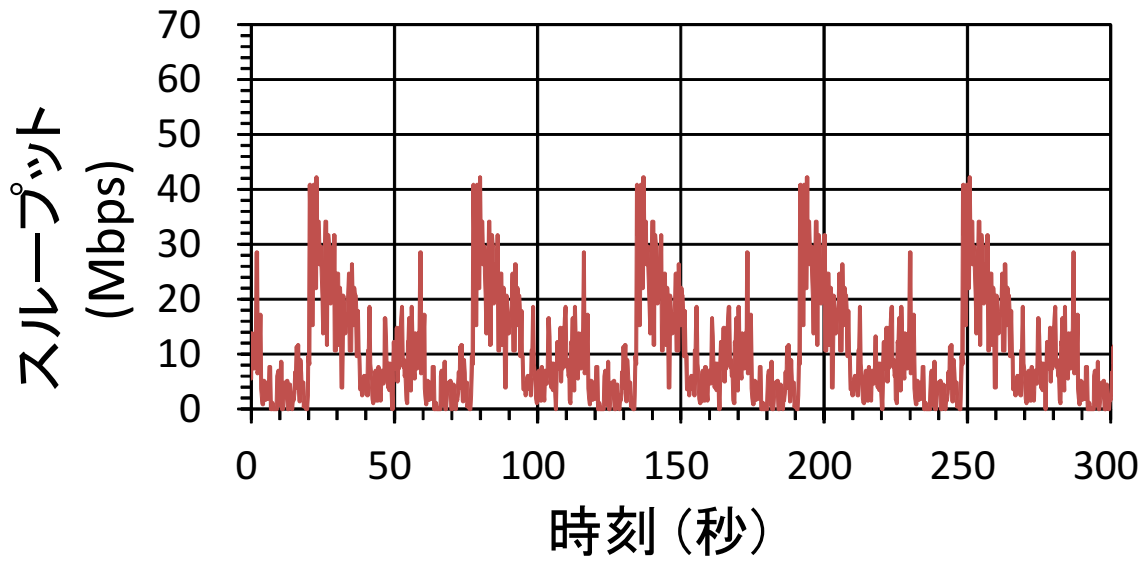
輻輳ウィンドウ量が決定されると、データ送信部は $CW(t)$ からインフライトデータ量、すなわち送信済みで ACK 未受信のデータ量を差し引いたデータ量を送信する。

3.3 評価・考察

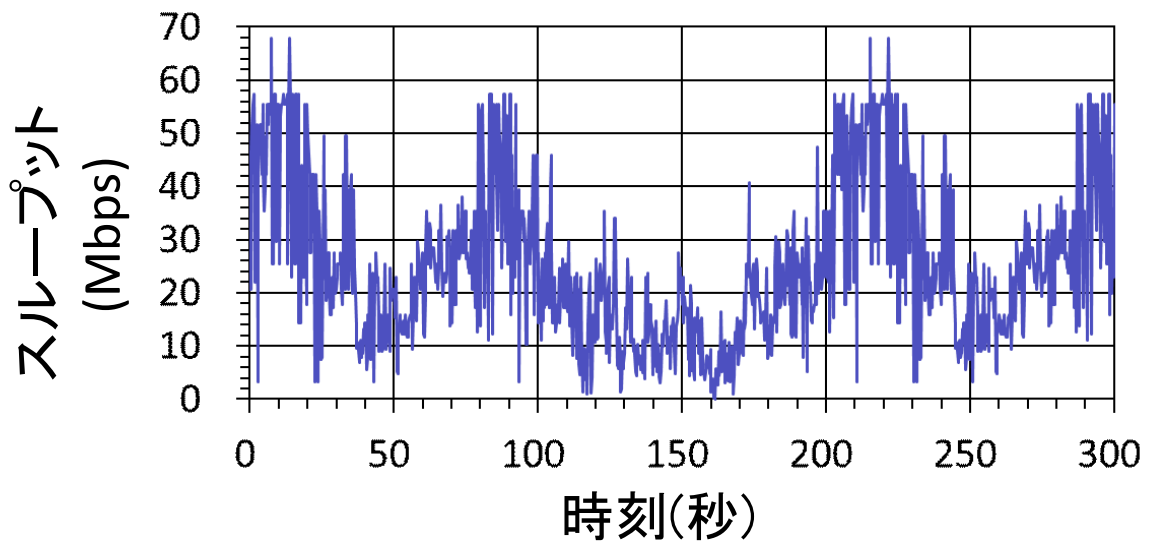
3.3.1 評価環境

提案方式の有効性検証のため、LTE 試験環境を用いて実験を行った。評価環境を図 3.6 に示す。

今回用いた LTE 試験環境は、実網と同じくコア網 (EPC; Evolved Packet Core) 及び



(a) 電車走行中の帯域変動
(データセット A)



(b) バス走行中の帯域変動
(データセット B)

図 3.7 実網評価実験に用いた帯域変動データ

基地局 (eNodeB) から構成される評価環境であり、シールドボックス内で電波を発することにより、通常モバイル端末と LTE による通信を可能とする。本実験に用いた LTE

評価試験環境の諸元を表 3.1 に示す。実験環境はシールドボックスで遮蔽されたクローズドな環境であり、複数の端末による混雑や他の電波源からの干渉による帯域変動、ハンドオーバーの再現は困難である。そのため、実網で測定した帯域変動データに基づき、基地局から端末への通信帯域を制限し、クロストラフィックが発生した環境を再現した。ただし、無線の電波品質は一定の状態を維持しているため、無線品質の変動に起因する無線利用可能帯域の変動を正確に模擬するものではない。基地局から端末への通信帯域の制限は二つのシナリオで取得した通信スループットを利用した。

一つ目のシナリオは、無線環境の変動が発生する環境を想定し、都内近郊にて時速約 60km で走行中の電車に乗り、実際の LTE を使ったスマートフォンにインターネットサーバのデータをダウンロードしてスループットを測定した。スループットデータを図 3.7(a) に示す。この測定では最大 42Mbps、平均 10.8Mbps のスループットが得られた。以降、本シナリオのデータをデータセット A と呼ぶ。

二つ目のシナリオは、同様に都内近郊にて時速約 30km で走行中のバスに乗り、実際の LTE を使ったスマートフォンにインターネットサーバのデータをダウンロードしてスループットを測定した。スループットデータを図 3.7(b) に示す。この測定では最大 67Mbps、平均 23.0Mbps のスループットが得られた。以降、本シナリオのデータをデータセット B と呼ぶ。

これらのデータは計測時間に制限があるため、評価上は繰り返し適用している。また、基地局では 1.3MB のバッファを用意した。基地局バッファ量については具体的な値に関する仕様、文献は見つけれないため、実網を利用してバッファ量を推定した。推定方法は、モバイル端末を使いバースト的な通信を実施し、パケットロスの発生傾向とパケットロス発生時のインフライトデータ量を測定した。バースト的な通信により、基地局のバッファが溢れるとパケットロスが急増し、バースト的にパケットロスが発生すると想定している。都内近郊において繰り返し計測し、インフライトデータ量が 1.3MB 程度でパケットロスが急増することを確認したため、1.3MB とした。

今回の評価実験では、クラウドからのビデオデータのストリーミングを想定し、クラウドサーバから 100MB のデータをダウンロードし、全データを取得するまでのスループット、帯域の利用効率、TCP パケットの RTT を計測した。帯域の利用効率 e は、利用可能な通信スループットに対して得られたスループットであり、下記で定義する。

$$e = \frac{8D}{\int_0^T t_b(t) dt} \quad (3.4)$$

ここで、 D [バイト] はダウンロードデータ量、 $t_b(t)$ [bps] は利用可能な通信スループット、

T [秒] は D バイトの受信にかかった時間である。本実験では、 D は 100MB、 $t_b(t)$ はデータセット A、データセット B のスループットの時間推移である。

利用したクラウドサーバはインターネット上のサーバではなく、評価環境に直結したサーバである。インターネットのクラウドサーバにアクセスした想定として、ネットワークエミュレータにおいて、インターネットでのパケットロスとして 0.7% のランダムロスを加えた。今回の評価実験では、インターネット側の遅延は加えていない。パケットロス率を 0.7% と設定した理由は次の通りである。公開されている国内の SmokePing サーバ*¹を 2016 年 2 月の 1 ヶ月間モニタリングし、国内サーバとの通信における平均パケットロス率を計測した。計測の結果、0.7% が得られたため、今回の評価ではインターネット側のパケットロスとして 0.7% のランダムロスを設定した。

中継サーバでは次の 3 種類の TCP 通信を行い、データを取得した。

1. 中継サーバでクラウドサーバの TCP を終端し、中継サーバと端末間で提案方式の TCP 方式を用いる方式 (以下, 提案方式)
2. 中継サーバで TCP を終端し、中継サーバと端末間でもクラウドサーバと同じ TCP 方式を用いる方式 (以下, Splitting CUBIC)
3. 中継サーバで TCP を終端せず、クラウドサーバと端末間で一つの TCP のセッションを用いる方式 (以下, CUBIC)

評価実験に用いたクラウドサーバ、中継サーバは通常の PC を用い、OS は Ubuntu 14.04 (Linux カーネル 3.13) を利用した。クラウドサーバおよび中継サーバの Splitting CUBIC 使用時の TCP Variant は CUBIC である。今回の評価実験では、TCP の輻輳制御の効果を評価するため、端末のウィンドウサイズおよびサーバの送信バッファサイズを標準の 400kB より大きく、2MB に設定した。それ以外の CUBIC のパラメータはデフォルトのまま用いた。また、提案方式および Splitting CUBIC の RTT は中継サーバと端末間の TCP の RTT を、CUBIC の RTT はクラウドサーバと端末間の TCP の RTT を計測した。

今回、基地局から UDP により 10ms 間隔で基地局の滞留バッファ量を送信し、基地局と中継サーバの連携を実現した。また、提案方式の TCP の送信制御パラメータとして、 $B_0 = 300,000$ [バイト]、 $\alpha = 2.0$ 、 $T_c = 200$ [ミリ秒]、 $K_p = 0.5$ 、 $K_i = 0.001$ 、 $K_d = 0.1$ を指定した。これらのパラメータを決定した理由は次の通りである。

*¹ <https://www.oetiker.ch/en/oss/projects/smokeping-en-us/>

表 3.2 各方式の平均スループット (単位: Mbps)

	提案方式	Splitting CUBIC	CUBIC
データセット A	10.3	9.4	9.3
データセット B	25.8	23.6	11.0

表 3.3 各方式の平均利用効率と標準偏差

平均利用効率	提案方式	Splitting CUBIC	CUBIC
データセット A	0.97	0.89	0.88
データセット B	0.96	0.91	0.48

利用効率の標準偏差	提案方式	Splitting CUBIC	CUBIC
データセット A	0.028	0.064	0.061
データセット B	0.017	0.040	0.12

- B_0 , α , T_c は目標バッファ量に関するパラメータであり, ここでは, αB_0 が基地局の最大バッファ量 1.3MB の半分程度になるように設定した.
- T_c はスループット変動に対する目標バッファ量の追従性に影響するパラメータである. 基地局における無線リソース割当て単位 (1 ミリ秒), インターネットのセッションの長さ (10 秒程度) に近すぎると制御が安定しないため, 100 ミリ秒から 1 秒程度でパラメータを選択した.
- K_p , K_i , K_d は PID 制御のパラメータであり, 本設定は経験的な値でパラメータ設定を行った. 今回の設定は PID 制御の最適パラメータと言えない.

3.3.2 スループット・利用効率の評価

データセットごとの各方式 (提案方式, Splitting CUBIC, CUBIC) の平均スループットを表 3.2 に示す. 各データは, 図 3.7 の帯域変動中にランダムに通信を開始し, 20 回計測したデータの平均である.

データセット A では, 方式毎の差は少ない. これは, 平均スループットが 10Mbps 程度と低く, スループット変動幅が小さいため, 既存の TCP でも追従が可能であることを示す. しかし, データセット B では, 提案方式, Splitting CUBIC に比べ, CUBIC のスループットが大きく減少している. 低帯域で推移した後に急激に帯域が回復した場合, そ

表 3.4 各方式の最大 RTT [単位:秒]

最大 RTT	提案方式	Splitting CUBIC	CUBIC
データセット A	3.0	17.0	8.4
データセット B	1.9	6.8	8.5

の帯域に追従できず，スループットの回復が遅れるためである．モバイルネットワーク向けの TCP では，モバイルとインターネットで TCP を分割する効果が高いと言える．

また，表 3.3 に通信方式とデータセットごとの帯域利用効率の平均値と標準偏差を示す．利用効率の平均値に関しては，スループットの平均とほぼ同一の傾向である．一方，提案方式と Splitting CUBIC の利用効率の標準偏差を比較すると，提案方式は Splitting CUBIC の半分の標準偏差となっており，提案方式は安定して帯域変動への追従が可能であるといえる．

3.3.3 RTT の評価

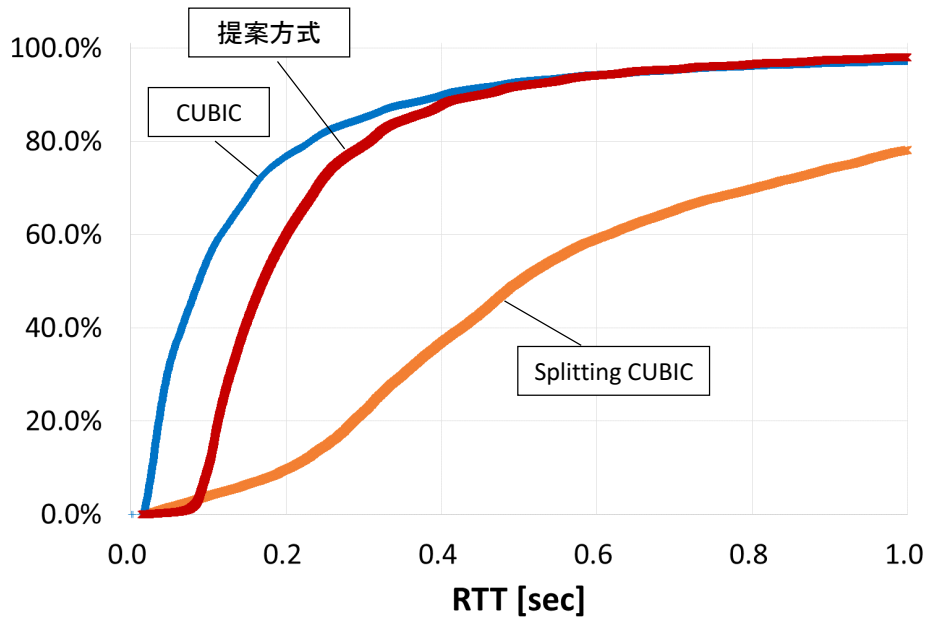
各データセットで測定した各通信方式の TCP パケットごとの RTT の累積分布 (CDF) を図 3.8 示す．また，表 3.4 にそれぞれの最大遅延を示す．

データセット A，データセット B ともに CUBIC，提案方式，Splitting CUBIC の順で RTT が長くなっている．CUBIC の RTT が一番短くなった理由は，帯域の利用効率が悪くパケットが基地局に滞留しないためである．提案方式は，高いスループットを実現しつつ，基地局に滞留するデータ量を制御できるため，RTT が短くなっている．CUBIC より RTT は長いものの，RTT が 0.8 秒以上の割合は提案方式より CUBIC の方が多く，最大遅延でも提案方式の方が短い．提案方式は帯域を効率よく使い，かつ RTT をできるだけ短くする効果が現れている．

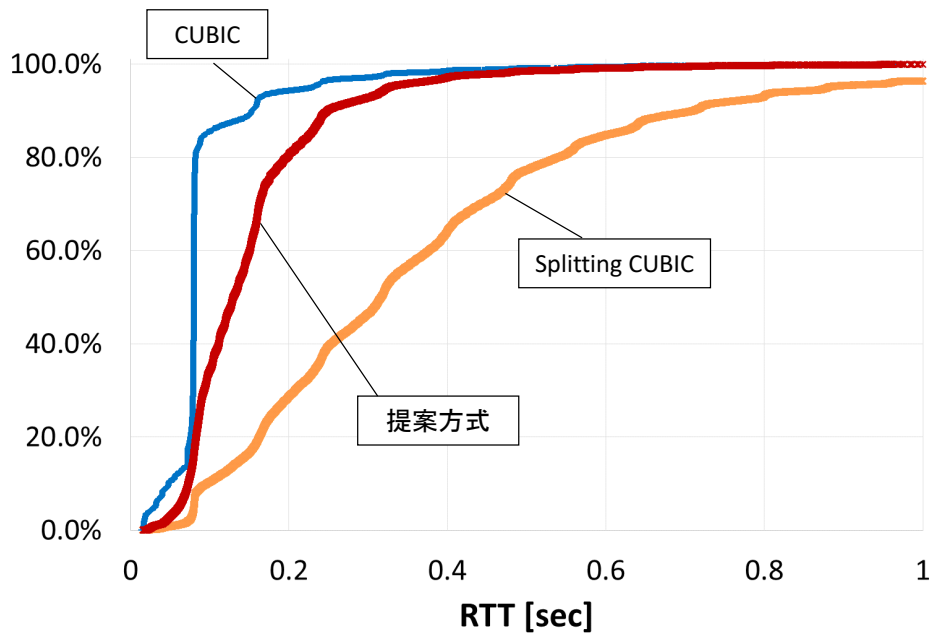
Splitting CUBIC は，前節で述べたようにスループットは高いが，中継サーバから端末へ滞留バッファ量を考慮せずにデータを送信するので，無線区間の帯域が十分大きくなるときでも大量のデータを送信し，基地局で滞留するデータが多くなり，RTT が伸びている．

3.3.4 各 TCP の挙動

各データセットで測定した各通信方式の TCP の時系列のインフライトバッファ量推移を計測した．データセット A のインフライトバッファ量の推移を図 3.9，データセット



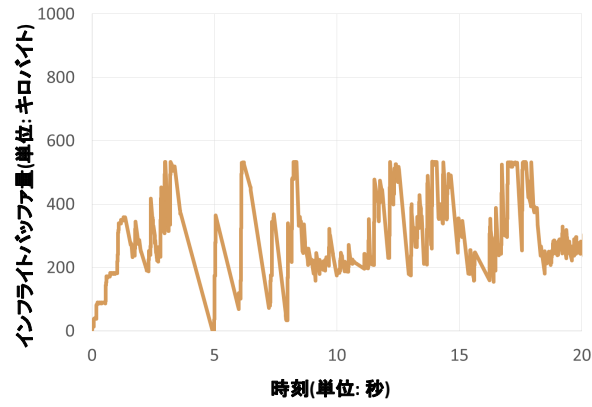
(a) データセット A における RTT の CDF



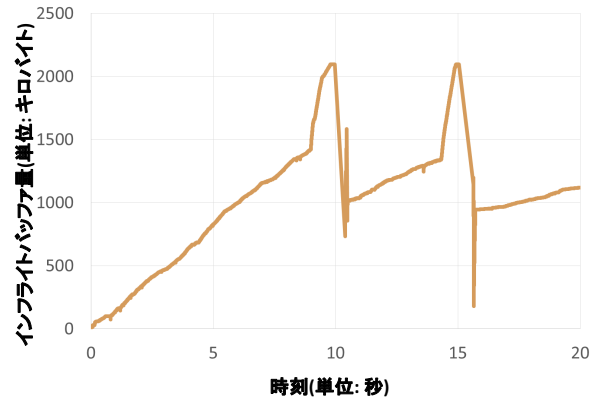
(b) データセット B における RTT の CDF

図 3.8 各方式の RTT (CDF)

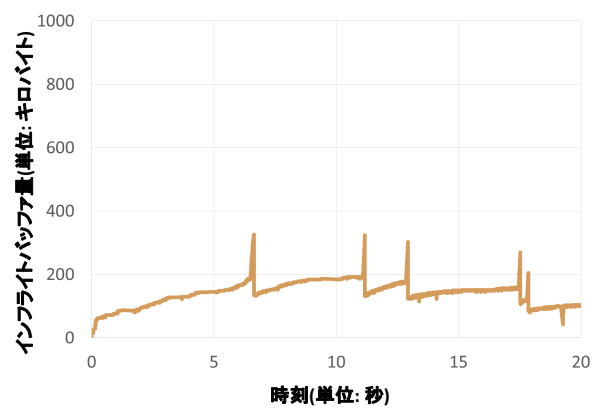
B のインフライトバッファ量の推移を図 3.10 に示す。これらのグラフはある TCP セッションの最初の 20 秒を抽出しており、横軸は時刻、縦軸はインフライトバッファ量である。



(a) 提案方式

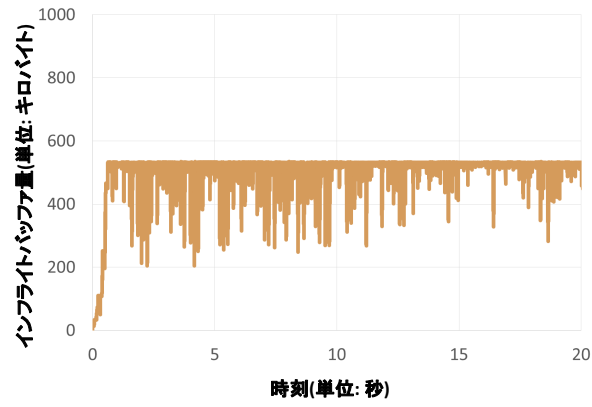


(b) Splitting CUBIC

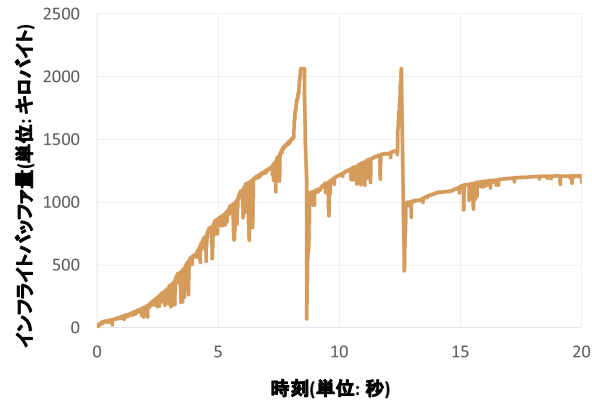


(c) CUBIC

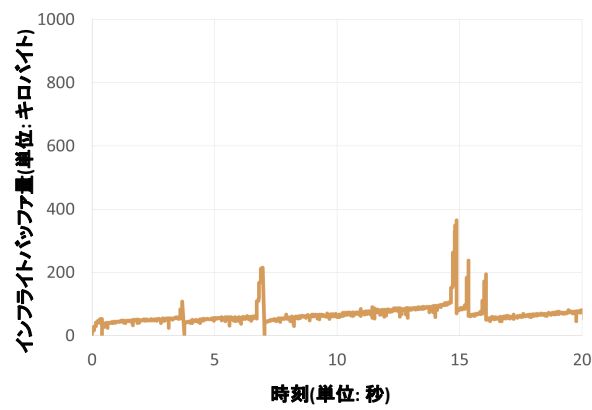
図 3.9 データセット A における各 TCP のインフライトバッファ量の推移



(a) 提案方式



(b) Splitting CUBIC



(c) CUBIC

図 3.10 データセット B における各 TCP のインフライトバッファ量の推移

る。両図とも Splitting CUBIC の縦軸スケールが提案方式、CUBIC と異なることに注意して欲しい。

提案方式は、データセット A、データセット B とも最大は約 540 キロバイトのインフライトバッファ量となっている。特にデータセット B では利用可能なスループットが安定しており、TCP の送信レートを安定させ、RTT を伸ばさないように制御しているため、インフライトバッファ量を 540 キロバイト付近で安定させている。インフライトバッファ量は、初期バッファサイズ $B_0=300\text{kB}$ 、 $\alpha=2.0$ から、約 600kB で安定していると考えられる。また、データセット A は最低スループットが低いため、スループット回復時のインフライトバッファ量が少なくなる。インフライトバッファ量は一定量以上であれば、スループット変動に追従し、電波リソースを最大限利用できる。本評価では 5 秒あたりでインフライトバッファ量が 0 になっており、急激にスループットが高くなった場合への追従性については考慮が必要である。また、スループットが低い場合でも最大インフライトバッファ量を抑えることで RTT を小さくしている。

一方、図 3.9(b)、図 3.10(b) から、Splitting CUBIC は他の方式と比較してインフライトバッファ量が多い。これらのグラフから、Splitting CUBIC はインフライトバッファ量が約 1.4MB までは緩やかに上昇し、1.4MB を超えると 2MB 超まで急激に上昇し、2MB を超えると 1MB まで減少していることがわかる。これは、CUBIC の挙動として次のように説明できる。

- 基地局バッファ量を 1.3MB に設定していることから、基地局バッファが満たされるまで (インフライトバッファ量が約 1.4MB まで) は送信レートを上昇し続ける。このとき、端末では順調に TCP パケットを受信し、ACK を返している。
- 基地局バッファがすべて埋まってしまった場合、基地局にデータを蓄積することができなくなるため、TCP パケットがロスする。端末はロスを検知するとサーバにロスパケットの再送を要求し、サーバは新規データの送信とともに、ロスパケットの再送を試みる。しかし、端末はロスパケットが到着し、ロスが解消されるまで ACK を返さなくなるため、インフライトバッファ量が急激に増加する。
- 今回の評価では端末の受信ウィンドウサイズの最大値を 2MB に設定しているため、サーバはインフライトバッファ量が 2MB に到達した時点で送信を取りやめる。このため、インフライトバッファ量は 2MB 以上にはならない。
- 端末がロスパケットを受信し、パケットロスが解消された時点で、到達済みのパケットの ACK をサーバに返すため、インフライトバッファ量が急激に減少する。

Splitting CUBIC はインフライトバッファ量を多くすることで、電波リソースの利用

効率は高いが、RTT が長くなることが説明できる。表 3.2, 表 3.3 では提案方式の方が Splitting CUBIC より平均スループット、利用効率が高くなっているが、これは CUBIC のスロースタートに起因すると考えられる。提案方式は TCP セッション開始後、送信レートを急激に上昇させ、インフラライトバッファを増加させているのに対し、CUBIC ではスロースタートによる徐々にインフラライトバッファを増加させていることが原因である。

CUBIC は 3 方式で比較してインフラライトバッファ量が抑えられており、RTT が短くなることがわかる。インターネット側のロスにより、CUBIC の送信レートが抑えられることが原因と考えられる。

データセット B では、提案方式は最大インフラライトバッファ量に張り付いていることがわかる。これは、スループットが高く、RTT を抑えつつ、電波リソースを最大限で利用することができるためである。

Splitting CUBIC, CUBIC はデータセット A とデータセット B のインフラライトバッファ量の遷移に大きな違いはない。Splitting CUBIC は提案方式と比較してもスループット、効率、遅延の特性はほぼ同様の傾向がある。一方、CUBIC は平均スループット、利用効率が大きく下がっている。これはインターネット側のロスの影響で CUBIC の送信レートが抑えられており、付与できる電波リソースを十分に使い切れないことが原因であると考えられる。

3.3.5 考察

提案方式の性能に関する考察

前節までの評価により、提案方式では 90% 以上の利用効率を示しており、無線帯域の変動に追従し、端末に割り当てられる無線リソースを有効に利用できていることがわかる。Splitting CUBIC も提案方式に近い効率で通信できており、効率、スループットの観点では中継サーバで TCP を終端することが効果的であることがわかる。

一方、RTT の観点では、提案方式は Splitting CUBIC より大幅に RTT が短い。滞留バッファ量を考慮することで、基地局にデータを大量に蓄積することなく TCP の送信制御ができています。提案方式では、基地局における滞留バッファ量を最適に利用することで、無線帯域の変動に追従し、スループット、利用効率を高め、かつ RTT が大きくなりすぎないように制御できている。

TCP の詳細な挙動で比較すると、提案方式はモバイルネットワークの帯域変動に追従してスループットの最大化、遅延の最小化を両立するように動作する。一方 Splitting

CUBIC はモバイルネットワークの利用効率をあげるため積極的に送信レートを高くする傾向にあるが、モバイルネットワークの帯域変動が大きい場合には大きな遅延となる。CUBIC はモバイルネットワークに十分な帯域があったとしても使い切れず、スループット、利用効率が落ちることがわかった。提案方式は、急激な変動への追従やスループット変動が少ない場合の遅延低減など、制御パラメータの最適化が今後の課題として挙げられる。

評価パラメータに関する考察

今回、提案方式の TCP の送信制御パラメータとして、 $B_0 = 300,000$ [バイト]、 $\alpha = 2.0$ 、 $T_c = 200$ [ミリ秒]、 $K_p = 0.5$ 、 $K_i = 0.001$ 、 $K_d = 0.1$ を指定した。 B_0 、 α 、 T_c は目標バッファ量に関するパラメータ、 K_p 、 K_i 、 K_d は目標バッファ量に対する輻輳ウィンドウ決定のための PID 制御のパラメータである。

目標バッファ量に関するパラメータ (B_0 、 α 、 T_c) は、RTT を短くしつつ高いスループットを実現するためのパラメータである。 B_0 、 α を小さくしすぎると、高いスループットが得られた場合やスループット変動が大きい場合に、基地局から端末に送信すべきデータがなくなることがあり、高いスループットが得られない。一方、大きくしすぎると、スループットが低い場合に RTT が増加する可能性がある。ここでは、 αB_0 が基地局の最大バッファ量 1.3MB の半分程度になるように設定した。現在の 4G/LTE ネットワークでは最適な値に近いと考えるが、今後のモバイルインフラの進化に伴い、最適パラメータを調整する必要がある可能性がある。 T_c はスループット変動に対する目標バッファ量の追従性に影響するパラメータであるが、ユーザの利便性のため Web アクセスセッションは 10 秒以内で終了した方が良いとの指針があること*2、基地局における LTE 無線リソース割り当てが 1 ミリ秒であることを考慮すると、100 ミリ秒から 1 秒程度が最適であると考えられる。

PID 制御のパラメータ (K_p 、 K_i 、 K_d) については、本設定が PID 制御の最適パラメータと言えない。そのため、スループットの変動幅やその変化速度が想定を超える場合、提案方式が十分に効果を発揮できない可能性がある。例えば、3G から 4G/LTE への垂直ハンドオーバーが発生し、急に利用可能なスループットが増加した場合など、PID 制御の追従性が悪く、十分に可用帯域を使い切れないことがあり得る。

これらの最適な評価パラメータについては、今後の検討課題である。

*2 <https://www.nngroup.com/articles/how-long-do-users-stay-on-web-pages/>

提案方式の制限に関する考察

本提案および評価では、基地局が UE ごとにバッファを持ち、中継サーバに当該 UE のバッファ量を送信した。基地局のバッファを端末間で共有する場合は、基地局で当該端末向けの通信に関するバッファ量を抽出することを想定している。ただし、端末間でバッファを共有する場合、他の端末の影響により、基地局から通知されるバッファ量と TCP の RTT の関係が複雑になる。このような基地局を用いる場合、中継サーバとしては他の端末のバッファへの影響を考慮し、 α を大きく設定することで他端末バッファの変動の影響を少なくすることが考えられる。

また、スマートフォンではモバイルユーザがフォアグラウンドで明示的に利用しているアプリケーション以外にもバックグラウンドで動作するアプリケーションも通信を行っている。端末ごとにバッファをもつ場合でも、本来は当該 TCP セッションに関わるバッファ量のみを抽出すべきである。しかし、一般の利用ではフォアグラウンドのアプリケーションが通信トラフィックの大部分を占めると考えられること、トラフィック利用が多いと UE 全体の TCP スループット向上効果があることから、端末ごとのバッファ量の利用でもユーザの体感品質向上効果が期待される。

3.4 本章のまとめ

本章では、モバイルネットワークにおける TCP の性能向上を目指し、インターネットとモバイルネットワークの境界となる通信キャリアのコアネットワーク内に中継サーバを配備し、中継サーバにおいてモバイルネットワークに最適な TCP 制御を行うアーキテクチャを提案した。また、中継サーバと基地局と連携する TCP アルゴリズムを提案し、モバイルネットワークの変動に追従して高い通信スループットと短い RTT を両立することを示した。

今後、電波強度の変動やハンドオーバーの影響など、より広範な環境での評価を行うとともに、基地局と中継サーバとの通信間隔と基地局の処理負荷、網負荷について調査を進め、最適な連携方式、制御方式について検討していきたい。

第4章

アプリケーション QoE に基づいた 基地局スケジューリング方式の提案

4.1 はじめに

本章では、アプリケーションごとの特性に基づき、ユーザの体感品質 (QoE) を向上する基地局の優先度設定方式を提案する。基地局 (Base station, BS) がユーザ端末 (UE) に無線リソースを割り当てるスケジューリングプロセスにおいて、端末が利用しているアプリケーションおよびアプリケーションの状態に応じて、割り当て優先度を決定する。特に、ビデオおよび Web ブラウジング、SNS で全トラフィックの 3/4 を占めており、今後増加することが見込まれているため、これらを利用するユーザが混在している場面を想定した優先度設定方式を提案し、シミュレーションにより提案方式の効果を確認する。また、ビデオストリーミングと Web 閲覧以外のトラフィックが混在した場合でも、提案方式に効果があることを考察で示す。なお、本稿では Ericsson のレポートで Web browsing, social networking (SNS) として分類されているトラフィックを Web 閲覧トラフィックとする。本レポートでは SNS は Web と別のカテゴリーに分類されているが、SNS トラフィックの中身はテキストデータ、イメージデータであり、ユーザの利用方法は Web と同様であるため、本稿では SNS トラフィックも Web 閲覧トラフィックとして扱う。^{*1}

以下、4.2 節で本章で対象とする基地局スケジューリングについて説明し、4.3 節でアプリケーションに応じた基地局におけるスケジューリング方式の提案、4.4 節で提案方式の評価・考察を行い、4.5 節でまとめる。

^{*1} Ericsson のレポートでは Web ページや SNS 内に貼り付けられるビデオコンテンツはビデオとして分類されている。

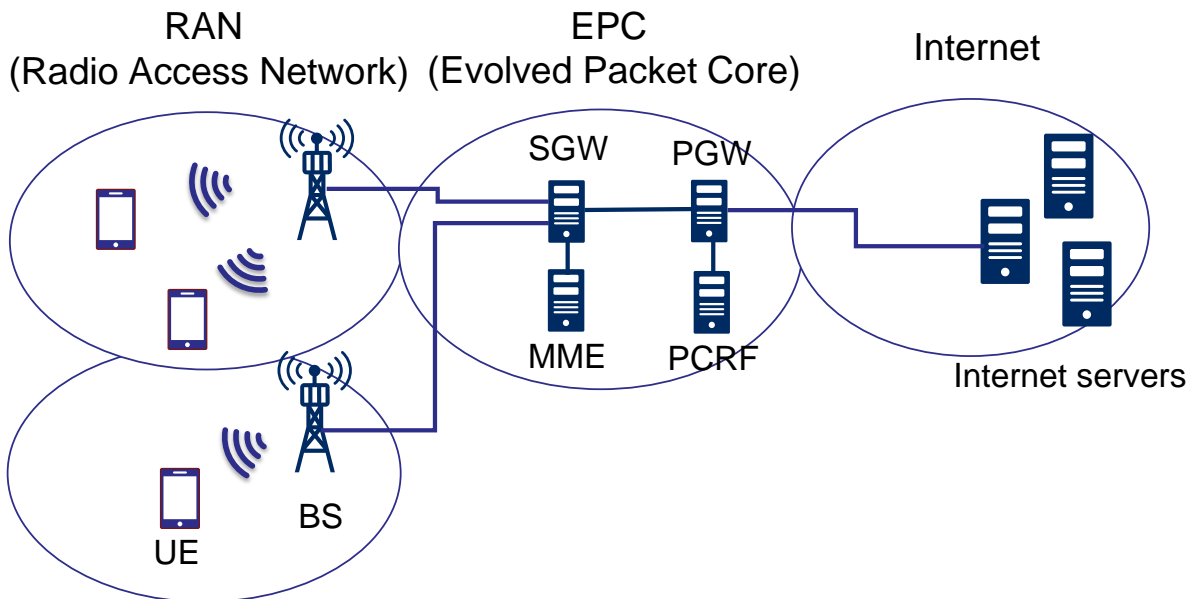


図 4.1 基地局スケジューリング方式で想定するシステムアーキテクチャ

4.2 モバイル通信におけるスケジューリング方式

本章では提案するスケジューリング方式について，想定するモバイルネットワークのアーキテクチャ，基地局の動作，スケジューリングの基本方式について説明する．

4.2.1 モバイルネットワークアーキテクチャ

本章で想定するシステムアーキテクチャを図 4.1 に示す．ネットワークは大きく RAN (Radio Access Network), EPC(Evolved Packet Core), インターネットに分類される．UE はインターネット上のサーバにアクセスしてデータをダウンロードして利用する．

通常，UE は通信キャリアが管理する基地局に接続されており，インターネットからのデータは EPC を介して，基地局から UE に送信される．

EPC は UE の管理とデータ通信のプロトコル変換を行い，UE 管理を行う MME (Mobility Management Entity), PCRF (Policy and Charging Rules Function) と主にデータ通信を制御する PGW (Packet Data Network Gateway), SGW (Serving Gateway) から構成される．PGW は，インターネットなどの IP パケット通信網との接続ポイントとなり，UE の IP アドレス管理，アプリケーションレベルの制御を行う．SGW は基地局と EPC の接続ポイントであり，基地局と PGW との通信の中継を行う．

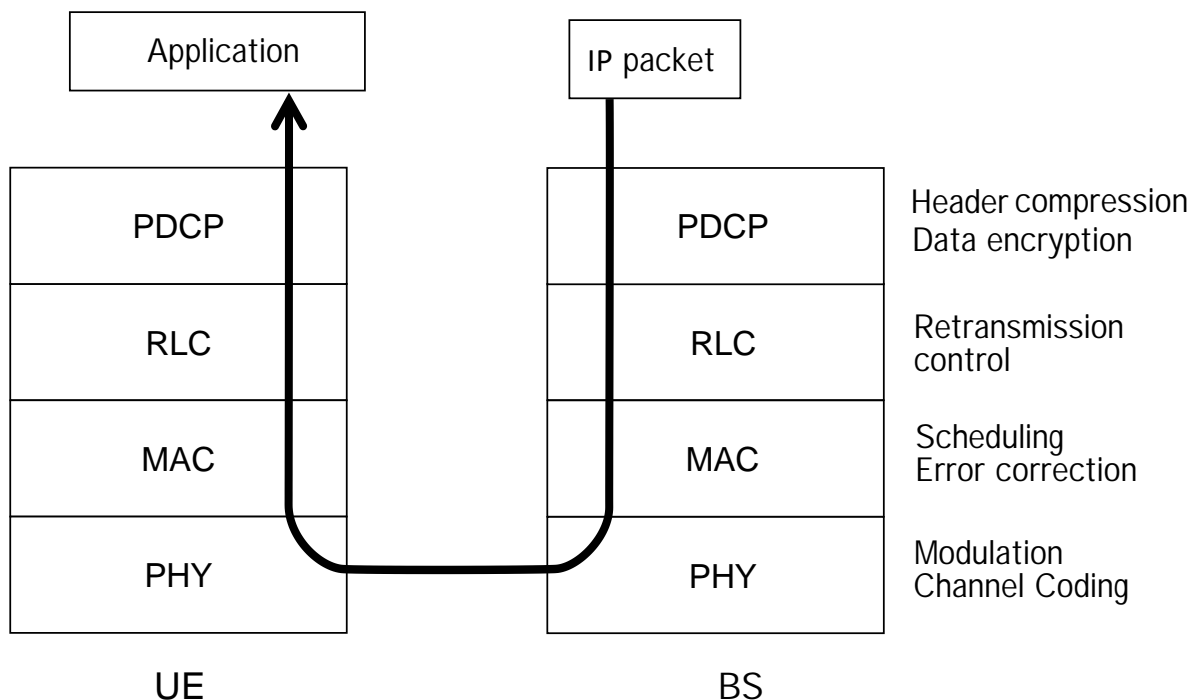


図 4.2 基地局における通信プロトコル変換

RAN は UE が電波により基地局からデータを受信するネットワークであり、複数の UE が一つの基地局に接続する。基地局から出力する電波資源は有限であるため、UE 間での電波資源配分が重要な課題である。この電波資源の配分がスケジューリングである。

基地局内部のプロトコル変換の処理フローを図 4.2 に示す。IP によるデータ通信は PDCP (Packet Data Convergence Protocol), RLC (Radio Link Control), MAC (Media Access Control), 物理レイヤ (PHY) におけるプロトコル変換をされて、UE に送信される。PDCP, RLC, MAC, PHY はそれぞれ、IP ヘッダ圧縮・暗号化、再送制御、スケジューリング、無線変調・符号化・アンテナ多重化などを行う。本方式の対象とするスケジューリング方式は MAC レイヤにおいて行われる。

4.2.2 基地局スケジューリング方式

基地局におけるスケジューリング方式の基本的な処理フローを図 4.3 に示す。MAC におけるスケジューリングは、RLC から MAC に渡された UE ごとの通信データをバッファ (Data queue) に蓄積し、バッファからデータを取り出して、PHY のリソースに割り当てる。PHY のリソース割り当ての基本単位は図 4.4 で示すリソースブロック (RB) である。基地局の電波資源は時間と周波数単位に分割して管理している。時間的には、1 ス

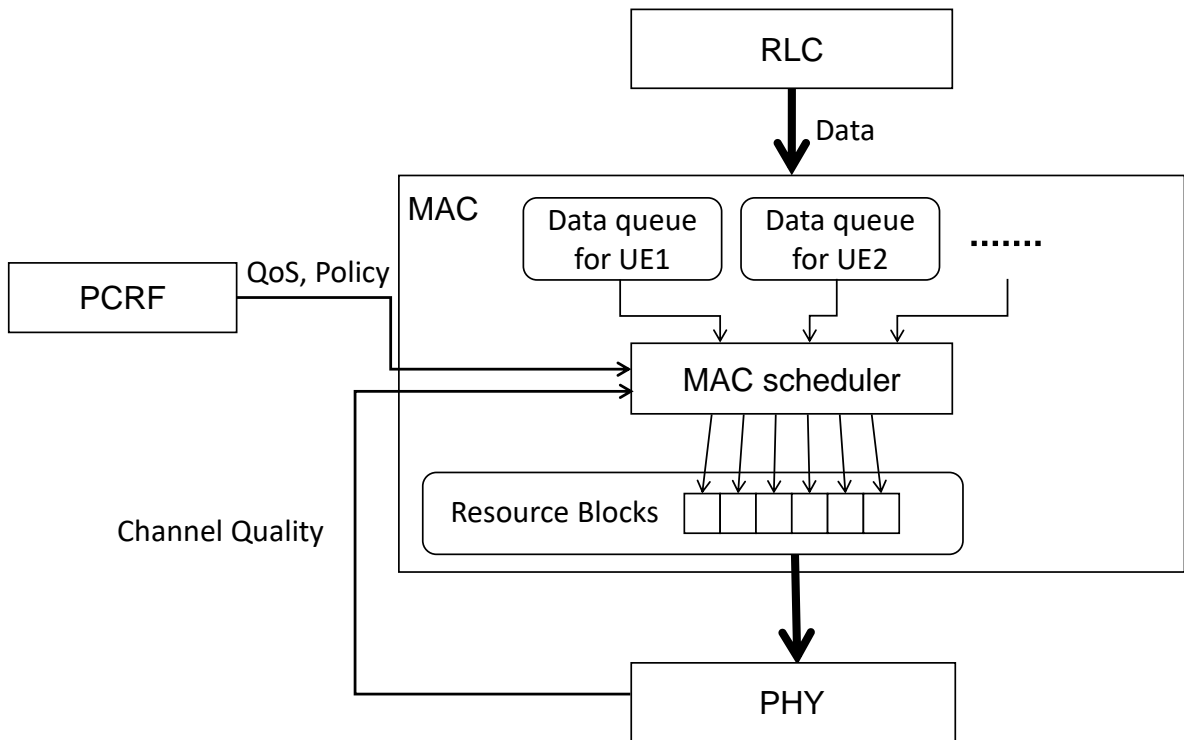


図 4.3 基地局における MAC スケジューリング方式

表 4.1 LTE システム帯域とリソースブロック数の関係

LTE システム帯域 [MHz]	RB 数
1.4	6
3	15
5	25
10	50
15	75
20	100

ロット 0.5 ミリ秒に分けられる。周波数的には 180kHz ごとに分けられる。0.5 ミリ秒と 180kHz に分割されたリソースをリソースブロック (RB) と呼ぶ。LTE では、基地局のデータ送信単位である TTI (Transmission Time Interval) は 1 ミリ秒であり、1 スロット (0.5 ミリ秒) の RB を 2 つ連続して端末に割り当てられる。LTE ではシステムごとに利用する帯域幅が設定されており、帯域幅ごとに 1 スロットあたりのリソースブロック数が決まっている (表 4.1)。例えば LTE のシステム帯域が 10MHz の場合、1 スロットあたりの RB 数は 50 になる。一つのリソースブロックはさらに単一の OFDM シンボルを持つリソースエレメントに分割されている。リソースエレメント (Resource element, RE)

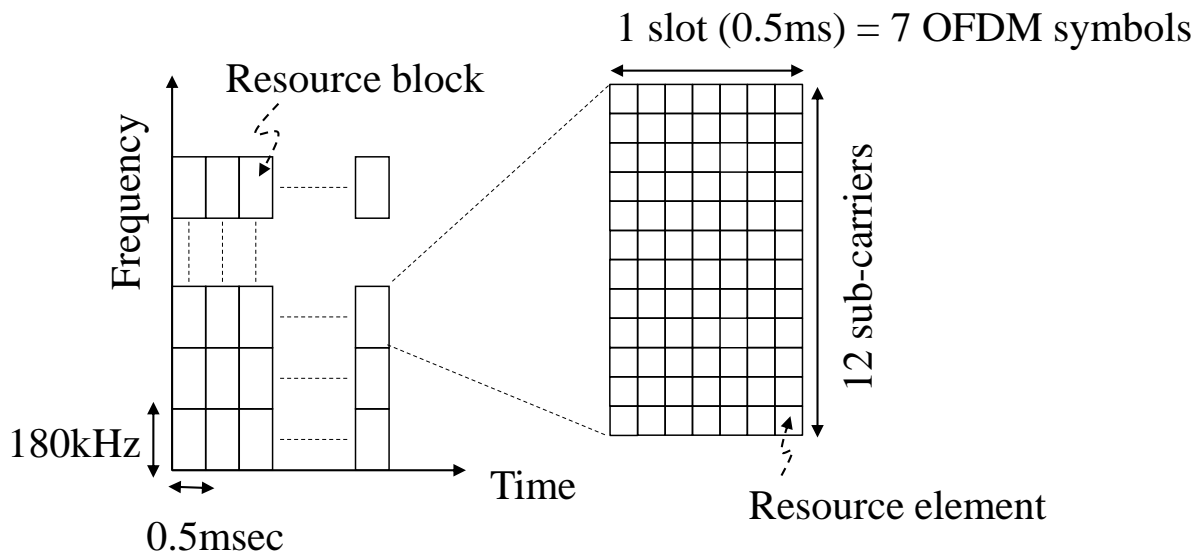


図 4.4 基地局におけるリソースブロックの基本構成

は LTE のデータ変調の最小単位で、15kHz ごとに分割されたサブキャリアを占有し、一つの OFDM シンボルを持つ。一つのリソースブロックは 84 個のリソースエレメントから成る。

スケジューリング方式とは各 RB にどの端末のデータ通信を割り当てるかの戦略のことである。RB への割り当てのためには、RLC から MAC に送られてきてバッファに蓄積されているデータ量、PCRF が設定する QoS の優先度や端末の物理レイヤの電波状況などの情報を用いることもできる。

最終的に PHY レイヤにおいて無線変調、符号化が行われて、端末にデータが送信される。基地局と端末の通信チャンネル状態に応じて変調方式、符号化レートが異なるため、異なる端末で同じ数だけ RB が割り当てられても通信データ量は異なり、電波状態が良い端末ほどデータ通信量が多くなる。

4.2.3 代表的なスケジューリング方式

先に述べた通り、スケジューリング方式は各 RB にどの端末のデータ通信を割り当てるかを定める方式である。Capozzi らは、UE の RB への割り当てのためのメトリックを定義することで、各スケジューリング方式のアルゴリズムを説明している [26]。

図 4.3 の MAC スケジューラが RB に UE を割り当てる 1TTI のアルゴリズムを、図 4.5 に示した。

MAC レイヤには各 UE に送信するデータがバッファ (Data queue) に蓄積されてい

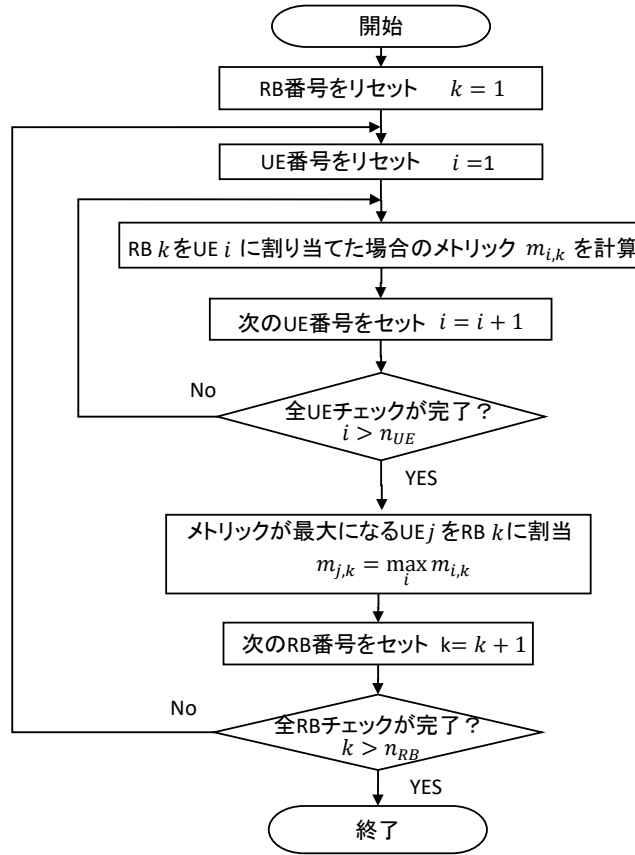


図 4.5 リソースブロック割り当てアルゴリズム

る。ここでは、 n_{UE} 台の UE への送信バッファがあるものとする。各バッファに蓄積されたデータに対して、 n_{RB} 個のリソースブロックを割り当て各端末に送信するかどうかを、スケジューリング方式に対応したメトリックを計算して決定する。

1TTI あたりの RB の割り当ては、最初の RB ($k = 1$) からすべての RB への割り当てが完了するまで繰り返す。 k 番目の RB への UE の割り当ては、すべての UE ($i = 1, \dots, n_{UE}$) に対して、どの UE を割り当てるべきか、メトリックを使って評価する。 i 番目の UE に対して、 k 番目の RB を割り当てたときのメトリックを $m_{i,k}$ としたとき、すべての UE に対してメトリック計算を繰り返し、 $m_{i,k}$ を最大にする UE j を k 番目の RB に割り当てる。

$$m_{j,k} = \max_i (m_{i,k}) \quad (4.1)$$

これを最後の RB ($k = n_{RB}$) まで繰り返す。

スケジューリング方式によりメトリック $m_{i,j}$ の計算が異なり、データが到着順にメトリックを大きくする方式、これまでの通信量を考慮して公平になるようにする方式、端末

ごとの電波状態を考慮する方式などが提案されている。

以下で、本メトリックを用いて、代表的なスケジューリング方式および提案方式のアルゴリズムについて説明する。

■ラウンドロビン方式 (Round Robin) ラウンドロビン方式 (RR) は、RB 割当を端末順に行う方式であり、下記のようなメトリックを利用する。

$$m_{i,k}^{\text{RR}} = m_{i,k}^{\text{RR}} + 1 \quad (4.2)$$

k 番目の RB に i 番目のユーザを割り当てられた場合、

$$m_{i,k}^{\text{RR}} = 0 \quad (4.3)$$

とする。

最も単純なスケジューリング方式の一つであり、端末ごとの割り当て時間が公平になる方式である。一方、端末の電波状態や端末のデータ通信量などを考慮しないため、電波利用効率、データ通信量の観点での公平性に欠ける。

■プロポーショナルフェア (Proportional Fair) もっともよく用いられるスケジューリング方式がプロポーショナルフェア (PF) 方式である。基地局からの送信データ量の総計を多くすること (電波利用効率向上) と、受信データ量が少ない端末を優先する公平性を両立する方式である。

PF 方式は次のメトリックを利用し、 k 番目のリソースブロックは $m_{i,k}^{\text{GPF}}$ が最大となるユーザ i に割り当てる。

$$m_{i,k}^{\text{GPF}} = \frac{[d_k^i(t)]^\xi}{[\bar{R}^i(t)]^\psi} \quad (4.4)$$

ここで、 $d_k^i(t)$ は i 番目のユーザに対する送信可能データ量、 $\bar{R}^i(t)$ は i 番目のユーザが過去から時刻 t までに得たスループットの平均値である。 $d_k^i(t)$ は、 i 番目のユーザに k 番目のリソースブロックを利用する場合の信号対干渉雑音比 (Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio, SINR) SINR_k^i を使って、

$$d_k^i(t) = \log [1 + \text{SINR}_k^i(t)] \quad (4.5)$$

と求められる。

式 (4.4) で表されるメトリックを利用する方式は Generalized Proportional Fair 方式と呼ばれ、 ξ , ψ の値により電波利用効率と公平性の重みを変えることができる。以下では、PF 方式は $\xi = \psi = 1$ として扱うものとする。

4.3 アプリケーション特性に基づく基地局スケジューリング方式

本章では、アプリケーションごとの体感品質の特性を説明し、アプリケーションごとの特性に基づいたスケジューリング方式を提案する。

4.3.1 アプリケーションごとの体感品質

ユーザの体感する QoE はアプリケーションごとにその特性が異なる。本節ではビデオストリーミングと Web 閲覧の QoE について説明する。

ビデオストリーミングの体感品質

ITU-T ではビデオストリーミングの体感品質の定量評価について ITU-T P.1203 勧告を定めている [63]。P.1203 では、30 秒から 5 分程度のビデオストリーミングを対象として、映像、音声の符号化による品質劣化およびビデオの再生停止を総合的に評価するモデルを利用して、MOS 値 (Mean Opinion Score) を推定するアルゴリズムを規定している。P.1203 のモデルでは、ビデオの再生停止に関する品質指標 O.23 (perceptual stalling indication)、映像音声の符号化品質のスコア O.35 (final audiovisual coding quality score) とこれらを組み合わせた最終的なメディア品質スコア (final media session quality score) が得られる。今回、本章で扱う基地局のスケジューラでは、通信リソース割り当てに直接影響が出るビデオ再生停止に関する品質指標 O.23 のみを考慮するものとする。

O.23 をビデオストリーミング品質 Q_v と定義し、 Q_v は次のように表現することができる。

$$SI = \exp(-s_n/s_1) \cdot \exp\left(-\frac{T_s}{T_m}/s_2\right) \cdot \exp\left(-\frac{\bar{T}_s}{T_m}/s_3\right) \quad (4.6)$$

$$Q_v = 1 + 4 \cdot SI \quad (4.7)$$

ここで、 T_m , s_n , T_s , \bar{T}_s はそれぞれ、ビデオストリーミングコンテンツの長さ (秒)、ビデオストリーミング 1 セッションの再生停止回数 (回)、重みつき再生停止時間 (秒)、再生停止イベントの平均間隔 (秒) である。また、 s_1, s_2, s_3 は定数であり、 $s_1 = 9.35148684$, $s_2 =$

0.91890815, $s_3 = 11.0567558$ と定められている。 Q_v は 1 から 5 までの値を取り, “5: excellent, 4: good, 3: fair, 2: poor, 1: bad” の 5 段階で評価する。

重みつき再生停止時間とは, ビデオストリーミング再生停止時間の総和であるが, 再生停止がどのタイミングで発生したかにより重みをつけ, ビデオストリーミングの最初の方で再生停止が起こった場合, より品質劣化が高いとして評価する。

ビデオ再生が s_n 回再生停止したとき, i 回目の再生停止が, ビデオのメディア時刻 t_{s_i} (秒) から T_{s_i} (秒) 継続した場合, i 回目の再生停止の重み w_{s_i} は,

$$w_{s_i} = c_{ref7} + (1 - c_{ref7}) \exp\left(- (T_m - t_{s_i}) \frac{\log(0.5)}{-c_{ref8}}\right) \quad (4.8)$$

と表わされ,

$$T_s = \sum_{i=1}^{s_n} w_{s_i} \times T_{s_i} \quad (4.9)$$

となる。パラメータ c_{ref7}, c_{ref8} は, $c_{ref7} = 0.48412879, c_{ref8} = 10$ と規定されている。ビデオ再生停止がなかった場合 ($s_n = 0$), $T_s = 0$ である。

また, 再生停止イベントの平均間隔 \bar{T}_s は,

$$\bar{T}_s = \frac{1}{s_n - 1} \sum_{i=1}^{s_n-1} (t_{s_{i+1}} - t_{s_i}) \quad (4.10)$$

である。ビデオ再生停止がなかった場合 ($s_n = 0$) もしくは 1 回のみの場合 ($s_n = 1$) は, $\bar{T}_s = 0$ である。

Web 閲覧の体感品質

ビデオストリーミングの体感品質と同様に, ITU-T は Web 閲覧時の体感品質の定量評価として, G.1030, G.1031 勧告を定めている [64, 65]。本勧告では, 特にインターネット検索をした結果を閲覧するという利用シーンにおける体感品質をモデル化している。Web 閲覧時の体感品質は, ユーザが Web アクセスを開始してから, Web ページが表示されるまでの時間 T により変化するとしてモデル化している。体感品質 Q_w は下記でモデル化されている。

$$Q_w = 4 / \ln((0.005T_{\max} + 0.24) / T_{\max}) \cdot (\ln(T) - \ln(0.005T_{\max} + 0.24)) + 5 \quad (4.11)$$

ここで, T_{\max} はユーザが許容できる Web セッション時間の最大値である。Web セッション時間の最大値は ITU-T では規定していないが, 本モデルの導出過程において,

Web ダウンロード時間は 5 秒から 100 秒程度であることが示されており、以下では $T_{\max} = 100$ として Web 体感品質を評価することとする。 Q_w は 1 から 5 までの値を取り、“5: excellent, 4: good, 3: fair, 2: poor, 1: bad” の 5 段階で評価する。

4.3.2 提案方式

本節で、アプリケーションごとの優先度を考慮した Application-based Proportional Fair スケジューリング方式 (APF スケジューリング) を説明する。基本的なアイデアは、Proportional Fair スケジューリングにアプリケーションに応じた重みをつけることでアプリケーションごとの違いを考慮する。

k 番目のリソースブロックにユーザ i を割り当てる場合、下記で定義するメトリックを用い、このメトリックが最大となるユーザ i にリソースブロックを割り当てる。

$$m_{i,k}^{\text{APF}} = w_a \cdot \frac{[d_k^i(t)]^\xi}{[\bar{R}^i(t)]^\psi} \quad (4.12)$$

$m_{i,k}^{\text{APF}}$ は APF スケジューリング方式において、リソースブロックを選択するためのメトリックであり、 w_a はアプリケーションごとの重みを示す。ビデオストリーミングおよび Web 閲覧の重みを次の二方式を提案する。

提案方式 1: 固定倍率方式 (APF-1)

提案方式 1 はアプリケーションごとに固定倍率を割り当てる方式である。

$$w_a = \begin{cases} w_{v1} & \text{ビデオストリーミングの場合} \\ w_{w1} & \text{Web 閲覧の場合} \end{cases} \quad (4.13)$$

前節にてビデオストリーミングと Web の QoE 定義について議論したが、ビデオストリーミングは再生停止、Web は視聴開始からの経過時間が QoE に影響を与えることがわかっている。通常、ビデオストリーミングは端末に再生バッファを持っており、ビデオデータが端末に届かず、端末の再生バッファに新しく再生すべきデータがなくなった場合にビデオ再生停止となる。端末の再生バッファが 0 にならない限り QoE が低下しないと考えられるため、視聴開始からの経過時間が直接影響を与える Web と比較すると、ビデオストリーミングのデータ通信より Web のデータ通信を優先すべきである。

そのため、提案方式 1 では、

$$w_{w1} \gg w_{v1}$$

となるように設定する。

提案方式 2: 時間およびバッファ量に基づく倍率変化方式 (APF-2)

ビデオストリーミングの再生停止は端末が持つ再生バッファ量が少なくなるほど、再生停止の可能性が高くなる。また、Web 閲覧は閲覧開始してから時間が経つほどユーザの体感品質が低くなる。このため、ビデオストリーミングは再生バッファ量が少ないほど、Web 閲覧は閲覧開始からの経過時間が長いほど優先度を高くするようにメトリックを設定する。具体的には下記のように定義する。

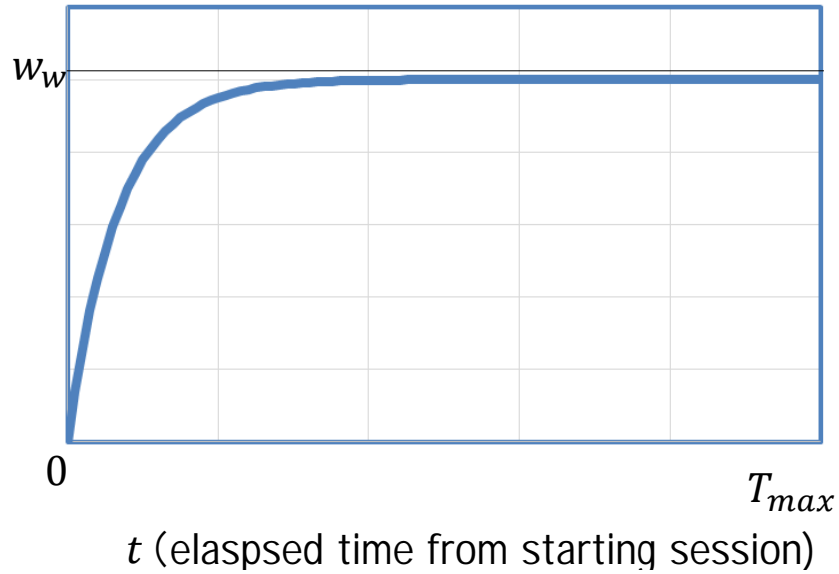
$$w_a = \begin{cases} w_{v2} \exp(-\alpha_v b_v(i)/B_o(i)) & \text{ビデオストリーミングの場合} \\ w_{w2} (1 - \exp(-\alpha_w t_i/T_{\max})) & \text{Web 閲覧の場合} \end{cases} \quad (4.14)$$

ここで、 w_{v2} , w_{w2} はビデオストリーミングと Web 閲覧のアプリケーションごとの優先度の重みである。また、 $b_v(i)$ [s] は現時刻において、ユーザ i の端末に蓄積されているビデオのバッファ量 (秒)、 $B_o(i)$ [s] はユーザ i 端末におけるビデオバッファの蓄積目標量 (秒) である。 t_i [s] はユーザ i が Web 閲覧を開始してからの経過時間、 T_{\max} [s] はユーザ i の Web 閲覧の許容最大遅延である。 α_v, α_w は優先度決定のパラメータであり、ビデオストリーミングのバッファ量、Web 閲覧の経過時間の影響度を示す。提案方式の重み特性のグラフを図 4.6 に示す。ビデオストリーミングはバッファが 0 になるとビデオ映像の再生が停止し、ユーザの体感品質が著しく低下する。そのため、バッファ量 0 を最大に、バッファ量が少ないほど優先してデータ送信を行う。Web 閲覧の場合も Web 閲覧を開始してからの時間経過に伴いユーザの体感品質が低下するため、経過時間が長いデータを優先して送信することを意味している。

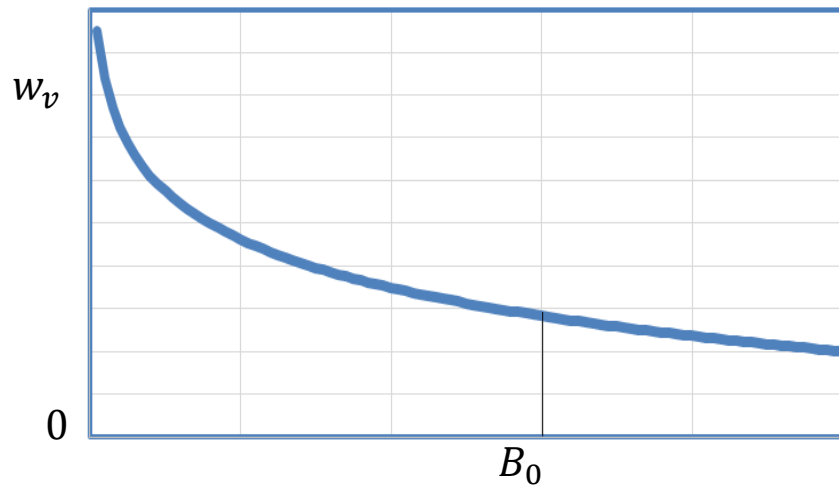
4.3.3 他のアプリケーションへの対応

前節までで、ビデオストリーミングと Web 閲覧のメトリックを定義した。本節では、他のアプリケーションに拡張するための方針について補足する。基本的な方針は、アプリケーションに応じた重み w_a を設定する。例えば、VoIP や Gaming など、低遅延性が求められるアプリケーションの場合は w_a を大きくし、ダウンロードトラフィックのような優先しないアプリケーションの場合は w_a を小さくする。さらに、提案方式 2 で述べたように、アプリケーションの状態に応じて w_a が変化するようにしても良い。例えば、VoIP で許容される遅延を T_{VoIP} とした場合、次のように定義することが可能である。

$$w_a = w_{\text{VoIP}} (1 - \exp(-\alpha_{\text{VoIP}} t_i/T_{\text{VoIP}})) \quad (4.15)$$



(a) Web に対する重み特性



b (amount of stored data in UE)

(a) ビデオに対する重み特性

図 4.6 提案方式 2 の Web, ビデオに対する重み特性

$t_i, w_{VoIP}, \alpha_{VoIP}$ はそれぞれ, VoIP パケットが基地局に到着してからの経過時間, VoIP アプリに対するアプリケーションごとの重みと経過時間に対する影響度である。

また, 今後増加すると期待される IoT 通信についても同様の拡張が可能であると考えられる。しかし, IoT 通信の品質については明確な基準がないため, 具体的な重み設定についてはここでは議論しない。

表 4.2 基地局スケジューリング方式評価のためのシミュレーションパラメータ

Web コンテンツデータ量	1.5MB
ビデオ尺長	30 秒
ビデオビットレート	1.0Mbps
基地局 TTI	1ms
基地局システム帯域	10MHz
1TTI あたりのリソースブロック数	50
APF-1 w_{v1}	1
APF-1 w_{w1}	1000
APF-2 w_{v2}	1
APF-2 α_v	1
APF-2 $B_o(i)$	10
APF-2 w_{w2}	100
APF-2 α_w	15
Web QoE 評価パラメータ T_{\max}	100

(パラメータの根拠は文中に記載)

4.4 評価・考察

4.4.1 評価方法

提案方式に対して、独自に開発したシミュレータを用いたシミュレーションにより有効性を検証した。

シミュレータでは、10 台から 30 台の端末が基地局に接続されていて、インターネットサーバから基地局を経由して端末に流れるデータパケットの挙動をシミュレーションする。シミュレーションではそれぞれの端末から任意のタイミングでビデオストリーミング、Web 閲覧を開始する。基地局ではインターネットサーバからビデオストリーミング、Web 閲覧のパケットを受信し、提案方式 (APF-1, APF-2), ラウンドロビン (RR) 方式, プロポーショナルフェア (PF) 方式でスケジューリングを行う。スケジューリングで割り当てられたリソースブロックは各端末の電波状態 (CQI) を用いてデータ送信を行う。すべての端末におけるビデオストリーミング、Web 閲覧が完了後、それぞれの端末におけ

るビデオ視聴と Web 閲覧の体感品質を計算して評価する。

今回のシミュレーションでは、通信ボトルネックは基地局と端末間のみ存在すると想定し、インターネット、EPC ではパケットロス、伝送遅延による通信品質の劣化は存在しないと仮定した。今後、5G のような高速なモバイルネットワークが導入された場合、インターネットや EPC がボトルネックになる可能性がある。これに対し、エッジコンピューティング (Multi-access Edge Computing, MEC) やコンテンツデリバリーネットワーク (Content Delivery Network, CDN) など、インターネットのボトルネックを回避する技術の進化も期待されるため、5G でも基地局一端間間の有限な無線リソースがボトルネックと考えるのが妥当であると想定した。

ビデオと Web コンテンツはすべて一様のコンテンツとし、ビデオはビットレートが 1Mbps、ビデオ尺長が 30 秒、Web ページのデータ量は 1.5MB とした。ビデオ閲覧のデータは 1 ミリ秒ごとに 125 バイトのデータが基地局の当該端末用のバッファに蓄積され、Web ページのデータは端末が Web アクセスをした時点で基地局の当該端末用のバッファに 1.5MB が蓄積される。

基地局の TTI は 1 ミリ秒、システム帯域は 10MHz とした。基地局のシステム帯域が 10MHz であるので、基地局では 1 ミリ秒ごとに 100 個 (= 50×2) のリソースブロックを端末に割り当てて送信する。基地局から端末へのデータ送信は、各端末の CQI と割り当てリソースブロック数に基づくデータ量を端末バッファから読み出して送信する。CQI とリソースブロック数から得られるデータ量は、表 5.2、表 5.4 から算出する。算出の詳細は 5.3.2 節に後述する。

Web 閲覧では、基地局の当該端末のバッファが 0 になると Web 閲覧が完了である。ビデオストリーミングの場合、30 秒分のデータ (30Mbit=3.75MB) の送信を行うが、送信完了までに基地局のバッファが 0 になると、ビデオデータが一時端末に届かない状況になる。

端末でビデオストリーミングのデータを受信すると、端末上のビデオ再生用の再生バッファに蓄積され、端末では再生バッファを読み出しながらビデオを再生する。ビデオ閲覧を開始後、再生バッファに 10 秒分のデータ (1.25MB) が蓄積された時点でビデオ再生を開始する。ビデオ再生は再生バッファから 1 ミリ秒ごとに 125 バイト読み出しながらビデオを再生する。この時、再生バッファが 0 になり読み出しデータがなくなると再生停止となる。再生停止後は 10 秒分のデータ (1.25MB) が再度蓄積されるまで再生を開始せず、10 秒分のデータが蓄積されると再生を再開する。30 秒分のデータを再生し終わると、ビデオ閲覧が完了する。

APF-1 のパラメータとして、ビデオ視聴と Web 閲覧の重み $w_{v1} = 1, w_{w1} = 1000$ と

表 4.3 CQI=10 のビデオ視聴, Web 閲覧 QoE 評価結果

	ビデオ視聴端末		Web 閲覧端末	
	平均 QoE	許容端末数	平均 QoE	許容端末数
RR	3.95	10	3.33	10
PF	3.95	10	3.22	10
APF-1	3.95	10	5.0	10
APF-2	3.95	10	4.99	10

表 4.4 CQI=6 のビデオ視聴, Web 閲覧 QoE 評価結果

	ビデオ視聴端末		Web 閲覧端末	
	平均 QoE	許容端末数	平均 QoE	許容端末数
RR	2.64	0	1.99	0
PF	2.82	0	2.24	0
APF-1	3.01	5	3.22	10
APF-2	3.02	6	3.42	10

した. これはビデオ視聴に比べて, Web 閲覧のデータを優先するため, $w_{v1} \ll w_{w1}$ となるようにパラメータを設定した.

APF-2 のパラメータとして, ビデオ視聴と Web 閲覧の重み $w_{v2} = 1, w_{w2} = 100$, $\alpha_v = 1, \alpha_w = 15$, $B_o(i) = 10$ とした. w_{v2}, w_{w2} は APF-1 と同様にビデオ視聴と Web 閲覧のデータ優先の重みであるが, APF-1 と比較してアプリケーション状態の変化を考慮するため, w_{w2} は APF-1 より一桁少なくした. α_v, α_w は, 図 4.6 で示した重み特性をもとに設定した. $B_o(i)$ は, ビデオ視聴の目標バッファ量である 10 秒を設定し, α_v はバッファ量が $B_o(i)$ であるときに, パケットの優先度が 0.5 以下になる程度の値を選択した. G.1030 では, Web 閲覧の QoE が 3 となるときの Web 閲覧時間が 8.6 秒となるため, 8.6 秒時点の Web パケットの優先度を 0.7 以上とするように α_w を設定した.

Web 閲覧, ビデオ視聴の体感品質は, 前章で説明した ITU-T G.1030, P.1203 で定義された体感品質を用いた. Web 閲覧の体感品質のパラメータとして $T_{\max} = 100$ を用いた.

以上, シミュレーションに用いたパラメータを表 4.2 にまとめる.

本シミュレーションでは, 端末がすべて同じ CQI である環境における提案方式の基本動作の評価と, 端末移動により各端末の電波状態が変化する環境で評価を行った. 以下で, 両者の評価について説明する.

4.4.2 端末がすべて同じ CQI である環境での評価

本評価では、端末の CQI がすべて 10 の場合とすべて 6 の場合の二通りで評価した。Web 閲覧端末が 10 台、ビデオ視聴端末が 10 台とし、ビデオ端末がシミュレーション開始直後 ($t = 0$) から 1 秒ごとにビデオコンテンツの閲覧を開始する。Web 端末はシミュレーション開始 20 秒後 ($t = 20$) から 1 秒ごとに Web 閲覧を開始する。端末の到着パターンは現実とは異なり、20 台の端末が 1 秒ごとに閲覧を開始するという理想的な固定パターンを利用した。現実の CQI 変動、到着パターンを想定した評価は次節で行い、本節では提案方式の基本的な挙動を評価するため、固定の CQI、固定の到着パターンのみを評価するものとする。

端末の CQI がすべて 10 の場合の体感品質の評価結果を表 4.3 に、すべて 6 の場合の体感品質の評価結果を表 4.4 に示す。表にはそれぞれのケースについて、すべてのビデオ視聴端末の平均 QoE と許容端末数、すべての Web 閲覧端末の平均 QoE と許容端末数を記した。許容端末数とは、許容される QoE として 3 以上となる QoE が得られた端末数である。ビデオ、Web とも 10 台の端末で評価しているため、許容端末数が 10 の場合はすべてのユーザが許容される体感品質を満たしていること、0 の場合はすべてのユーザが許容される体感品質を満たしていないことを示している。

CQI=10 は、すべての端末で十分に良い電波状態が得られるため、ビデオ視聴では再生停止が発生せず、すべてのスケジューリング方式で体感品質が 3.95、すべての端末で QoE が 3 以上である。Web 閲覧もすべての端末で 3 以上となる。提案方式はビデオに比べて Web を優先するため、Web 閲覧の QoE はほぼ最高値である。CQI=10 では Web 閲覧を最優先にしてもビデオ QoE に影響しない程電波資源が利用可能であると言える。

CQI=6 は、電波リソースが十分でないため、QoE が低下している。既存方式ではビデオ視聴、Web 閲覧とも全端末の QoE が 3.0 以下であるが、提案方式では半数以上ビデオ視聴端末が、Web 端末ではすべての端末が 3.0 以上となった。

4.4.3 端末が移動する環境での評価

本評価では、端末が移動し、端末ごとに電波状況が異なり、かつ電波状況が時間的に変化する環境における提案手法の効果を評価した。

表 4.5 端末移動評価のビデオ視聴, Web 閲覧平均 QoE

	移動端末 10 台		移動端末 20 台		移動端末 30 台	
	ビデオ	Web	ビデオ	Web	ビデオ	Web
RR	3.93	4.09	3.61	3.44	3.42	2.91
PF	3.94	3.89	3.71	3.01	3.13	2.60
APF-1	3.91	4.43	3.68	4.33	3.29	3.90
APF-2	3.90	4.40	3.65	4.24	3.09	3.82

表 4.6 端末移動評価のビデオ視聴, Web 閲覧許容端末割合

	移動端末 10 台		移動端末 20 台		移動端末 30 台	
	ビデオ	Web	ビデオ	Web	ビデオ	Web
RR	1.0	0.90	0.90	0.66	0.69	0.54
PF	1.0	0.78	0.98	0.27	0.62	0.21
APF-1	1.0	1.0	0.99	1.0	0.85	0.86
APF-2	1.0	1.0	0.99	1.0	0.56	0.90

シミュレーション条件

本評価におけるシミュレーションの条件について述べる。

本評価では、基地局を中心とした 500 メートル四方の領域で端末がランダムな速度、方向で移動しながら Web 閲覧, ビデオ視聴している状況を想定した。端末の移動は、Random walk 2D mobility model を使用し、シミュレーション範囲内のランダムな位置から 1 秒ごとに速度と方向をランダムに選択しながら移動する。端末の速度は、人間が歩く速度を想定し、1 秒ごとに毎時 2km から 4km の間でランダムに変化する。端末にもよるが、シミュレーション時間 (100 秒) の間、おおよそ 20 メートル四方をランダムに移動していた。

移動している端末の CQI は ns-3 によるシミュレーションを用いて取得した。ns-3 で電波シミュレーションのパスロスモデルは Urban を用い、端末を移動させ、CQI を 1 秒ごとに取得した。

移動端末の全端末数は 10 台, 20 台, 30 台と変化させて評価を行った。この時のビデオ端末数と Web 端末数は同数である。また、全端末数を 20 台と固定し、ビデオ端末数を 5 台, 10 台, 15 台と変化させ、ビデオ端末数と Web 端末数の比率を変化させた評価も行っ

た。ビデオ端末数を 5 台, 10 台, 15 台のとき, Web 端末数はそれぞれ 15 台, 10 台, 5 台である。

シミュレーションでは, すべての端末がシミュレーション開始から 20 秒の間にランダムに Web 閲覧, ビデオ視聴を開始し, すべてのセッションが完了後に Web 閲覧およびビデオ視聴の QoE を測定した。これは参入時間間隔が指数分布に従う確率過程であり, 例えば, Web 端末が 10 台のとき, Web 端末の到着は到着率 $\lambda = 0.5$ [台/秒] のポアソン過程に従う。すなわち, 参入時間間隔は $\lambda = 0.5$ [台/秒] の指数分布に従う。

各設定においてシミュレーションを 20 回繰り返し, ビデオ, Web のそれぞれの平均 QoE, QoE が 3 以上の端末数 (許容端末数), QoE 分布 (CDF) を測定した。

端末数を変化させた場合の評価結果

端末数を 10 台, 20 台, 30 台と変化させた場合の評価結果を表 4.5, 表 4.6 に示す。本評価では, ビデオと Web の端末比率は 1:1 とした。すべての評価で, 提案手法 (APF-1, APF-2) の Web 閲覧端末の平均 QoE が従来手法より高く, 最大 1.32 ポイント向上している。一方, ビデオ視聴端末の QoE は, 提案手法の方が従来手法より必ず低いというわけではない。QoE が 3 以上の端末を許容端末とした場合, 端末 30 台のビデオ QoE のときの APF-2 以外で, 従来手法の許容端末割合より提案手法の許容端末割合が高く, 品質を許容できるユーザ数が多くなっている。ただし, 端末 30 台のビデオ QoE のときの APF-2 でもビデオ視聴と Web 閲覧の許容端末の合計は従来手法より上回っている。ビデオと Web を合わせた許容端末数では, 移動端末が 30 台の場合で最大 2.1 倍に向上している。

全評価試行における全ビデオ視聴端末, 全 Web 閲覧端末の QoE の CDF を図 4.7, 図 4.8 に示す。ビデオ視聴, Web 閲覧とも, すべてのスケジューリング方式で, 端末が増えるほどグラフが左に移動し, QoE が悪化している端末が増えている。図 4.7 のビデオ視聴端末の CDF では, 端末 10 台の場合はほぼすべての端末で QoE が 3.5 以上であったが, 端末 20 台では 3 以下となる端末が発生しており, 端末 30 台ではよりグラフが左に移動しており, すべてのスケジューリング方式で QoE が悪化した端末が増加している。ビデオ視聴の場合, 再生停止が発生しない場合は, ほぼ一定の QoE 値をとるため, QoE が 3.9 から 4.0 の間で CDF 値が急激に増加する。特に端末が 10 台の場合は基地局の無線リソースに余裕があるため, ビデオ視聴時の再生停止がほぼ発生せず, APF-2 の 100 回の試行のうち, 71 試行で 3.946 という一定値を取っている。端末が 20 台の場合, 端末が 30 台の場合でも, QoE が 3.9 から 4.0 の間で CDF 値が急激に増加するのは同様の理由である。

表 4.7 ビデオ, Web 端末割合を変化させた時のビデオ視聴, Web 閲覧平均 QoE

	ビデオ 5 台		ビデオ 10 台		ビデオ 15 台	
	ビデオ	Web	ビデオ	Web	ビデオ	Web
RR	3.75	3.21	3.61	3.44	3.56	3.12
PF	3.60	2.98	3.71	3.01	3.55	2.85
APF-1	3.48	3.63	3.68	4.33	3.63	4.33
APF-2	3.47	3.60	3.65	4.24	3.62	4.27

表 4.8 ビデオ, Web 端末割合を変化させた時のビデオ視聴, Web 閲覧許容端末割合

	ビデオ 5 台			ビデオ 10 台			ビデオ 15 台		
	ビデオ	Web	全体	ビデオ	Web	全体	ビデオ	Web	全体
RR	1.0	0.53	0.65	0.90	0.66	0.74	0.78	0.58	0.70
PF	0.92	0.37	0.51	0.98	0.27	0.63	0.79	0.20	0.64
APF-1	0.86	0.69	0.73	0.99	1.0	1.0	0.88	0.99	0.91
APF-2	0.69	0.71	0.71	0.99	1.0	1.0	0.94	1.0	0.96

図 4.7 で, 提案方式 (APF-1, APF-2) のビデオ視聴端末の CDF は, 端末 20 台の RR 方式以外のケースで従来方式 (RR, PF) より左にある. ビデオ視聴と Web 閲覧を区別せずリソースを割り当てていた従来手法に比べ, ビデオ視聴に割り当てられるリソースを低遅延が要求される Web 閲覧への配分した結果であると考えられる. そのため, 図 4.8 に示す Web 閲覧の提案方式 (APF-1, APF-2) の QoE は, 従来方式に比べ QoE が向上しており, また, 提案方式は端末数が増えても QoE 劣化は少ない. QoE=3 の累積度数を見てみると, 提案手法が従来手法より度数が高くなっているのは端末 30 台の APF-2 のビデオ QoE のみである. これ以外のビデオ CDF を見ると, QoE が 3 以上では提案手法が従来手法よりグラフが左に移動していることがわかる. これはビデオ QoE が高い端末のリソースを Web 端末に融通し, 許容端末数を増加させたと言える.

ビデオ, Web 端末比率を変化させた場合の評価結果

次に, 全端末数は 20 台で, ビデオと Web 端末の比率を変化させた場合の評価結果を表 4.7, 表 4.8 に示す. ビデオ閲覧端末は 5 台, 10 台, 15 台と変化させている. それぞれ, Web 閲覧端末はそれぞれ 15 台, 10 台, 5 台となる. 前節の評価と同様に, すべて

の評価で、提案手法 (APF-1, APF-2) の Web 閲覧端末の平均 QoE が従来手法より高いが、ビデオ視聴端末の QoE は、提案手法の方が従来手法より必ず低いというわけではない。QoE が 3 以上の端末を許容端末としたとき、ビデオ 5 台評価時のビデオ視聴の許容端末割合以外は、すべてのケースにおいて、提案手法が従来手法を上回っている。しかし、ビデオ視聴端末と Web 閲覧端末の許容端末数の合計はすべてのケースで提案手法が従来手法を上回っており、ビデオ視聴端末 10 台、Web 閲覧端末 10 台の場合で最大 59% 向上している。

全評価試行における全ビデオ視聴端末、全 Web 閲覧端末の QoE の CDF を図 4.9 , 図 4.10 に示す。横軸が QoE, 縦軸が累積度数である。前回の評価と同様、ビデオ視聴の場合、再生停止が発生しない場合は、ほぼ一定の QoE 値をとるため、QoE が 3.9 から 4.0 の間で CDF 値が急激に増加している。例えば、ビデオ 5 台の RR では、100 回の試行のうち 48 試行で、ビデオ視聴時の再生停止がほぼ発生しない 3.946 という一定値を取っているため、QoE が 3.9 で急激に CDF が増加している。ビデオ端末が 10 台、15 台の場合でも、QoE が 3.9 から 4.0 の間で CDF 値が急激に増加するのは同様の理由である。

従来手法はビデオ QoE に比べて Web 閲覧の QoE が大きく下がっているが、提案手法は Web とビデオで大きな違いはない。QoE=3 の累積度数を見てみると、提案手法が従来手法より度数が高くなっているのはビデオ 5 台、Web15 台のビデオ QoE のみである。これ以外のビデオ CDF を見ると、前節の評価と同様、QoE が 3 以上では提案手法が従来手法よりグラフが左に移動しており、ビデオ QoE が高い端末のリソースを Web 端末に融通し、許容端末数を増加させたと言える。

4.4.4 考察

提案方式の QoE 向上効果

評価により、提案手法は Web 閲覧の QoE が大きく改善し、許容 QoE 以上の端末が多くなることがわかった。ビデオ視聴の平均 QoE は既存手法と大きく落ちている訳ではない。ビデオ視聴は Web に比べてデータ到着遅延の QoE への影響が少ないこと、ビデオ視聴は継続的にデータ送信が続くことから、Web 閲覧に対して優先的に無線リソースを割り当てて、Web 閲覧セッションを早く完了させることが、ビデオ視聴も含めた全体の QoE に効果があると考えられる。

提案方式 1, 提案方式 2 を比較すると、多くのケースで提案方式 1 (APF-1) の方が平均 QoE, 許容端末数が多くなっている。提案方式 1 の方がより Web セッションを優先していることから、Web 閲覧セッションを早く完了されることが全体の QoE 確保に効果が

あることを裏付けていると考えられる。

評価パラメータ

今回の評価で用いたパラメータは最適なパラメータではないが，許容 QoE 端末数を増加させることは達成可能であることがわかった。

しかし，移動端末評価において，端末数 30 台の評価と端末数 20 台で Web 閲覧端末が多い時の評価において，ビデオ視聴端末の許容端末が従来手法より少ないこともわかった。これは，無線リソースが十分ではない場合および Web 閲覧端末が多い場合，ビデオ視聴端末に対する無線リソース割り当てが少ないことが原因であると考えられる。Web 閲覧端末とビデオ視聴端末数の比率やトラフィック量の比率で Web の優先度を落とすなどのパラメータ調整を行うことで，より全体の許容 QoE 端末数を増加させることが可能であると考えられる。

適応型ビデオストリーミングの利用可能性の考察

提案方式の評価において，ビデオストリーミングは，1Mbps の固定ビットレートを持つと想定した。しかし，現在，多くのビデオストリーミングサービスでは，トラフィックの状況に応じて，ビットレートを変化させるストリーミング方式が多く用いられている。例えば，ISO 国際標準規格 (ISO/IEC 23001-6) として規定されている MPEG-DASH (Dynamic Adaptive Streaming over HTTP) などである [66]。このような適応型ビデオストリーミング方式のビットレートが変化することによるユーザの体感品質に対する影響は，P.1203 の O.35 でも定義されている。

今回の評価では，MPEG-DASH のようなトラフィック状況に応じてビットレートが変化するストリーミング方式を想定した評価を行っていない。この理由は，ビットレート変化はアプリケーションが選択するものであり，スケジューリング方式で制御するものではないと考えたからである。また，アプリケーションのビットレート選択アルゴリズムは実装に依存するため，評価が困難であることも理由の一つである。

しかし，本論文で提案したスケジューリング方式は適応型ビデオストリーミングでも利用可能である。式 (4.14) 中の，ユーザ i の端末に蓄積されているビデオのバッファ量 $b_v(i)$ ，ユーザ i 端末におけるビデオバッファの蓄積目標量 $B_o(i)$ の単位は，[バイト]ではなく，ともに [秒] であり，バッファに何秒分のデータが蓄積されているかを再生停止の可能性として考慮している。バッファ量をバイトで扱う場合には，同じデータ量がバッファに蓄積されていたとしても，ビットレートの違いで再生停止の可能性が異なるが，秒で扱うことにより，ビットレートによらず，再生停止の可能性を表現することができる。

適応型ビデオストリーミングでは、画質変化によりトラフィックの挙動が変化することが想定されるため、通信網における QoE に基づくスケジューリング方式とアプリケーションレベルの QoE 向上方式との競合あるいは協働は将来研究として重要である。

ビデオ, Web 以外のアプリケーションへの対応

今回は、インターネットトラフィックのうち多くの割合を占めるビデオ視聴と Web 閲覧端末を対象とした。今回は対象外としたが、今後検討が必要なアプリケーションとして、Gaming^{*2}と File Sharing のダウンロードトラフィックが挙げられる [67]。これに加えて、従来研究で検討されてきた VoIP 通信のトラフィックと、今後増加が予測されている IoT 通信のトラフィックも検討が必要と考えられる。4.3.3 節で述べたように、このようなアプリケーションに対応するためには、アプリケーションに応じたスケジューリングのメトリックを定義することで対応が可能である。

IoT 通信については、利用される IoT アプリケーションごとに QoE が異なると考えられるため、まずは IoT 通信の品質を定義する必要がある。IoT 通信のトラフィックモデルについて網羅的な検討が開始されており、IoT の QoE の定義が期待される [68]。

実用上の課題

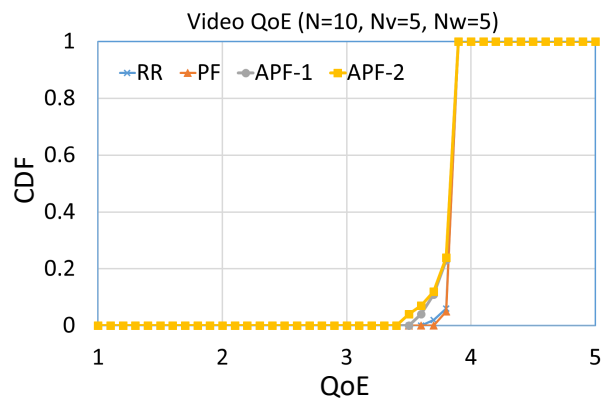
本章で提案したスケジューリング方式は、基地局の MAC スケジューラに実装することを想定している。一般的に基地局では通信トラフィックのコンテンツの中身を見ることはできないため、どのようなアプリケーションがどのようなパラメータで通信されているか知ることができない。そのため、提案方式の実用のためには、基地局において通信トラフィックの中身を知ることが課題である。これに対して、流れるトラフィックの挙動をモニタリングすることで、アプリケーションの種別やビットレートなどを推定する研究が進んでいる [69]。これらの方式との組み合わせにより、アプリケーション QoE に基づくスケジューリング方式の実用が可能となると考える。

4.5 本章のまとめ

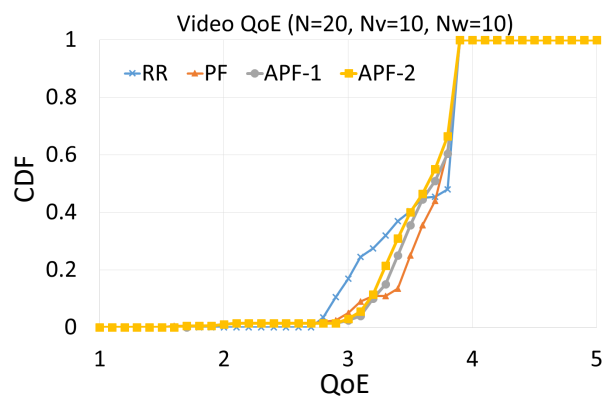
本章では、アプリケーションごとの特性に基づいた基地局のスケジューリング方式を提案した。特にビデオストリーミングと Web 閲覧のユーザが混在している場面を想定し、

^{*2} Gaming にはユーザ間で通信を行うリアルタイムが要求される通信と、ゲームコンテンツダウンロードの両者を含む

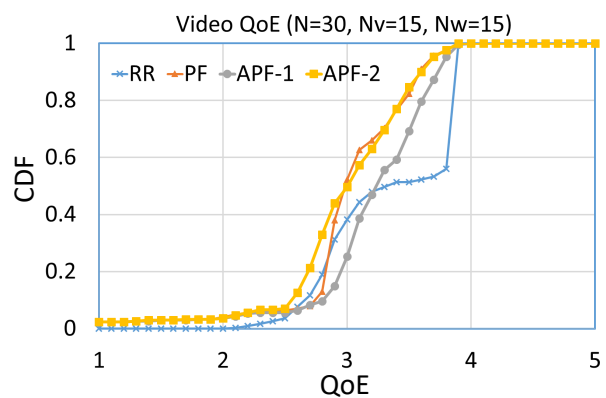
基地局が UE に無線リソースを割り当てるスケジューリングプロセスにおいて、ビデオストリーミングと Web 閲覧の割り当て優先度を決定する。ビデオ視聴時、Web 閲覧時に QoE が一定以上であると通信に満足するが、それ以下になると通信状況に不満を感じるユーザが増加するため、QoE を一定以上となり満足するユーザ数 (許容端末数) を増やすことを目的とし、ビデオ視聴と Web 閲覧の QoE に基づいたスケジューリング方式を提案した。端末が移動する環境を想定したシミュレーションにより、提案方式は従来方式と比較して、Web 閲覧端末の平均 QoE を最大 1.48 ポイント向上できること、ビデオ視聴端末と Web 閲覧端末の許容端末数を最大 2.1 倍増加させることができることがわかった。



端末 10 台

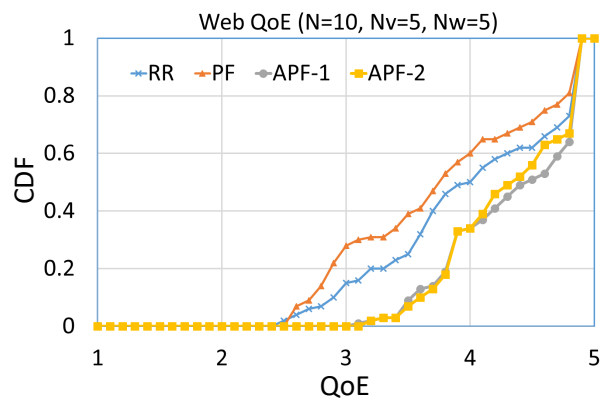


端末 20 台

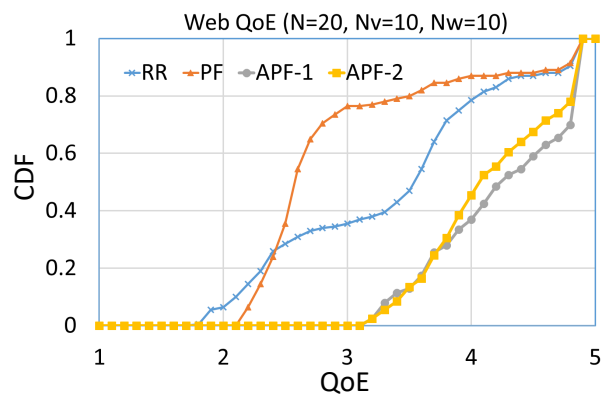


端末 30 台

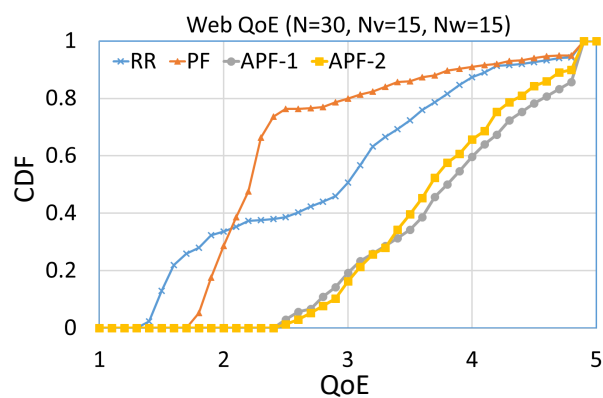
図 4.7 端末移動時のビデオ視聴 QoE の CDF (ビデオ端末と Web 端末は同数)



端末 10 台

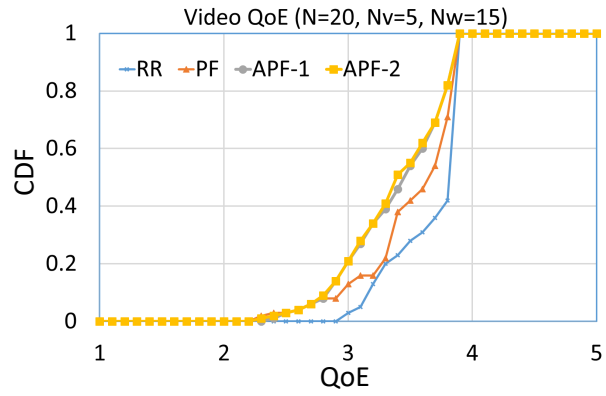


端末 20 台

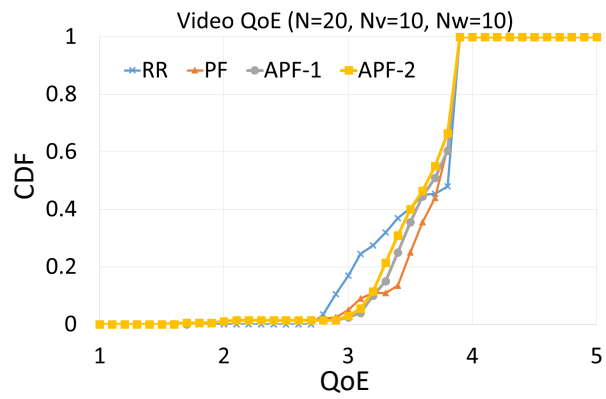


端末 30 台

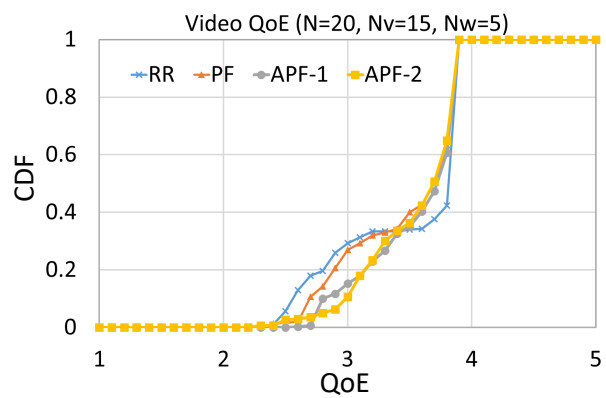
図 4.8 端末移動時の Web 閲覧 QoE の CDF (ビデオ端末と Web 端末は同数)



ビデオ 5 台, Web 15 台

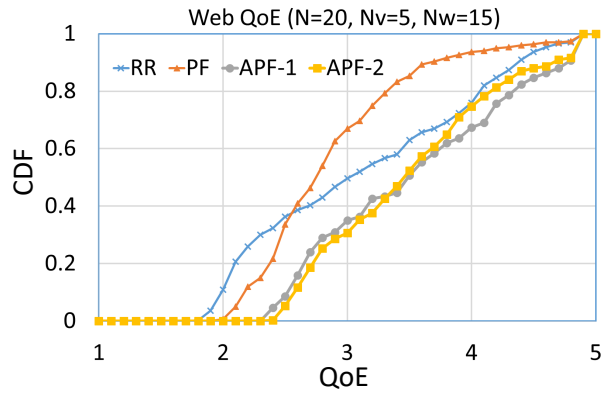


ビデオ 10 台, Web 10 台

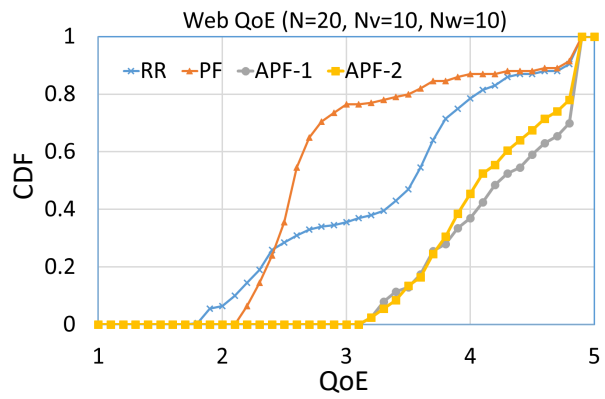


ビデオ 15 台, Web 5 台

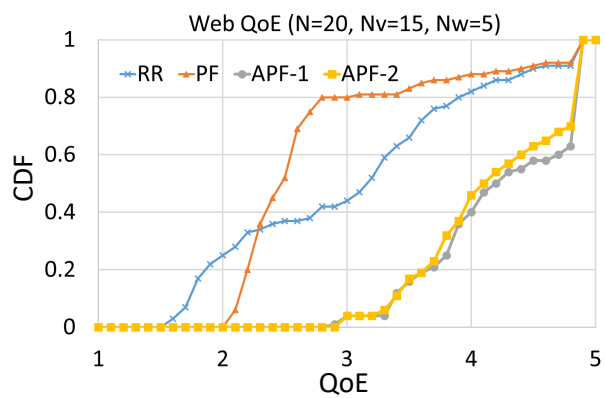
図 4.9 ビデオ, Web 端末割合を変化させた時のビデオ視聴 QoE の CDF



ビデオ 5 台, Web 15 台



ビデオ 10 台, Web 10 台



ビデオ 15 台, Web 5 台

図 4.10 ビデオ, Web 端末割合を変化させた時の Web 閲覧 QoE の CDF

第 5 章

オフピークデータ通信のためのパッシブ型利用可能帯域推定方式

5.1 はじめに

本章では，オフピークデータ通信システムのためのパッシブ型利用可能帯域推定を提案する．オフピークデータ通信システムとは，端末 (UE) が自律的に非リアルタイム通信を基地局負荷が低くなるまで遅らせるシステムである [54]．これにより，ユーザの体感品質を劣化させることなく，リアルタイム通信の品質向上，基地局の効率利用向上が可能である．

オフピークデータ通信システムの最大の課題は，基地局と UE の間でどれくらい通信速度で通信できるか，すなわち利用可能帯域の推定である．インターネットやモバイルネットワークの利用可能帯域推定は様々な方式が提案されてきた．Sato らや Kitahara らは，試験的に少量のデータやパケットの組を送信することで，モバイルネットワークの利用可能帯域を推定する手法を提案している [41, 40]．これらの方式は，推定のための試験的な通信 (プローブパケット) を必要とすることから，アクティブ型推定方式と呼ばれる．しかしながら，試験的な通信を行うことは，より基地局やモバイルネットワークに負荷をかけることになる．このため，基地局負荷のピークを下げることを目的としたオフピークデータ通信システムには不適であり，試験的な通信を必要としないパッシブ型推定方式が望まれる．

既に，基地局の負荷をパッシブに推定できる推定方式を提案してきた [53, 54]．本章では，基地局の負荷に加えて，UE と基地局間の利用可能帯域を推定する方式を提案する．基地局の負荷とは，基地局が UE への通信のために割り当てることができる無線リソース

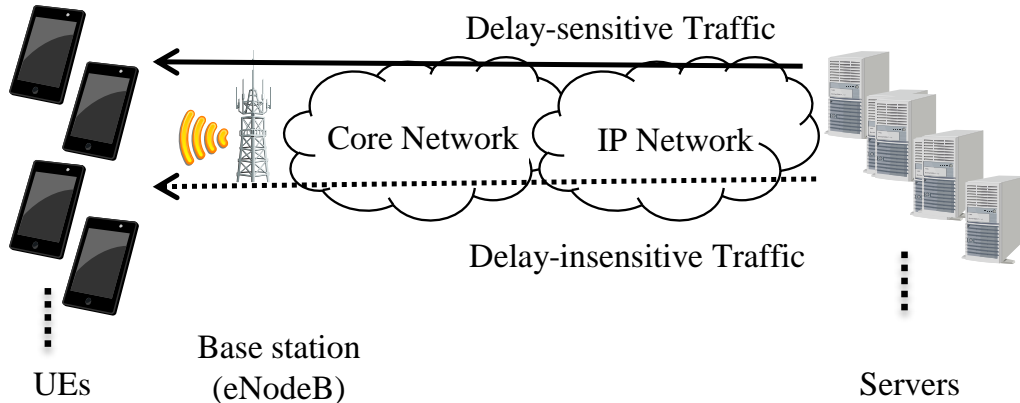


図 5.1 オフピークデータ通信システムアーキテクチャ

表 5.1 オフピークデータ通信システムアーキテクチャ分類

	モニタリング	制御
サーバ	新たな通信プロトコルもしくは、アクティブ推定方式が必要.	コンテンツ送信制御は容易 多数の通信コネクションが発生.
基地局	可能.	コンテンツ詳細を知ることが困難.
クライアント	パッシブ推定方式が利用可能.	コンテンツ受信制御が容易 通信コネクションは切断可能.

の量であるが、利用可能帯域は基地局が割り当てた無線リソースをつかって通信できる通信速度である。利用可能帯域推定により、オフピークデータ通信システムにおいて、UEがより効率的なダウンロードスケジューリングが可能となることが期待できる。 . .

5.2 オフピークデータ通信システムアーキテクチャ

本節ではオフピークデータ通信システムのアーキテクチャについて述べる。

オフピークデータ通信システムとは、モバイルネットワークが混雑している場合、UEが自律的に非リアルタイム通信を基地局負荷が低くなるまで遅らせるシステムである。これにより、ユーザの体感品質を劣化させることなく、リアルタイム通信の品質向上、基地局の効率利用向上が可能である。

基地局のトラフィック負荷は大きく変動しており、基地局のトラフィックはトラフィックのピークが発生している。トラフィックピーク時は通信速度が遅いため、リアルタイム通信の品質が劣化することになる。トラフィックのピークは短い間隔で発生するピーク、

長い間隔で発生するピークなど様々な特性を持つ [70, 71]. 長い間隔で発生するピークは、主に人間の日々の活動によって発生する。例えば、昼と夜の活動の違いが1日単位でのトラフィックピークになって現れる。また、大きなイベントがあると、イベントの参加者はライブビデオの視聴や SNS への投稿などを行うため、大きなデータトラフィックを発生させる。長い間隔のピークは分単位、時間単位、週単位から月単位で発生することもある。

すでに述べた通り、AT&T は秒単位で短い間隔のトラフィック負荷のピークが発生すると報告している [10]. 長い間隔のピークトラフィックと異なり、短い間隔のピークトラフィックはデータ通信の特性の違いから発生する。例えば、通信セッションごとのダウンロードデータ量の違いやセッションの継続時間の違い、トラフィック発生パターンの違いなどである。短い間隔でのピークトラフィックは数秒単位で発生しており、本提案は、人間活動を制御するのではなく、データ通信トラフィックを制御することで、短い間隔のピークトラフィックを抑制することが目的である。このため、以下では短い間隔のトラフィック負荷を軽減するためのオフピークデータ通信について議論する。

想定するオフピークデータ通信のシステムアーキテクチャを図 5.1 に示す。本システムはサーバ、基地局、UE から成る。UE は基地局を介してサーバと通信する。基地局を通るトラフィック量が多いとき、すなわち基地局がピーク負荷時には、非リアルタイム通信を行う UE およびサーバは基地局負荷が低下するまで通信を遅延させる。非リアルタイム通信を遅らせることで、基地局負荷が低減し、UE はリアルタイム通信データをより早く受信することができる。

オフピークデータ通信を実現するため、まず、オフピークデータ通信システムのあるべきアーキテクチャを、基地局の負荷もしくは UE の利用可能帯域をモニタリングする場所およびトラフィックを制御する場所に応じて分類して議論する。

■基地局負荷のモニタリング 理論上、サーバ、基地局、UE のどこでも基地局負荷のモニタリングが可能である。ここでは、それぞれの場所で基地局負荷をモニタリングした場合の特徴をまとめる。

サーバサイドモニタリング

サーバは基地局負荷を直接知ることはできないため、基地局負荷を知るための新たなプロトコルを導入する必要がある。アクティブ型推定方式は基地局の負荷もしくは利用可能帯域を推定するための一つの方法である。様々なアクティブ型推定方式が研究されてきているが、アクティブ型方式は基地局負荷を増大させるという欠点がある。

また、基地局負荷に関する情報をサーバに伝送するプロトコルを利用することも可

能であるが、新たなプロトコルの導入、普及には時間がかかることが課題である。

基地局サイドモニタリング

基地局では自身の負荷測定は容易である。

クライアントサイドモニタリング

サーバサイドモニタリングと同様に、UE は基地局負荷を直接知ることはできない。しかし、UE は基地局と UE 間の電波品質に関する情報を保持している。従来研究により、これらのメトリックは基地局負荷や UE と基地局間の利用可能帯域に関係があることが知られている [53, 56, 59]。これらの情報を利用することで、クライアントでは基地局負荷の推定が可能である。

以上により、基地局負荷のモニタリングは、基地局サイドもしくは、クライアントサイドで実現が期待できる。

■**トラフィック制御** 基地局負荷モニタリングと同様に、理論上はトラフィック制御もサーバ、基地局、クライアントのどこでも実施可能である。ここでは、それぞれの場所でトラフィックを制御する場合の特徴をまとめる。

サーバサイド制御

サーバは UE へ送信するコンテンツを保持しており、送信コンテンツが非リアルタイムトラフィックであった場合、当該コンテンツ送信を遅らせることは容易である。ただし、非リアルタイムトラフィックの送信を止めている間、サーバと UE 間のトランスポートプロトコルは接続されたままである。これはサーバリソースを消費する可能性がある。

基地局サイド制御

通常、基地局ではコンテンツの中身を知ることはできないため、基地局を流れるトラフィックの送信元、送信先アドレスやトラフィックがリアルタイムなのか、非リアルタイムなのかを判別することができない。そのため、基地局でトラフィック制御することは困難である。

クライアントサイド制御

サーバサイド制御と同様に、クライアントでは自身が通信しているコンテンツの種類や内容を知ることができるため、非リアルタイムトラフィックのダウンロード時間を制御することは容易である。さらに、クライアントでは非リアルタイムトラフィックの受信を止めている間、通信セッションを一旦切断し、受信再開時に再接続することも可能である。クライアントサイド制御はサーバのリソース消費の観点

で、サーバサイド制御より優れている。

表 5.1 に、オフピーク通信システムアーキテクチャの候補についてまとめた。基地局モニタリングの結果をトラフィック制御に送信する必要がないため、基地局負荷モニタリングおよびトラフィック制御は同じ場所で行うことが望ましい。このため、クライアントサイドモニタリングおよびクライアントサイド制御を採用することがオフピーク通信システムの最適なアーキテクチャである。

このとき、残る課題は、クライアントで基地局負荷もしくは基地局と UE 間の利用可能帯域をモニタリングすることである。通常、クライアントで基地局負荷を推定するためには、プローブパケットを送信し、その挙動により負荷を推定するアクティブ型推定方法が用いられる。しかし、プローブパケットの利用は推定のための通信を発生させるため、基地局のトラフィック量や UE の電力消費が大きくなってしまふ。このため、パッシブ型の推定方式が望まれる。UE では、UE と基地局間の電波品質指標をパッシブに取得することができるため、これらの指標を解析することで、パッシブ型推定方式により基地局負荷もしくは利用可能帯域を推定することができる。

次節で、UE が取得できる電波品質指標を用いて基地局負荷および利用可能帯域を推定する提案手法を説明する。

5.3 利用可能帯域推定方式の提案

本章で提案する利用可能帯域推定方式は、UE において、UE と基地局間の利用可能帯域を推定する方式である。ここで、基地局のリソースブロック (RB) の利用率を基地局負荷、基地局と UE 間で実現可能なデータ通信速度を利用可能帯域と定義する。また、本章で提案する推定方式は、UE で取得可能な情報をもとにパッシブに利用可能帯域を推定する方式である。

5.3.1 RB 利用率推定

パッシブに基地局負荷 (RB 利用率) を推定する方式は、既に提案済である [53, 54]。今回提案する利用可能帯域推定方式は、基地局負荷推定結果を用いて推定するため、まず本節で、提案済みの RB 利用率推定方式を簡単に説明する。

LTE のダウンリンクの RB 構成を、図 5.2 に示す。本図は、図 4.4 に、LTE の送受信アンテナが 2 本の場合を追記したものである。この RB 構成に対して、利用されている RB 数を総 RB 数で割ることで RB 利用率が求まる。RB 利用率推定で用いる電波指標は

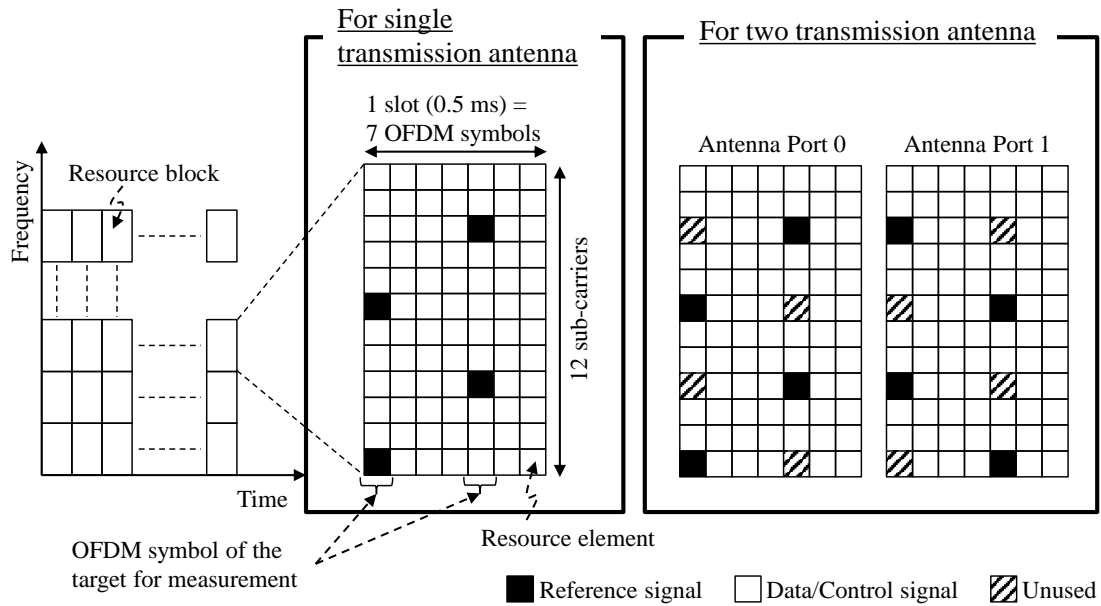


図 5.2 基地局におけるアンテナ数 1 および 2 の場合の RB 構成

SINR と RSRQ である [55, 72]. SINR はリファレンス信号 (RS, Reference Signal) の信号強度と干渉および熱雑音の比である. RSRQ は RS の品質を表す指標である. これらの指標は UE で獲得可能であるか, もしくは UE で獲得可能な RSRP, RSSI から計算可能である.

これらの指標により, 送信アンテナが 1 本の時の基地局負荷 u_k は以下で求められる.

$$u_k = \frac{1}{5} \left(\frac{1}{2q_k} - \frac{6}{s_k} - 1 \right). \quad (5.1)$$

ここで, q_k , s_k はそれぞれ RSRQ 値, SINR 値である.

図 5.2 で示した通り, 送信アンテナが 2 本の時は 1 本の時と RB の構成が異なるため, u_k の計算は式 5.1 と異なり, 以下となる.

$$u_k = \frac{1}{8} \left(\frac{1}{2q_k} - \frac{6}{s_k} - 2 \right). \quad (5.2)$$

5.3.2 利用可能帯域推定

本節では UE が取得可能な指標を用いて利用可能帯域を推定する手法を説明する. RB 利用率により, UE は基地局の混雑度を知ることができるが, 基地局との間でどれだけの通信速度で通信できるかを知ることができない. 利用可能帯域が推定できれば, オフピークデータ通信において, より効率的なデータ通信スケジューリングが可能である.

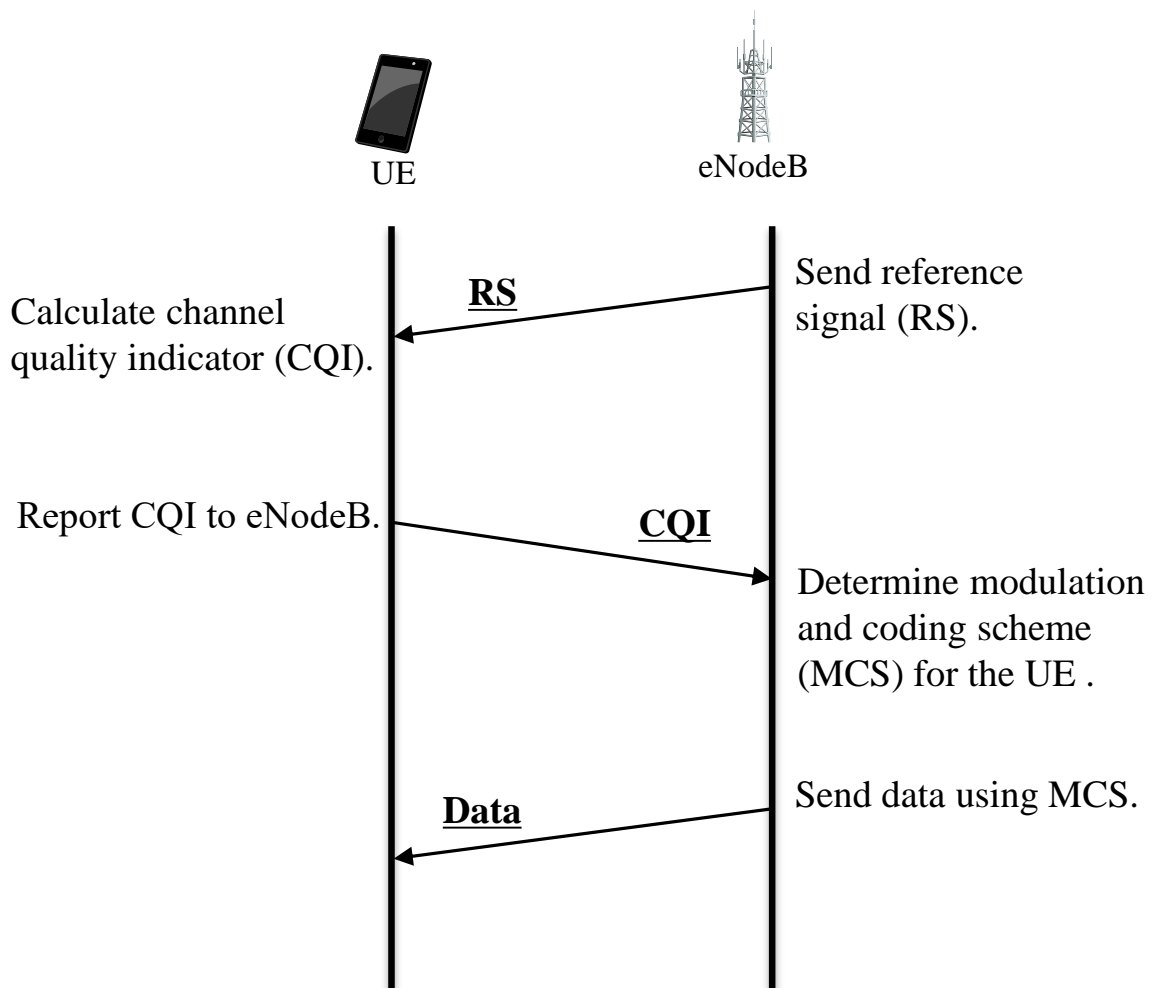


図 5.3 MCS 決定シーケンス

基本的に、利用可能帯域は、基地局の空き RB 数と UE と基地局間の変調方式によって推定することができる。基地局の空き RB 数は 1 タイムスロット (TTI, Transmission Time Interval) において、基地局がその UE に割り当てることができる RB 数である。変調方式は基地局が各 RB にどれだけのデータを詰め込めるかであり、UE と基地局間の電波品質によって決定される。

■空き RB 数推定 提案済みの RB 利用率推定手法により、基地局の RB 利用率の推定が可能である。空き RB 数は基地局の総 RB 数に RB 利用率を掛け合わせることで算出できる。1 TTI あたりの総 RB 数は LTE のシステム帯域によって決まっており [55], 表 4.1 に関係をまとめている。LTE システム帯域は UE で取得できない場合があるが, RSRQ, RSRP および RSSI を用いて総 RB 数は計算可能である。RSRQ q は, RSRP

値 p , RSSI 値 r および総 RB 数 b から, 次式で定義されている [53].

$$q = \frac{p}{r/b}, \quad (5.3)$$

式 (5.3) を変形して, b が計算できる.

$$b = \frac{rq}{p}, \quad (5.4)$$

空き RB 数 N_{rb} は, 総 RB 数 b と推定した RB 利用率 u_k から算出できる.

$$N_{\text{rb}} = u_k \cdot b \quad (5.5)$$

■UE – 基地局間の変調方式推定 次に基地局から UE への LTE ダウンリンクの変調方式を推定する.

各 RB で通信可能なデータ量は基地局が決定する変調方式によって決まり, 変調方式は基地局と UE 間の電波品質をもとに選択される.

電波品質が良い場合には, 基地局と UE 間でのビットエラー発生率が低いため, 基地局は 64 QAM (Quadrature Amplitude Modulation) といった高い通信速度を出せる効率的な変調方式を選択できる. 一方, 電波品質が悪い場合には, ビットエラー発生率が高いため, QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) といった通信速度を犠牲にして高いエラー耐性を持つ変調方式を選択する.

図 5.3 に基地局 (LTE の場合は eNodeB) がどのように変調方式を選択するかを示した. 基地局は UE に RS (Reference Signal) を定期的送信する. RS の状態から UE は CQI を算出する. CQI は UE と基地局間の電波品質の指標であり, 4 ビットの離散値をとる. CQI=1 が最も電波品質が悪く, CQI=15 が最も電波品質が良い. UE における CQI の計算は実装依存であるが, SINR と密接な関係があることが知られている [73, 74]. UE は CQI を含む情報を CSI (Channel State Information) として基地局にフィードバックする [75].

基地局は CQI を UE から受け取ると, UE へのダウンリンクの変調方式である MCS (modulation and coding scheme) を決定する. LTE では CQI により MCS を決定するガイドラインが決められているが, 実際の計算方法はベンダ依存である. 本提案で, LTE のガイドライン [55] より, CQI と MCS 間のマッピングテーブルを表 5.2 (CQI と MCS の関係) に作成した. 以降では, 本表を用いて議論および評価を進める.

MCS が決定されると, 基地局はその MCS を利用して各 RB で送信するデータを変調する. 1 TTI あたり, 基地局が各 UE に送信可能なデータ量 (TBS, total block size) は

表 5.2 CQI, MCS と TBS index の対応表

CQI index	MCS index	TBS index
1	0	0
2	0	0
3	2	2
4	4	4
5	6	6
6	8	8
7	11	10
8	13	12
9	15	14
10	18	16
11	20	18
12	22	20
13	24	22
14	26	24
15	28	26

MCS と、基地局がその UE に割り当てた RB 数によって決まる。3GPP では表 5.3 に示すように、MCS と TBS インデックスの関係が定義されている [55]。表 5.3 と表 5.2 で定義済みの CQI と MCS の関係により、CQI から MCS、MCS から TBS インデックスへの変換が可能である。これをまとめ、CQI から TBS インデックスへの変換のための表が表 5.2 である。CQI から変換できる TBS インデックスと、UE に割り当てられる RB 数から、UE に送信可能なデータ量 (TBS) が決まる (表 5.4)。3GPP の TBS の表は RB 数が 1 から 110 まで記載した大きい表であるため、ここでは、RB が 1 から 10 まで抽出している [55]。

以上により、各 UE において CQI および空き RB 数が計算できれば、基地局がその UE に対して送信可能なデータサイズおよび利用可能帯域が推定可能である。

■利用可能帯域推定の例 ここでは、例を用いて提案手法による利用可能帯域の推定手順を説明する。ここで示す例では、総 RB 数が 50、RB 利用率が 80% であるとした。そのため、UE では 10 個の RB が割り当て可能である。このとき、表 5.4 を用いて CQI= 3, 10, 15 の 3 通りの利用可能帯域を推定する。

表 5.3 MCS, TBS index の対応表

MCS index	TBS index	MCS index	TBS index
0	0	16	15
1	1	17	15
2	2	18	16
3	3	19	17
4	4	20	18
5	5	21	19
6	6	22	20
7	7	23	21
8	8	24	22
9	9	25	23
10	9	26	24
11	10	27	25
12	11	28	26/26A
13	12	29	reserved
14	13	30	reserved
15	14	31	reserved

Note. 本表は “3GPP TS 36.213 Rel.15, Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures,” Sept. 2018. からの転記である。

CQI = 3 CQI=3 は基地局と UE 間の電波状態がかなり悪い状態である。このとき、表 5.2 から、MCS と TBS インデックスはともに 2 をとる。TBS インデックスが 2, 割り当て可能な RB 数が 10 の時、表 5.4 から TBS は 424 ビットとなる。424 ビットを 1 TTI で送信可能であり、LTE では TTI が 1 ミリ秒であるため、利用可能帯域は 424kbps である。

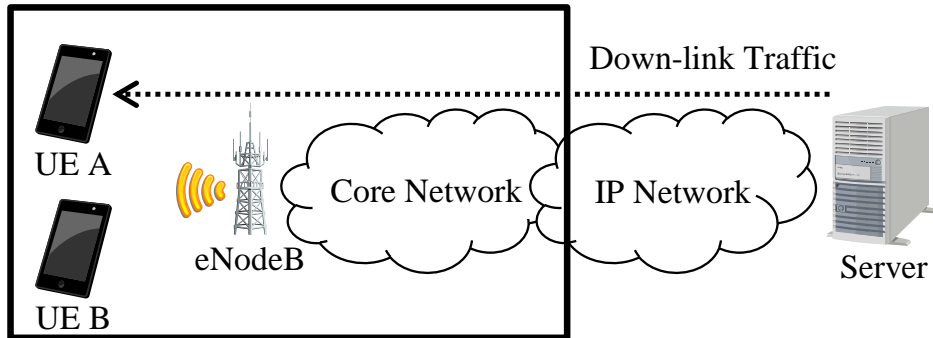
CQI = 10 CQI=10 のとき、表 5.2 から、MCS と TBS インデックスはそれぞれ 18 と 16 である。TBS インデックスが 16, 割り当て可能な RB 数が 10 の時、表 5.4 から TBS は 3240 ビットとなる。このデータ量を 1 TTI で送信するため、利用可能帯域は 3.24Mbps である。

CQI = 15 基地局と UE 間の電波品質が最良である CQI=15 のとき、表 5.2 から、MCS と TBS インデックスはそれぞれ 28 と 26 である。TBS インデックスが 26, 割り

表 5.4 TBS (nRB = 1, … 10)

TBS index	number of RBs (nRB)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	16	32	56	88	120	152	176	208	224	256
1	24	56	88	144	176	208	224	256	328	344
2	32	72	144	176	208	256	296	328	376	424
3	40	104	176	208	256	328	392	440	504	568
4	56	120	208	256	328	408	488	552	632	696
5	72	144	224	328	424	504	600	680	776	872
6	328	176	256	392	504	600	712	808	936	1032
7	104	224	328	472	584	712	840	968	1096	1224
8	120	256	392	536	680	808	968	1096	1256	1384
9	136	296	456	616	776	936	1096	1256	1416	1544
10	144	328	504	680	872	1032	1224	1384	1544	1736
11	176	376	584	776	1000	1192	1384	1608	1800	2024
12	208	440	680	904	1128	1352	1608	1800	2024	2280
13	224	488	744	1000	1256	1544	1800	2024	2280	2536
14	256	552	840	1128	1416	1736	1992	2280	2600	2856
15	280	600	904	1224	1544	1800	2152	2472	2728	3112
16	328	632	968	1288	1608	1928	2280	2600	2984	3240
17	336	696	1064	1416	1800	2152	2536	2856	3240	3624
18	376	776	1160	1544	1992	2344	2792	3112	3624	4008
19	408	840	1288	1736	2152	2600	2984	3496	3880	4264
20	440	904	1384	1864	2344	2792	3240	3752	4136	4584
21	488	1000	1480	1992	2472	2984	3496	4008	4584	4968
22	520	1064	1608	2152	2664	3240	3752	4264	4776	5352
23	552	1128	1736	2280	2856	3496	4008	4584	5160	5736
24	584	1192	1800	2408	2984	3624	4264	4968	5544	5992
25	616	1256	1864	2536	3112	3752	4392	5160	5736	6200
26	712	1480	2216	2984	3752	4392	5160	5992	6712	7480

注: 本表は “3GPP TS 36.213 Rel.15, Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures,” Sept. 2018. からの転記である。



Experimental LTE network

図 5.4 LTE 実験ネットワークを利用した評価システム構成

表 5.5 評価に利用した LTE 実験ネットワークの仕様

EPC	3GPP Rel. 11 準拠
eNodeB (基地局)	3GPP Rel. 11 準拠
Operation band	2.66GHz (band 7)
チャンネル帯域	10MHz
送信モード	TM 4 (closed-loop spatial multiplexing)
最大スループット	35 Mbit/s

当て可能な RB 数が 10 の時, 表 5.4 から TBS は 7480 ビットとなる. このデータ量を 1 TTI で送信するため, 利用可能帯域は 7.48Mbps である.

5.4 RB 利用率および利用帯域推定方式の評価

提案方式の有効性評価のための実験を行った. 評価では, LTE 実験ネットワークにおける RB 利用率推定精度の評価および商用 LTE ネットワークにおける利用可能帯域推定精度の評価を実施した.

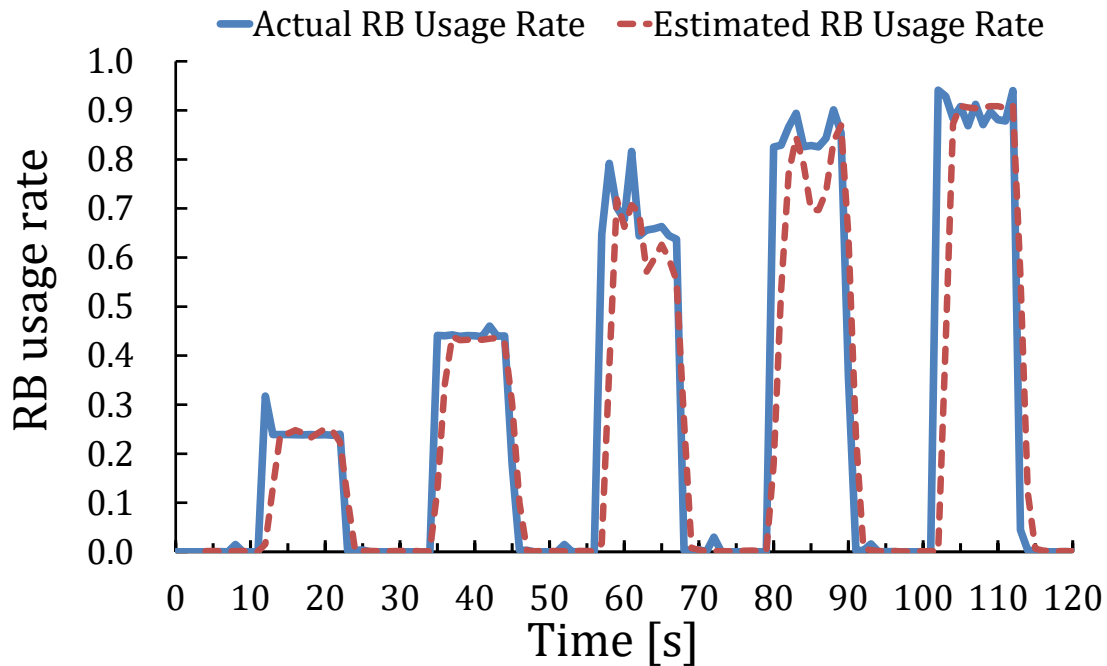


図 5.5 段階負荷評価における RB 利用率推定結果

5.4.1 LTE 実験ネットワークにおける RB 利用率推定の評価

実験環境設定

まず LTE 実験ネットワークにおける RB 利用率推定精度の評価を行った。図 5.4 に本実験の構成を示す。

試験に用いた LTE 実験ネットワークは 2 台の UE (UE A, UE B) と基地局およびコアネットワーク (EPC, Evolved Packet Core) から構成される。LTE 実験ネットワークの仕様を表 5.5 に示す。LTE 実験ネットワークは実験用のため、電波が実験設備の外に出ないようにシールドされている。そのため、実験環境では実験用の 2 台の UE しか基地局に接続されていない。また、LTE ネットワークに負荷をかけるためにサーバを用意し、LTE 実験ネットワークに直接接続した。

実験では、UE A がサーバと通信し、LTE ネットワークに負荷をかける。UE A の通信量を変化させることで、LTE ネットワークへの負荷の量を変化させる。LTE ネットワークへの負荷を変化させながら、UE B で RB 利用率を推定する。実験に利用した UE は UE A, UE B とも Android 4.2 を搭載した Sony Xperia である。二台の UE は、内蔵の無線デバイスから、Qualcomm 社が提供するインタフェースを用いて、10 ミリ秒ご

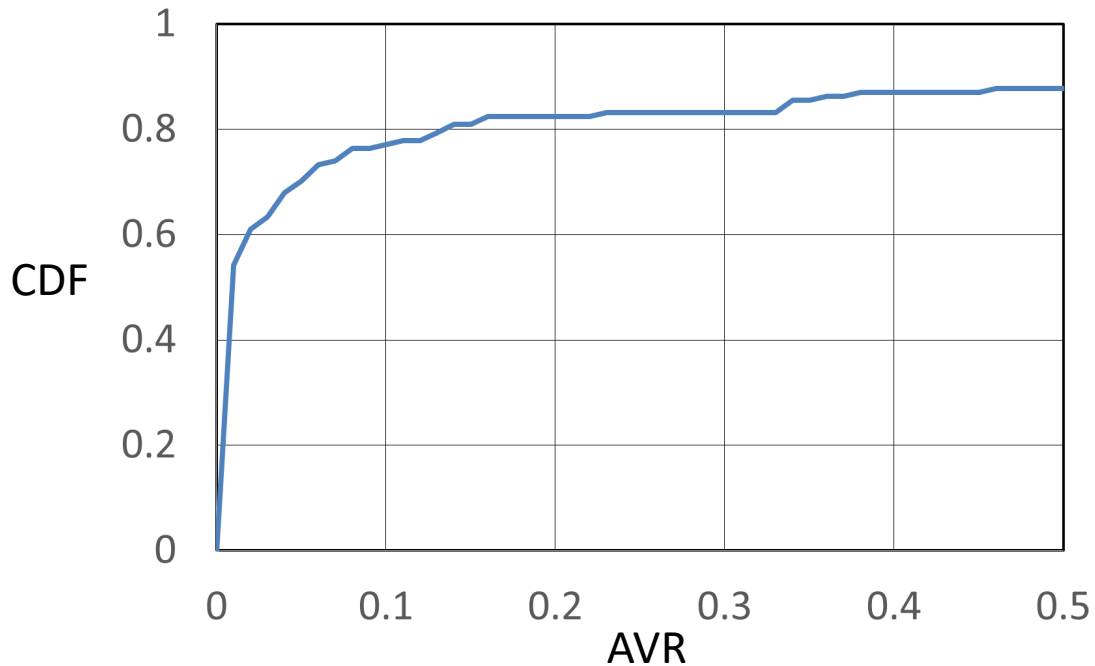


図 5.6 段階負荷評価における RB 利用率推定結果の AVR の累積分布関数

とに無線情報を入手できるように設定されている。本インタフェースは Qualcomm 社の Qualcomm eXtensible Diagnostic Monitor (QxDM) と互換性がある [76]。サーバ OS は Ubuntu 14.04 であり, iperf を使って UE A と UDP (User Datagram Protocol) 通信を行う。

実験では, サーバから UE A に UDP パケットを送信することで, 2 パターンの負荷を与えた。一つは段階的に負荷を増加させるパターン (以下, 段階負荷評価), もう一つはランダムに負荷を変化させるパターン (以下, ランダム負荷評価) である。

段階負荷評価では, サーバが UE A に UDP パケットを 10 秒間送信し, その後, 10 秒間送信を停止する。10 秒間の停止後, 再度 10 秒間パケットを送信する。パケット送信レートは, 送信再開ごとに 7 Mbit/s 増加し, 最初の送信の 7 Mbit/s から 35 Mbit/s まで上昇する。これは, 20% から 100% の基地局利用率に相当する。このとき, UE B では RSRQ, SINR を計測し RB 利用率を推定する。

ランダム負荷評価では, サーバは毎秒 8.75 Mbit/s から 26.25 Mbit/s の間でランダムに UDP の送信レートを変える。これは, 毎秒 25% から 75% の間で基地局利用率が変化することに相当する。

基地局に与える負荷を RB 利用率の正解値とし, 推定した RB 利用率の精度を三つの指標で評価した。相関係数 r , 平均絶対誤差 (MAE, Mean Absolute Error) と残差 (AVR,

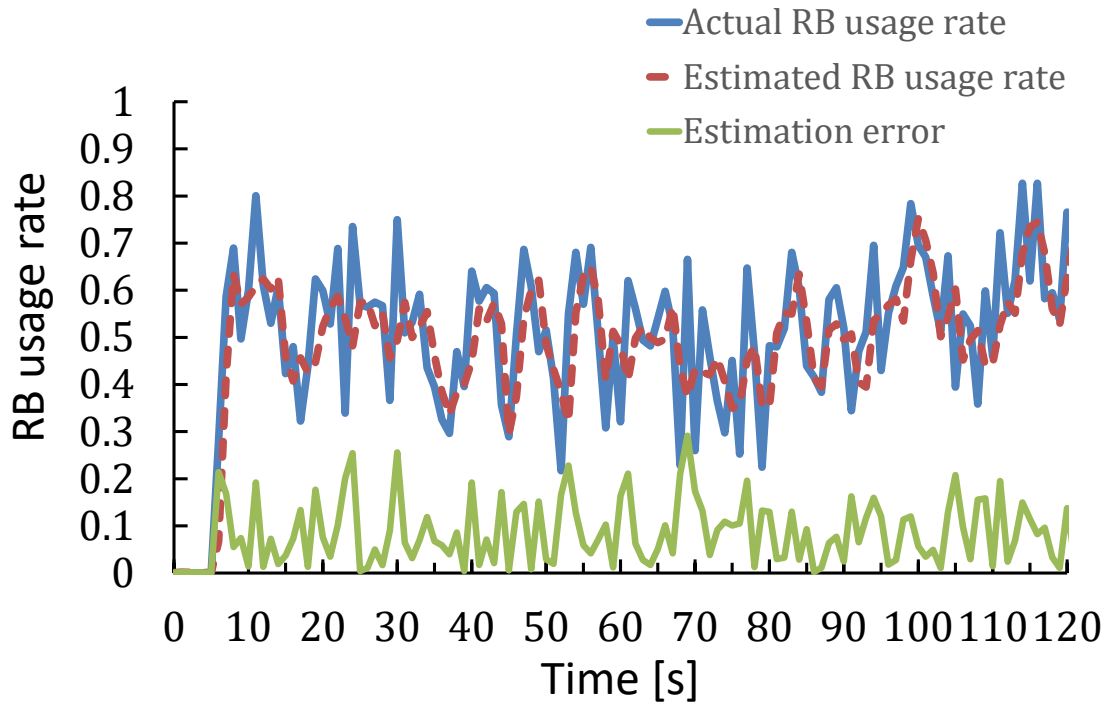


図 5.7 ランダム負荷評価における RB 利用率推定結果

absolute value of residuals) である。

相関係数 r は二つの変数間の関係の強さを示す指標であり、 x_i と y_i ($i = 1, 2, \dots, N$) の相関係数 r は、以下で定義される。

$$r = \frac{s_{xy}}{s_x s_y} \quad (5.6)$$

$$= \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (5.7)$$

ここで、 s_{xy} 、 s_x 、 s_y はそれぞれ、 x と y の共分散、 x の標準偏差と y の標準偏差である。

MAE は予測誤差の絶対値の平均値であり、予測精度の評価の中で、予測のずれの大きさを評価する指標となる。MAE は、次のように定義される。

$$\text{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - \hat{x}_i|, \quad (5.8)$$

ここで、 x_i 、 \hat{x}_i はそれぞれ正解値と予測値である。

AVR は予測誤差の絶対値と正解値の比であり、次のように定義される。

$$\text{AVR}_i = \frac{|x_i - \hat{x}_i|}{x_i}, \quad (5.9)$$

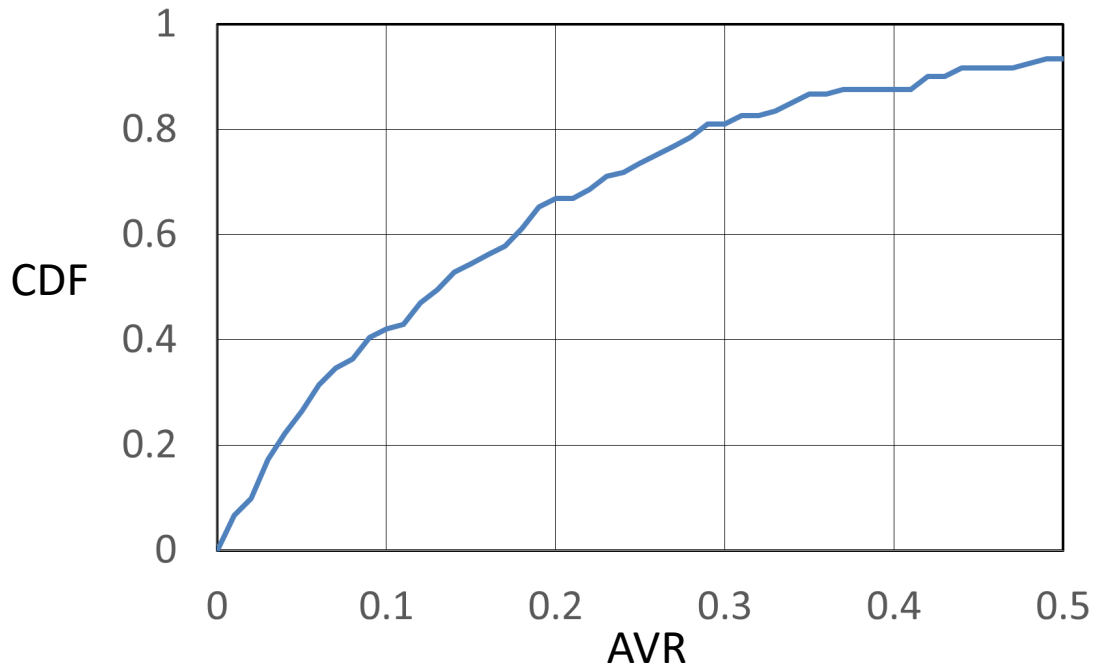


図 5.8 ランダム負荷評価における RB 利用率推定結果の AVR の累積分布関数

ここで、 x_i 、 \hat{x}_i はそれぞれ正解値と予測値である。AVR は予測したサンプルごとに得られるため、一連の予測結果の AVR の平均値が MAPE (Mean Absolute Percentage Error) である。MAE の値は正解値の絶対値に依存しているが、MAPE は正解値で正規化した値であるといえる。なお、以下の評価ではゼロ除算を避けるため、 x_i と \hat{x}_i の最小値を 0.01 に制限して AVR を計算した。

段階負荷評価における RB 利用率推定の評価

段階負荷評価における RB 利用率推定結果の時間変化を図 5.5 に示す。本図で表記した“actual”とは、LTE 実験ネットワークの基地局で測定した正解値，“estimated”とは UE B で推定した推定値を示している。また、これらの推定値は 1 秒ごとに算出している。この表が示す通り、RB 利用率推定結果は UDP 送信レートに追従していることがわかり、相関係数 r は 0.898、MAE は 0.058 となった。図 5.6 は AVR の累積分布関数 (CDF) である。推定結果の 80% 以上で AVR が 0.1 以下 (推定精度 90% 以上) となっており、高い精度で RB 利用率が推定できていることがわかる。また、本評価の MAPE は 0.779 であった。

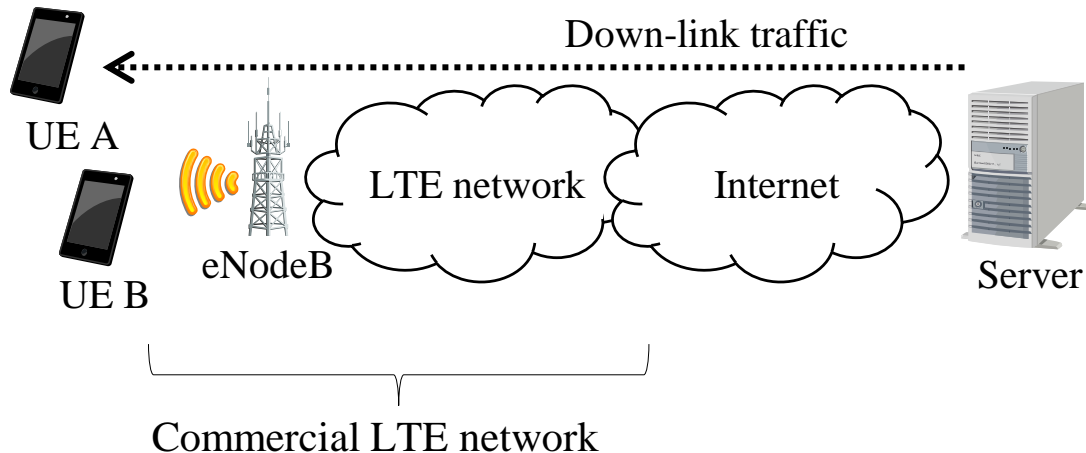


図 5.9 商用 LTE ネットワークを用いた評価システム構成

ランダム負荷評価における RB 利用率推定の評価

ランダム負荷評価における RB 利用率推定結果の時間変化を図 5.7 に示す。本評価でも RB 利用率推定は UDP 送信レートに追従していることがわかり、相関係数 r は 0.861, MAE は 0.085 であった。図 5.8 は本評価の AVR の CDF である。推定結果の 80% 以上で AVR が 0.3 以下 (推定精度 70% 以上) となっている。本評価の MAPE は 0.181 であった。

RB 利用率推定結果

これらの評価結果から、UE は RSRQ と SINR から基地局の RB 利用率を精度良く推定できている。しかし、段階的な負荷変化の評価において、80% の評価結果において AVR が 0.1 以下であったにも関わらず、MAPE がランダム負荷変化の評価より大きくなっている。これは、段階的な負荷変化の評価では 10 秒ごとに UDP の送信を停止しており、RB 利用率がほぼ 0 になっていることが原因である。RB 利用率が 0 に近い場合、MAPE が大きく算出されているためであると考えられる。

5.4.2 商用 LTE ネットワークにおける利用可能帯域推定の評価

評価環境設定

次に商用 LTE ネットワークを用いて利用可能帯域推定の精度を評価した。評価環境を図 5.9 に示す。

本評価でも UE A がサーバと通信することで LTE ネットワークに負荷を与える。LTE

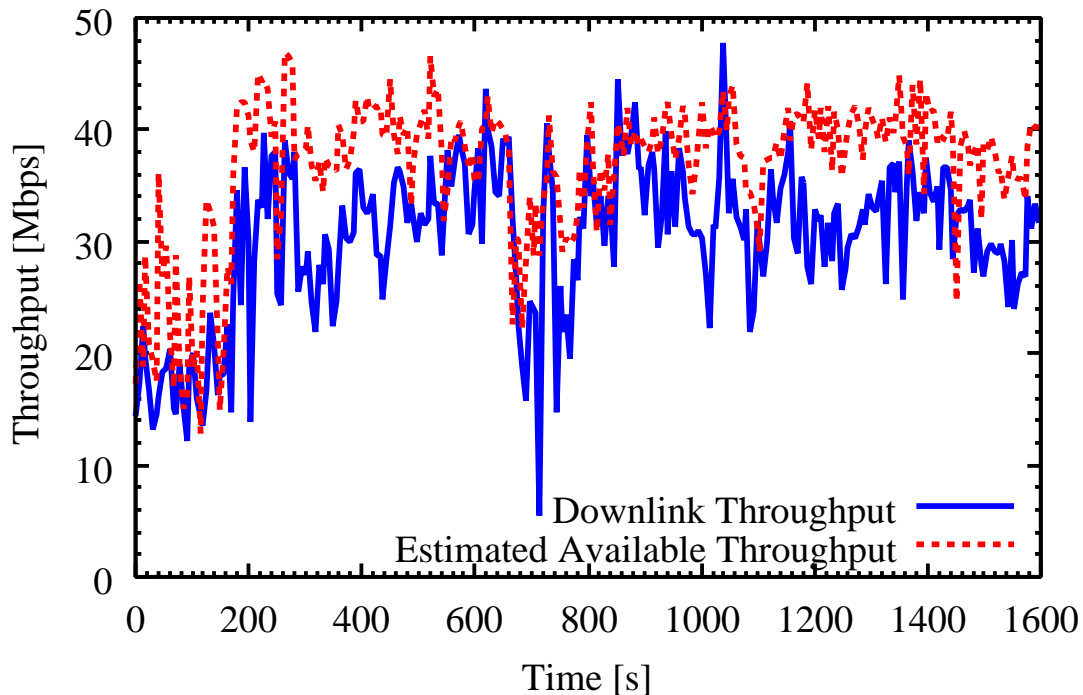


図 5.10 利用可能帯域推定精度

ネットワークの負荷を変化させながら UE B で基地局の RB 利用率および UE B と基地局間の利用可能帯域を推定する。UE B では 3 秒ごとに利用可能帯域を推定した。

利用した LTE ネットワークのシステム帯域は 10 MHz, 総 RB 数は 50 である。UE A, UE B とも同じ基地局に送信アンテナ数 2 で接続されている。両 UE は Android 4.2.2 を搭載した Samsung Galaxy S4 であり, Qualcomm 社提供の API を使って 10 ミリ秒ごとに電波品質指標を取得できるように設定されている。サーバはインターネット上に配置した。LTE 実験環境で評価したサーバと同一であり, OS は Ubuntu 14.04, iperf で UDP パケットを送信し, LTE に負荷を与える。

本実験は商用 LTE ネットワークを利用しているため, 正確な利用可能帯域は測定できない。このため, 以下の方法で LTE ダウンロード速度を計測し, これを利用可能帯域の正解値とした。

- UE B で利用可能帯域を推定する。
- 利用可能帯域の推定後, サーバから UE B に対して 1 秒間 50 Mbit/s の UDP データを送信する。
- UE B が 1 秒間で受信できたデータ量を測定し, これを利用可能帯域の正解値とする。

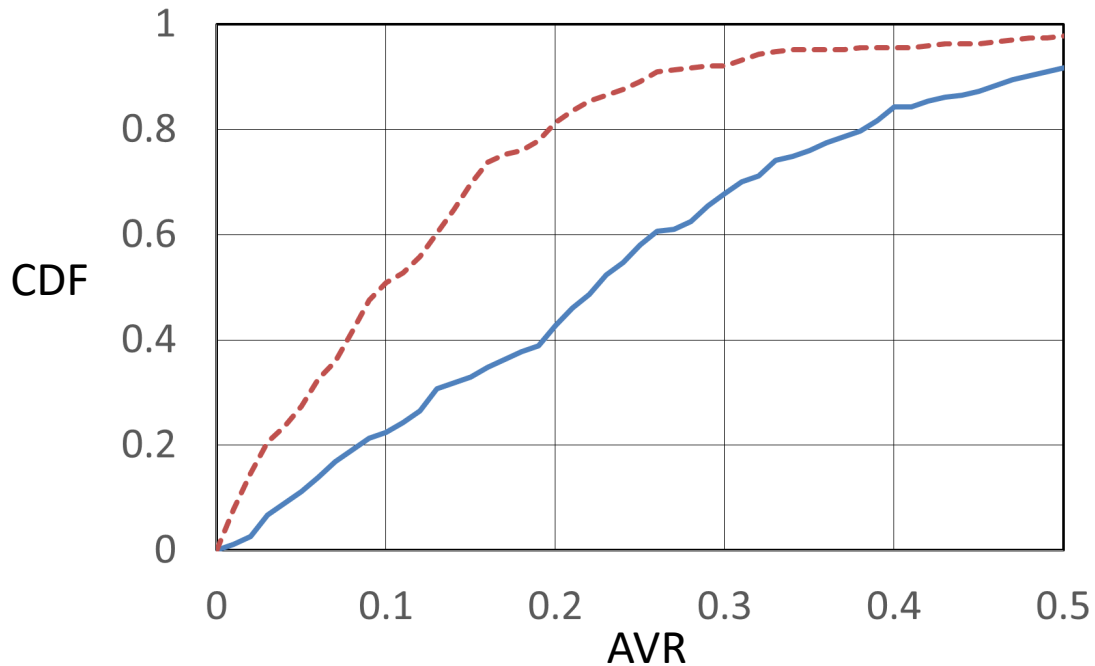


図 5.11 利用可能帯域推定結果の AVR の累積分布関数

ここでは、UE が利用可能帯域を推定しているタイミングと推定後のタイミングでは利用可能帯域は変わらないと想定している。この違いの考慮については今後の課題である。

評価結果

評価結果を図 5.10 に示す。“Downlink Throughput” は UE B で測定した利用可能帯域の正解値，“Estimated Available Throughput” は提案手法で推定した利用可能帯域である。両者の相関係数 r は 0.719，MAE は 6.97 であった。図 5.10 から、全体的に推定結果が正解値に比較して大きな値となっている。このため、推定値に 0.82 をかけた場合、MAE は 3.70 まで改善した。利用可能帯域推定結果が大きくなった理由は、正解値として UDP 送信レートを計測する際のヘッダやデータ再送のオーバーヘッドであると考えられるが、詳細な原因は今後の研究課題である。

図 5.11 は利用可能帯域推定の AVR の CDF である。実線が利用可能帯域推定結果の CDF，破線が利用可能帯域推定に 0.82 をかけた場合の CDF である。それぞれの MAPE は 0.273 と 0.143 となった。この図から、提案した利用可能帯域推定の AVR は 80% 以上で 0.4 以下 (精度 60% 以上) であり、0.82 をかけることで、80% 以上で 0.2 以下 (精度 80% 以上) にまで上げることが可能であることがわかる。

さらに利用可能帯域が 20 Mbit/s より高い場合 (高スループット時) と低い場合 (低ス

ループット時) について、特性の違いを評価した。両者とも推定結果を 0.82 倍したときの推定誤差を評価している。高スループット時と低スループット時の MAPE はそれぞれ 0.109, 0.417 であった。高スループット時のほうが低スループット時より推定精度が高いといえ、低スループット時の精度向上が今後の課題である。

5.5 オフピークデータ通信への適用

利用可能帯域をパッシブかつ高精度に推定することで、オフピークデータ通信が実現可能である。基地局負荷が高いピーク時に流れる非リアルタイム通信をオフピーク時にシフトすることで、非リアルタイム通信を利用しているユーザの体感品質を劣化させず、リアルタイム通信ユーザの体感品質を向上することができる。

以前の研究で、東京エリアの 4 か所で RB 利用率を測定し、通信が混雑している場所や時間でも、数十秒おきにオフピークが発生していることが分かっている [54]。この報告では RB 利用率を用いていたが、本研究で提案した利用可能帯域推定を用いると基地局の空きリソースをより効率よく使うことが期待できる。

UE への実装

本節では、オフピークデータ通信アプリケーションの UE への実相について議論する。

オフピークでデータ通信アプリケーションは、Android や iOS といった商用で入手可能な OS でもカスタマイズした OS でも利用することも可能である。また、ユーザアプリケーションでも、デーモンソフトウェアとしても動作が可能である。実装の容易さ、普及の容易さを考えると、商用で入手可能な OS 上のアプリケーションとして実装することが適切である。しかしながら、通常の OS では RB 利用率推定および利用可能帯域推定に課題がある。今回評価に用いた UE は電波品質指標を 10 ミリ秒ごとに取得できるように設定されており、市販されている通常の UE はこのような設定がされていない。

Yue らは、このような設定がされた UE と通常の Android との電波品質指標取得頻度、精度の違いについて報告している [56]。我々も同様の違いを観測しており、通常の OS では電波品質指標取得頻度が低く、電波状態が変化したときにしか取得できない。浮動小数点型で取得できていた電波品質指標値も整数型でしか取得できず、十分な精度で取得できず、推定精度が低くなる傾向にある。

本研究では、UE が取得できる電波品質指標により基地局負荷の推定および利用可能帯域推定の可能性を示唆することができた。今後、UE の進化により、より高頻度かつ高精

度に電波品質指標が取得できるようになれば，オフピークデータ通信も容易に実現可能になるといえる。

5.6 本章のまとめ

本章では，パッシブに UE と基地局間の利用可能帯域を推定する手法について提案し，有効性の評価を行った．評価は LTE の実験ネットワークおよび商用ネットワークの両者で行い，UE でパッシブに測定した RSRQ, SINR, CQI を使って利用可能帯域を高精度に推定できていることを示した．利用可能帯域の推定結果と正解として利用した利用可能帯域との相関係数は 0.7 を超えていた．

さらに，利用可能帯域推定を用いて，UE が自律的に非リアルタイムトラフィックのダウンロードタイミングを自律的にシフトすることで，基地局のピーク負荷を軽減するオフピークデータ通信システムについて議論した．オフピークデータ通信システムは利用者および通信オペレータの両方に有益である．

より大きなモバイルデータ通信需要に対応するため，現在 5G の導入が進んでいる．5G でも基地局の RB 構成や通信方式は同様の考え方が導入されており，本手法はより高速な通信方式にも対応可能である．5G の導入が進む一方，2023 年末でも全モバイルユーザの 90% は LTE/4G を利用していると報告されている [77]．今後も本方式により，基地局のピーク負荷を軽減し，ユーザの QoE を向上することが望まれる．

第6章

結論

6.1 研究のまとめ

急速に進化、普及するモバイルネットワークは、社会の様々な分野で利用されている。モバイルデータのトラフィック量は2017年から2022年までに7倍増加すると見込まれている。このようなモバイル通信のトレンドに対し、通信キャリアは基地局の増加、新たな無線周波数帯の導入、5Gなどの高速通信方式により対応を試みている。しかし、モバイル通信はトラフィック量が増加するだけでなく、アプリケーションの多様化も進んでいる。電話による音声通信、テキストメッセージが主体であったモバイル通信は、現在では、ビデオ、オーディオ、WebやSNS、ソフトウェアダウンロードなど、様々なアプリケーションで利用されている。このようなトラフィック傾向に対し、基地局の増加等の対応だけでは、アプリケーション通信の品質を確保するのは容易ではない。

本論文では、モバイルネットワークのアプリケーション通信品質を確保、向上するため、アプリケーション品質の向上を妨げる原因を下記であると仮定した。

1. 通信キャリアを流れるトラフィックのうち、インターネット上のクラウドサービスのトラフィックが増加していること
2. 多様なアプリケーショントラフィックが混在していること
3. トラフィック量の変動により、通信のために十分な無線リソースを確保できないこと

これらの課題が生じる原因が、モバイルネットワークのアクセスネットワークの通信制御であることを示した。アクセスネットワークは有限な電波資源を複数のUEで共有するため、UEの混雑によりボトルネックになりやすいからである。これに対し、本論文で

は、コアネットワーク、基地局、UE で統合して通信制御を行うことで、アプリケーション品質を確保するモバイルネットワークアーキテクチャおよび通信制御方式を提案し、評価を行った。

2 章では、それぞれの原因に対し、既存の研究の取り組みと既存研究の課題を紹介し、本研究のアプローチを説明した。

3 章では、インターネットではトランスポートプロトコルとして TCP が主に用いられるが、モバイルネットワークでは TCP 性能が充分に出ないことを明らかにした。これに対し、インターネットとモバイルネットワークの境界となる通信キャリアのコアネットワーク内に中継サーバを配備し、中継サーバにおいてモバイルネットワークに最適な TCP 制御を行うアーキテクチャを提案した。また、中継サーバと基地局と連携する TCP アルゴリズムを提案し、モバイルネットワークの変動に追従して高い通信スループットと短い RTT を両立することを示した。これにより、TCP を用いるインターネットアプリケーションの性能を向上することができる。

モバイルネットワーク、特にモバイルネットワークの基地局ではアプリケーションを区別せず、もしくは登録されたアプリケーションのみで無線リソースの割り当てを行っているが、4 章で、様々なアプリケーションごとの特性に基づいた基地局のスケジューリング方式を提案した。特にビデオストリーミングと Web 閲覧のユーザが混在している場面を想定し、基地局が UE に無線リソースを割り当てるスケジューリングプロセスにおいて、ビデオストリーミングと Web 閲覧の割り当て優先度を決定する。ユーザは体感品質 (QoE) が一定以上であると通信に満足するが、それ以下になると通信状況に不満を感じるユーザが増加するため、QoE を一定以上となり満足するユーザ数 (許容端末数) を増やすことを目的とし、ビデオ視聴と Web 閲覧の QoE に基づいたスケジューリング方式を提案した。端末が移動する環境を想定したシミュレーションにより、提案方式は従来方式と比較して、Web 閲覧端末の平均 QoE を最大 1.48 ポイント向上できること、ビデオ視聴端末と Web 閲覧端末の許容端末数を最大 2.1 倍増加させることができることを示した。

5 章では、基地局に通信トラフィックが集中することで、基地局から UE への通信に十分な無線リソースが割り当てられない、という課題に対し、リアルタイム性が求められない非リアルタイムトラフィック (ダウンロードトラフィックなど) を、基地局が混雑するピーク負荷の時間を避けて、空きリソースが出るまで遅延させるオフピークデータ通信システムを提案した。オフピークデータ通信を実現するために、UE において、パッシブに UE と基地局間の利用可能帯域を推定する手法について提案した。LTE の実験ネットワークおよび商用ネットワークの両方で提案方式の評価を行い、UE でパッシブに測定した RSRQ, SINR, CQI を使って利用可能帯域を高精度に推定できていることを示した。

利用可能帯域推定を用いて、UE が自律的に非リアルタイムトラフィックのダウンロードタイミングを自律的にシフトすることで、リアルタイム通信の通信品質を劣化させずに基地局のピーク負荷を軽減することができる。

以上の研究により、モバイルネットワークのアプリケーション通信品質を向上し、今後通信キャリアのモバイルネットワークへの投資効果を向上することが期待できる。

より大容量のモバイル通信を収容するため、5G の導入が進んでいる。5G でも基地局の RB 構成や通信方式は同様の考え方が導入されており、提案した手法はより高速な通信方式にも対応可能であると考えられる。5G の導入が進む一方、2023 年末でも全モバイルユーザの 90% は LTE/4G を利用していると報告されている。今後も、提案手法により、モバイル通信に対するユーザの体感品質を向上し、かつ通信インフラの投資効果を向上することが望まれる。

6.2 今後の課題

本論文により、モバイルネットワークのアプリケーション品質向上が期待できるが、今後モバイルネットワークへの実装やさらなる性能向上のために、次のような課題が残っている。

3 章で提案したモバイルネットワークにおける TCP 性能の向上方式では、5G などのより高速な通信方式が導入された場合の効果を検証していく必要がある。また、今回評価に用いた LTE 実験ネットワークで測定できなかった、電波強度の変動やハンドオーバーの影響など、モバイルネットワークの環境変化での評価により、効果を検証していく必要がある。さらに、基地局と中継サーバとの連携について、通信間隔と基地局の処理負荷、網負荷について調査を進め、最適な連携方式、制御方式について検討が必要である。

4 章で提案したアプリケーション QoE に基づいた基地局スケジューリング方式では、ビデオと Web が混在した環境における評価を行ったが、他のアプリケーション、特に IoT アプリケーションの品質について考慮していく必要がある。また、それらの混在や混在割合が変化した場合のトラフィック分布に応じたスケジューリングパラメータの最適化の研究が望まれる。基地局におけるアプリケーションの分類も重要な課題である。機械学習を用いたアプリケーション分類の研究も進んでおり、このような成果を取り込んだ場合の基地局の処理負荷なども検討課題である。

5 章で提案したオフピークデータ通信システムのための利用可能帯域推定方式では、UE で利用可能な無線品質情報の精度向上とそれによる推定精度向上が課題である。提案したオフピークデータ通信システムは UE へのソフトウェア導入のみで実現可能であるため、

ソフトウェアの普及活動も重要である。これに加え、基地局サイドのオフピークデータ通信アーキテクチャも検討に値すると思う。

謝辞

本論文をまとめるにあたり，名古屋大学 大学院情報学研究科 村瀬 勉教授，高田 広章教授，片桐 孝洋教授，京都大学 大学院情報学研究科 新熊 亮一准教授には丁寧な指導と励ましを承りました。厚く御礼申し上げます。

本論文の研究は名古屋大学 大学院情報学研究科 情報システム学専攻において，多数の方のご指導，ご協力により行われました。特に大学院博士後期課程入学から今日に至るまで親身にご指導いただきました名古屋大学 大学院情報学研究科の村瀬 勉教授には心から感謝いたします。村瀬 勉教授に大学院博士後期課程への進学を勧めていただかなければ，本論文として研究成果をまとめ，研究者として一步前に進むこともありませんでした。

日頃より，研究生活についてのご支援や研究についての議論をしていただきました名古屋大学 大学院情報学研究科 情報システム学専攻の村瀬・嶋田研究室の皆様には厚く御礼申し上げます。若い研究者の皆様の研究への熱意により，日常業務に埋没することなく，研究に対する情熱を失わずにいられました。

また，本研究を行う機会を与えてくださった日本電気株式会社中村 祐一主席技術主幹，津村 聡一所長，仙田 修司所長代理に厚く御礼申し上げます。大学院博士課程への進学を後押ししていただき，大学院での研究生活を温かく見守っていただきました。

忙しい業務の中，日頃から研究についての議論をしていただきました日本電気株式会社システムプラットフォーム研究所の野上 耕介氏，高橋 英士氏，鈴木 敬之氏，大須賀 徹氏，城島 貴弘氏，井上 高道氏，信清 貴宏氏，大西 健夫氏，太田 大輔氏，小林 航生氏に感謝いたします。

最後に，会社の業務と大学院での研究生活の両立にあたり，生活面，精神面で支えてくれた妻 幸子，息子 眞柊，娘 つばさに，心から感謝します。

参考文献

- [1] Cisco Systems Inc., “Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2017–2022,” Feb. 2019.
- [2] Ericsson, “Eriscon Mobility Report,” June 2019.
- [3] インターネットイニシアティブ, “Internet Infrastructure Review,” Sept. 2017.
- [4] ITU-T Y.1901, “Requirements for the support of IPTV services,” Jan. 2009.
- [5] GSMA IR.92, “IMS Profile for Voice and SMS,” April 2015.
- [6] B. Wang, J. Kurose, P. Shenoy, and D. Towsley, “Multimedia Streaming via TCP: An Analytic Performance Study,” Proceedings of the 12th annual ACM international conference on Multimedia, pp.908–915, MULTIMEDIA '04, Oct. 2004.
- [7] K. Satoda, H. Yoshida, H. Ito, and K. Ozawa, “Adaptive video pacing method based on the prediction of stochastic TCP throughput,” 2012 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), pp.1944–1950, Dec. 2012.
- [8] K. Satoda, K. Nihei, and H. Yoshida, “Quality evaluation of voice over multiple TCP connections,” 2014 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC), pp.141–146, Feb. 2014.
- [9] 3GPP, “TS 23.203, Policy and charging control architecture,” Sept. 2018.
- [10] C. Shi, K. Joshi, R.K. Panta, M.H. Ammar, and E.W. Zegura, “CoAST: Collaborative Application-Aware Scheduling of Last-Mile Cellular Traffic,” Proceedings of the 12th Annual International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services, pp.245–258, MobiSys '14, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2014. <https://doi.org/10.1145/2594368.2594385>
- [11] N. Cardwell, Y. Cheng, C.S. Gunn, S.H. Yeganeh, and V. Jacobson, “BBR: Congestion-Based Congestion Control,” Queue, vol.14, no.5, pp.50:20–50:53, Oct.

2016. <http://doi.acm.org/10.1145/3012426.3022184>
- [12] K. Liu and J.Y.B. Lee, “Mobile accelerator: A new approach to improve TCP performance in mobile data networks,” 2011 7th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference, pp.2174–2180, July 2011.
 - [13] L. Li, K. Xu, D. Wang, C. Peng, K. Zheng, R. Mijumbi, and Q. Xiao, “A Longitudinal Measurement Study of TCP Performance and Behavior in 3G/4G Networks Over High Speed Rails,” *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol.25, no.4, pp.2195–2208, Aug. 2017.
 - [14] U. Toseef, C. Goerg, T. Weerawardane, and A. Timm-Giel, “Performance comparison of PDCP buffer management schemes in LTE system,” 2011 IFIP Wireless Days (WD), pp.1–3, Oct. 2011.
 - [15] R. Kumar, A. Francini, S. Panwar, and S. Sharma, “Dynamic control of RLC buffer size for latency minimization in mobile RAN,” 2018 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), pp.1–6, April 2018.
 - [16] N. Shojaedin, M. Ghaderi, and A. Sridharan, “TCP-aware scheduling in LTE networks,” *Proceeding of IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks 2014*, pp.1–9, June 2014.
 - [17] J. Gettys and K. Nichols, “Bufferbloat: Dark Buffers in the Internet,” *Queue*, vol.9, no.11, pp.40:40–40:54, Nov. 2011.
 - [18] B.H. Kim and D. Calin, “On the Split-TCP Performance over Real 4G LTE and 3G Wireless Networks,” *IEEE Communications Magazine*, vol.55, no.4, pp.124–131, April 2017.
 - [19] M.R. Kanagarathinam, S. Singh, I. Sandeep, A. Roy, and N. Saxena, “D-TCP: Dynamic TCP congestion control algorithm for next generation mobile networks,” 2018 15th IEEE Annual Consumer Communications Networking Conference (CCNC), pp.1–6, Jan. 2018.
 - [20] W.K. Leong, Z. Wang, and B. Leong, “TCP Congestion Control Beyond Bandwidth-Delay Product for Mobile Cellular Networks,” *Proceedings of the 13th International Conference on Emerging Networking EXperiments and Technologies*, pp.167–179, CoNEXT ’17, ACM, New York, NY, USA, 2017. <http://doi.acm.org/10.1145/3143361.3143378>
 - [21] Z. Chen, Y. Liu, Y. Duan, H. Liu, G. Li, Y. Chen, J. Sun, and X. Zhang, “A novel bandwidth estimation algorithm of TCP westwood in typical LTE scenarios,”

- 2015 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC), pp.1–5, Nov. 2015.
- [22] H. Jiang, Y. Wang, K. Lee, and I. Rhee, “Tackling Bufferbloat in 3G/4G Networks,” Proceedings of the 2012 Internet Measurement Conference, pp.329–342, IMC ’12, ACM, New York, NY, USA, 2012. <http://doi.acm.org/10.1145/2398776.2398810>
- [23] X. Zhu, R. Zheng, D. Yang, H. Liu, and J. Hou, “Radio-Aware TCP Optimization in Mobile Network,” 2017 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), pp.1–5, March 2017.
- [24] B. Jin, S. Kim, D. Yun, H. Lee, W. Kim, and Y. Yi, “Aggregating LTE and Wi-Fi: Toward Intra-Cell Fairness and High TCP Performance,” IEEE Transactions on Wireless Communications, vol.16, no.10, pp.6295–6308, Oct. 2017.
- [25] C. Lee, S. Song, H. Cho, G. Lim, and J. Chung, “Optimal Multipath TCP Offloading over 5G NR and LTE Networks,” IEEE Wireless Communications Letters, pp.1–1, 2018.
- [26] F. Capozzi, G. Piro, L.A. Grieco, G. Boggia, and P. Camarda, “Downlink Packet Scheduling in LTE Cellular Networks: Key Design Issues and a Survey,” IEEE Communications Surveys Tutorials, vol.15, no.2, pp.678–700, Second 2013.
- [27] F. Asadollahi and R. Dehdasht-Heydari, “Introduction of a Novel Hybrid Weighted Exponential Logarithm-Maximum Throughput (HWEL-MT) Scheduler for QoS Improvement of LTE/4G Cellular Networks,” Wireless Personal Communications, vol.98, no.1, pp.91–104, Jan. 2018. <https://doi.org/10.1007/s11277-017-4857-0>
- [28] L.A. Vasquez-Toledo and D. Lara-Rodriguez, “Teletraffic Analysis of OFDMA Cellular Systems With Persistent VoIP Users and Maximum SIR Scheduling Based on Order Statistics,” IEEE Access, vol.6, pp.25517–25531, 2018.
- [29] M.R. Tabany, C.G. Guy, and R.S. Sherratt, “A novel downlink semi-persistent packet scheduling scheme for VoLTE traffic over heterogeneous wireless networks,” EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, vol.2017, no.1, p.62, April 2017. <https://doi.org/10.1186/s13638-017-0846-y>
- [30] C. Lee and S. Chu, “A fairness aware and resource reuse algorithm for LTE layered video multicast service,” 2017 Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA ASC), pp.918–925,

Dec. 2017.

- [31] C. Ramesh and P.R. Kumar, “A novel MAC scheduling algorithm for TCP throughput improvement in LTE system,” 2018 15th IEEE Annual Consumer Communications Networking Conference (CCNC), pp.1–4, Jan. 2018.
- [32] N.D. Adesh and A. Renuka, “Impact of traffic burst on the behavior of TCP variants for different LTE downlink schedulers,” 2017 3rd International Conference on Applied and Theoretical Computing and Communication Technology (iCATccT), pp.18–23, Dec. 2017.
- [33] S.Q. Jabbar, D.J. Kadhim, and Y. Li, “Developing a Video Buffer Framework for Video Streaming in Cellular Networks,” *Wireless Communications and Mobile Computing*, p.13, 2018.
- [34] F. Rodrigues, I. Sousa, M.P. Queluz, and A. Rodrigues, “QoE-Aware Scheduling Algorithm for Adaptive HTTP Video Delivery in Wireless Networks,” *Wireless Communications and Mobile Computing*, p.16, 2018.
- [35] S.Y. Yoon, S. Lee, Y. Kim, P. Lee, C. Oh, I. Youn, E. Monroy, Z. Hasany, and J. Choi, “Mobile data service QoE analytics and optimization,” 2015 IEEE International Conference on Communication Workshop (ICCW), pp.1699–1704, June 2015.
- [36] B. Heder, P. Szilagyi, and C. Vulkan, “Dynamic and adaptive QoE management for OTT application sessions in LTE,” 2016 IEEE 27th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), pp.1–6, Sep. 2016.
- [37] 小長谷真也, 三好 匠, 江口真人, “B-11-1 ネットワーク環境の違いによるユーザ体感品質の分析 (b-11. コミュニケーションクオリティ),” *電子情報通信学会総合大会講演論文集*, vol.2013, no.2, p.420, mar 2013. <https://ci.nii.ac.jp/naid/110009761344/>
- [38] P. Casas, R. Schatz, F. Wamser, M. Seufert, and R. Irmer, “Exploring QoE in Cellular Networks: How Much Bandwidth Do You Need for Popular Smartphone Apps?,” *Proceedings of the 5th Workshop on All Things Cellular: Operations, Applications and Challenges*, pp.13–18, AllThingsCellular ’15, ACM, New York, NY, USA, 2015. <http://doi.acm.org/10.1145/2785971.2785978>
- [39] 西川由明, 高橋英士, 里田浩三, “許容遅延を満たす web アクセス数の最大化 (コミュニケーションクオリティ),” *電子情報通信学会技術研究報告*, vol.116, no.497, pp.13–17, mar 2017. <https://ci.nii.ac.jp/naid/40021161093/>

- [40] T. Kitahara, Y. Hiehata, H. Koto, N. Fukumoto, H. Nakamura, and S. Ano, “Autonomous Data Transmission Using Off-Peak Hours for Cellular-Based M2M Communications,” 2013 IEEE 37th Annual Computer Software and Applications Conference, pp.167–168, July 2013.
- [41] N. Sato, T. Oshiba, K. Nogami, A. Sawabe, and K. Satoda, “Experimental comparison of machine learning-based available bandwidth estimation methods over operational LTE networks,” 2017 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC), pp.339–346, July 2017.
- [42] C. Dovrolis, P. Ramanathan, and D. Moore, “Packet-dispersion techniques and a capacity-estimation methodology,” *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol.12, no.6, pp.963–977, Dec. 2004.
- [43] Ningning Hu and P. Steenkiste, “Evaluation and characterization of available bandwidth probing techniques,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol.21, no.6, pp.879–894, Aug. 2003.
- [44] M. Jain and C. Dovrolis, “End-to-End Available Bandwidth: Measurement Methodology, Dynamics, and Relation with TCP Throughput,” *Proceedings of the 2002 Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications*, pp.295–308, SIGCOMM ’02, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2002. <https://doi.org/10.1145/633025.633054>
- [45] J. Strauss, D. Katabi, and F. Kaashoek, “A measurement study of available bandwidth estimation tools,” *Proceedings of the 3rd ACM SIGCOMM Conference on Internet Measurement*, pp.39–44, IMC ’03, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2003. <https://doi.org/10.1145/948205.948211>
- [46] K. Lakshminarayanan, V.N. Padmanabhan, and J. Padhye, “Bandwidth Estimation in Broadband Access Networks,” *Proceedings of the 4th ACM SIGCOMM Conference on Internet Measurement*, pp.314–321, IMC ’04, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2004. <https://doi.org/10.1145/1028788.1028832>
- [47] Mingzhe Li, M. Claypool, and R. Kinicki, “WBest: A bandwidth estimation tool for IEEE 802.11 wireless networks,” 2008 33rd IEEE Conference on Local Computer Networks (LCN), pp.374–381, Oct. 2008.
- [48] A. Chakraborty, V. Navda, V.N. Padmanabhan, and R. Ramjee, “Coordinating

- Cellular Background Transfers Using Loadsense,” Proceedings of the 19th Annual International Conference on Mobile Computing & Networking, pp.63–74, MobiCom ’ 13, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2013. <https://doi.org/10.1145/2500423.2500447>
- [49] J. Cainey, B. Gill, S. Johnston, J. Robinson, and S. Westwood, “Modelling download throughput of LTE networks,” 39th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks Workshops, pp.623–628, Sep. 2014.
- [50] F. Pervez, M. Jaber, J. Qadir, S. Younis, and M.A. Imran, “Fuzzy Q-learning-based user-centric backhaul-aware user cell association scheme,” 2017 13th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), pp.1840–1845, June 2017.
- [51] G. Aceto, F. Palumbo, V. Persico, and A. Pescape, “Available Bandwidth vs. Achievable Throughput Measurements in 4G Mobile Networks,” 2018 14th International Conference on Network and Service Management (CNSM), pp.125–133, Nov. 2018.
- [52] A.V. Iordache and I. Marghescu, “LTE downlink performance,” 2012 10th International Symposium on Electronics and Telecommunications, pp.179–182, Nov. 2012.
- [53] E. Takahashi, T. Onishi, T. Shiroshima, and H. Sugahara, “A passive method for estimating overall LTE cell traffic load by using radio quality information of a user terminal,” 2015 21st Asia-Pacific Conference on Communications (APCC), pp.17–20, Oct. 2015.
- [54] E. Takahashi, T. Suzuki, T. Onishi, and K. Satoda, “Autonomous off-peak data transfer by passively estimating overall LTE cell load,” 2017 14th IEEE Annual Consumer Communications Networking Conference (CCNC), pp.754–759, Jan. 2017.
- [55] 3GPP, “3GPP TS 36.213 Rel.15, Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures,” Sept. 2018.
- [56] C. Yue, R. Jin, K. Suh, Y. Qin, B. Wang, and W. Wei, “LinkForecast: Cellular Link Bandwidth Prediction in LTE Networks,” IEEE Transactions on Mobile Computing, vol.17, no.7, pp.1582–1594, July 2018.
- [57] D. Raca, A.H. Zahran, C.J. Sreenan, R.K. Sinha, E. Halepovic, R. Jana, and V. Gopalakrishnan, “Back to the Future: Throughput Prediction For Cellular Net-

- works Using Radio KPIs,” Proceedings of the 4th ACM Workshop on Hot Topics in Wireless, pp.37–41, HotWireless ’ 17, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2017. <https://doi.org/10.1145/3127882.3127892>
- [58] D. Raca, A.H. Zahran, C.J. Sreenan, R.K. Sinha, E. Halepovic, R. Jana, V. Gopalakrishnan, B. Bathula, and M. Varvello, “Empowering Video Players in Cellular: Throughput Prediction from Radio Network Measurements,” Proceedings of the 10th ACM Multimedia Systems Conference, pp.201–212, MM-Sys ’ 19, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2019. <https://doi.org/10.1145/3304109.3306233>
- [59] R. Falkenberg, K. Heimann, and C. Wietfeld, “Discover Your Competition in LTE: Client-Based Passive Data Rate Prediction by Machine Learning,” GLOBECOM 2017 - 2017 IEEE Global Communications Conference, pp.1–7, Dec. 2017.
- [60] G. Nikolov, M. Kuhn, and B. Wenning, “UE-Based Estimation of Available Uplink Data Rates in Cellular Networks,” 2018 14th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob), pp.169–174, Oct. 2018.
- [61] S. Tuffin, “5G and the evolving Web platform: The new incentives for sharing some knowledge,” May 2018.
- [62] 関口克己他, “透過型 Proxy 方式の実装と評価,” 信学技法 MoMuC2001-122, pp.99–105, March 2001.
- [63] ITU-T, “P.1203: Parametric bitstream-based quality assessment of progressive download and adaptive audiovisual streaming services over reliable transport,” Oct. 2017.
- [64] ITU-T, “G.1030: Estimating end-to-end performance in IP networks for data applications,” Feb. 2014.
- [65] ITU-T, “G.1031: QoE factors in web-browsing,” Feb. 2014.
- [66] I. Sodagar, “The MPEG-DASH Standard for Multimedia Streaming Over the Internet,” IEEE MultiMedia, vol.18, no.4, pp.62–67, April 2011.
- [67] Sandvine, “The Global Internet Phenomena Report,” Oct. 2018.
- [68] 新熊亮一, 岩井孝法, 里田浩三, “5G 研究のための IoT トラヒックモデル,” 電子情報通信学会論文誌 B, vol.J101-B, no.5, pp.310–319, May 2018.
- [69] A. Sawabe, T. Iwai, and K. Satoda, “Identification of Smartphone Applications by Encrypted Traffic Analysis,” 2019 16th IEEE Annual Consumer Communica-

- tions Networking Conference (CCNC), pp.1–2, Jan. 2019.
- [70] J. Ding, Y. Li, and D. Jin, “Characterizing the phenomenon of traffic tide for large-scale mobile cellular data networks,” 2015 IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS), pp.45–46, April 2015.
- [71] RIPE Network Coordination Center, “Internet Traffic During the 2012 Olympics”.
- [72] 3GPP, “3GPP TS 36.214 Rel.15, Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer; Measurements,” Sept. 2018.
- [73] M. Kawser, N. Imtiaz Bin Hamid, M. Hasan, M. Alam, and M. Rahman, “Down-link SNR to CQI Mapping for Different Multiple Antenna Techniques in LTE,” International Journal of Information and Electronics Engineering, vol.2, pp.756–760, 09 2012.
- [74] S.N. Donthi and N.B. Mehta, “An Accurate Model for EESM and its Application to Analysis of CQI Feedback Schemes and Scheduling in LTE,” IEEE Transactions on Wireless Communications, vol.10, no.10, pp.3436–3448, Oct. 2011.
- [75] I. Siaud and A.-M. Ulmer-Moll, “Green-oriented multi-techno link adaptation metrics for 5G heterogeneous networks,” EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, vol.2016, pp.1–13, Dec. 2016.
- [76] Qualcomm, “Qualcomm eXtensible Diagnostic Monitor (QXDM professional)”.
- [77] Ericsson, “Ericsson Mobility Report,” Nov. 2017.

研究業績一覧

主論文に関する研究業績

学術雑誌論文

- [1] 里田浩三, 大須賀徹, 野上耕介, 城島貴弘, 井上高道, 信清貴宏, 村瀬勉, “TCP 中継機における基地局連携によるモバイル網の TCP 高速化,” 電子情報通信学会論文誌 B, vol.J102-B, no.6, pp.473–484, June 2019.
- [2] 里田浩三, 野上耕介, 鈴木敬之, 高橋英士, 村瀬勉, “アプリケーション QoE に基づいた基地局スケジューリング方式の提案,” 電子情報通信学会論文誌 B, Vol.J103-B, No.9, pp.391–406, Sep. 2020.
- [3] Kozo Satoda, Eiji Takahashi, Takeo Onishi, Takayuki Suzuki, Daisuke Ohta, Kosei Koayashi, and Tutomu Murase, “Passive method for estimating available throughput for autonomous off-peak data transfer,” *Hindawi Wireless Communications and Mobile Computing*, 2020

その他の研究業績

- [1] Koichi Nihei, Hiroshi Yoshida, Natsuki Kai, Kozo Satoda, and Keiichi Chono, “Adaptive Bitrate Control of Scalable Video for Live Video Streaming on Best-Effort Network”, *IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, 2018, pp.1–7, Dec. 2018.
- [2] Natsuki Sato, Takashi Oshiba, Kosuke Nogami, Anan Sawabe, and Kozo Satoda, “Experimental comparison of machine learning-based available bandwidth estimation methods over operational LTE networks,” *2017 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*, pp.339–346, July

2017.

- [3] Anan Sawabe, Takanori Iwai and Kozo Satoda, “Identification of Smartphone Applications by Encrypted Traffic Analysis,” IEEE Annual Consumer Communications Networking Conference, 2019, pp.1–2. Jan. 2019.
- [4] Eiji Takahashi, Takayuki Suzuki, Takeo. Onishi, and Kozo Satoda, “Autonomous off-peak data transfer by passively estimating overall LTE cell load,” IEEE Annual Consumer Communications Networking Conference (CCNC), pp.754–759, Jan. 2017.