

# 複数無線通信サービスへのユーザ端末割当て手法に関する ns-3 を用いた有効性検証

山片優一<sup>†1</sup> 篠宮紀彦<sup>†1,a)</sup>

**概要:** 人々が混雑している環境では、公衆無線 Wi-Fi スポットが用意されているにもかかわらず、依然としてユーザが体感する応答速度が低下している場面が見られる。これを改善するために本研究では、ユーザが使用しているアプリケーションに必要とされる RTT と、実際に得られている RTT のギャップを考慮し、携帯電話回線と Wi-Fi 回線へ自動的に端末を割当てする手法を提案してきた。これまでは、端末の割当てアルゴリズムにのみ焦点を当て、その有効性に関する評価を行ってきた。今回、システム構成の一形態を提案し、システム全体の振る舞いを考慮するため、ns-3 を用いてシミュレーションを行った。シミュレーション結果に基づき、本論文ではユーザ端末のモビリティに着目し、ランダムに端末が動くのではなく、実際の人の動きに沿うように動かした場合や、携帯電話回線と Wi-Fi 回線の多元接続方式の違いを考慮することにより、提案システムによるユーザ全体の満足度向上に関する有効性を示している。

## 1. はじめに

LTE 回線が徐々に普及し、回線速度は向上しているがスマートフォンの普及とともに、端末で使用されるデータ通信量も増加しているため、今後、人が集中する場所や時間帯などの条件により、ユーザが体感するレスポンスタイムは長くなる可能性がある。これを回避するために、各キャリアは、3G 回線や LTE 回線などの携帯電話回線基地局から、固定回線である公衆無線 Wi-Fi 基地局（以下、Wi-Fi 基地局）へのオフロード対応を行っている。現在は、Wi-Fi 基地局への接続切り替えがスムーズにいかないなどの理由で、十分に活用されていない場合もあるが、今後も Wi-Fi 基地局の利用率は高まると考えられる。しかし、Wi-Fi 基地局の利用率が高まると、Wi-Fi 基地局の通信量増大によるレスポンスタイムの悪化が起こる可能性がある。

あるエリアにおいて、ユーザが利用できる無線通信サービスの基地局数、スループット、ラウンドトリップタイム（以下、RTT）などの条件が変わらない場合、対象エリアにいるユーザ全体のレスポンスタイムの悪化を防ぐには、各端末で使用されているアプリケーションの要求を必要最低限満たすことのできる基地局に接続させることが望ましい。例えば、RTT が短い基地局に対して、短い RTT を必要としない端末が接続されることにより、本来短い RTT を必要とする端末が条件を満たす基地局に接続できない、という状況が起こり得る。このように、接続過剰な資源割当てや、資源不足などのミスマッチを解消することが、対象エリアにいるユーザ全体の満足度を向上させることに繋がると考えられる。

この解決法として従来研究[1]では、アプリケーションによって、必要とされる RTT が異なることに着目し、端末で使用しているアプリケーションを基に算出した必要 RTT と、ある基地局に接続した場合に得られる実際の RTT との差を最小とするような基地局と端末の割当て方法を提案し

ている。

本研究ではこの手法に対して、より実環境に近いシステム構成を提案し、その中において各基地局における端末収容数の違いや RTT を理論値ではなく実測値として取得する。さらにユーザ端末のモビリティを考慮するため、ns-3 を用いたシミュレーションによって評価実験を行い、結果の有効性を検討する。

## 2. ユーザ端末割当てに関する従来研究

複数の無線通信サービスが混在している環境において、ユーザ端末を効率的に割当てする手法については、以前から行われてきた。

文献[2]では Wi-Fi 基地局における RTT の悪化について通信品質が劣化した状態におけるアプリケーションレベルでの通信遅延低減方式を提案している。しかし、このような方式による技術が進展することと同時に、アプリケーションが必要とするデータ通信量が増大し、結果としてレスポンスタイムが悪化しているという状態がこれまで繰り返されてきた。したがって本研究では、通信インフラへの設備投資や新たな技術の開発ではなく、LTE 基地局および Wi-Fi 基地局へユーザ端末を効率的に割当てすることでレスポンスタイムの悪化を防ぐシステムを提案する。

## 3. 提案システム

### 3.1 提案システムの概要

提案システムでは、各端末が必要とする RTT と、ある基地局に接続した場合に得られる RTT との差の総和を最小とした状態を最適とみなす。図 1 では、①まず各基地局における RTT を PathQuick [3] とよばれるシステムを用いて推定算出し、コントロールサーバへ送信する。②次に新規参入端末が現れたとき、得られた RTT からその端末における最適な接続先を割当て問題として解くことでコントロールサーバにて計算し、端末へ制御情報として送信する。

<sup>†1</sup> 創価大学 工学研究科  
〒192-8577 東京都八王子市丹木町 1-236

Soka University Graduate School of Engineering.  
a) shinomi@soka.ac.jp

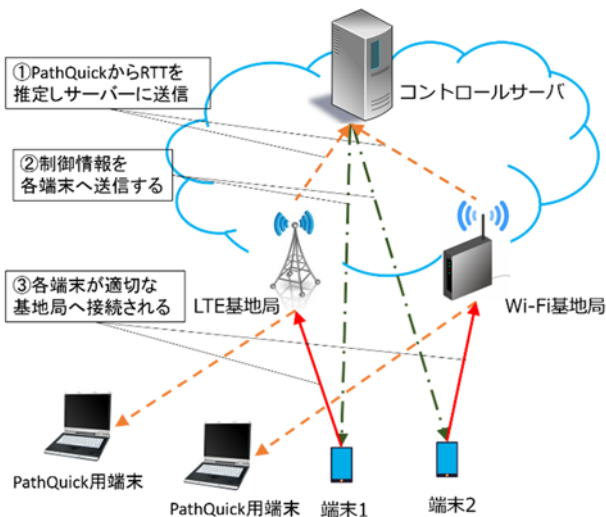


図 1 従来研究における提案システムの構成図

③最後に制御情報を受け取った新規参入端末は、その割当てられた接続先へ適宜切り替える。

このシステムでは、既存の各基地局そのものに手を加えることなく実装できることがメリットである。また各端末と基地局との割当てを、推定された RTT を基に最適化することによって、各ユーザがレスポンスタイム向上を実感できると予想される。

また、図 1 では RTT を計測する端末とユーザ端末は別のものであるが、システム構成を考えるにあたって、実際に各基地局一つひとつに対して計測用端末を用意することは困難であるため、ユーザが使用している端末へ導入するアプリケーションに対して計測用端末の機能を付加することとした。このことについて、端末アプリケーションとサーバで行う機能の構成図をまとめたものを図 2 に示す。

### 3.2 端末アプリケーション

図 2 中の端末アプリケーションの内容を述べる。このアプリケーションはバックグラウンドで動作する。

まず 2 章で述べたとおり、定期的に RTT を計測するため、PathQuick システムを組み込む。そして、計測した値を逐次コントロールサーバへ送信する。また、その端末が接続できる基地局すべてに対して RTT を計測する。この情報と紐付けて、Wi-Fi 基地局であればその SSID と BSSID の情報をサーバへ送信する。

さらに、各 Wi-Fi 基地局に対して端末側で得られる電波強度を計測し、その情報をサーバへ送信する。これは、ある一定の電波強度以下にある基地局は、仮に RTT が良い値になったとしても、スループット値が良くならないからである。サーバ側では、この値を基にある一定の電波強度以下にある基地局を、割当て対象から除外する処理を行う。

また、ユーザ端末で使用されているアプリケーションの種類を、フォアグラウンドにあるアプリケーションを判断

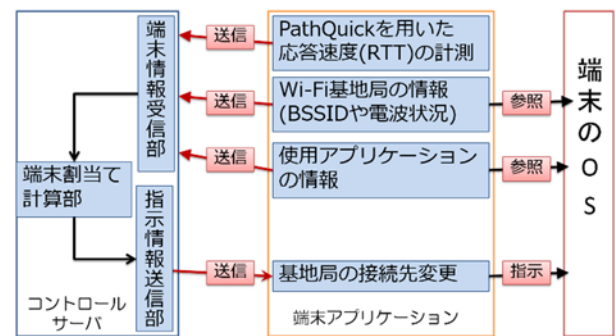


図 2 提案システムの機能構成図

することで行う。提案システムでは、大きく分けて通話アプリケーション、ブラウザ、その他の 3 種類に絞った。これについては後述する。

次に、サーバから受信した情報に沿って、接続先の基地局を変更する。このとき、ユーザの通信を遮断することを避けるために、通信中かどうかを通信が行われていないアイドル時間を基に判断して基地局の変更を行う。

### 3.3 ユーザ端末割当てシステム

コントロールサーバ内で行われる、ユーザ端末を基地局に割当てるシステムについては、従来研究で提案されているとおり、端末で使用しているアプリケーションが必要とする RTT (必要 RTT) と実際の基地局に接続したときに得られる RTT (接続 RTT) によるギャップ (RTT ギャップ) の総和を最小とする、基地局と端末の割当て問題として捉え、ハンガリアン法を用いて解くシステムである。

必要 RTT については 3.2 節で述べたとおり、(1)通話アプリケーション、(2)ブラウザ、(3)その他、の 3 種類とした。

(1)通話アプリケーションについては、総務省が「050 IP 電話」の遅延の基準を「400ms 未満」と定めている[4]。この値は、対象端末から相手端末までの到達時間の基準であるため、端末からアクセス回線までの間で必要な RTT は半分の 200ms 程度と考えることができる。

(2)ブラウザについて、主なポータルサイトのトップページのデータ量を表 1 に示す。多くのサイトのトップページが 1,500kB 以下であるため、ここでは 1,500kB のサイトに接続した場合について考える。また、Forrester Consulting の報告によると、約半数のユーザが 2 秒以下のレスポンスタイムを期待している[5]。このとき、TCP におけるウィンドウサイズが 64kB の場合、1,500kB のサイトを 2,000ms で表示させるために必要な RTT は式 1 より、約 85ms と算出できる。

$$\frac{64\text{kB}}{1,500\text{kB} \times \frac{1}{2,000\text{ms}}} \approx 85\text{ms} \quad (1)$$

以上のことから、各アプリケーションにおいて必要な RTT を表 2 のように定義する。

表 1 ポータルサイトにおけるトップページのデータ量

サイト名	URL	データ量(kB)
Yahoo!	m.yahoo.co.jp	467
goo	www.goo.ne.jp	730
MSN	jp.msn.com	580
Infoseek	www.infoseek.co.jp	1,390
Excite	a.excite.co.jp	1,463
はてな	www.hatena.ne.jp	1,480
ライブドア	www.livedoor.com/lite	573
価格 com	s.kakaku.com	817
amazon	www.amazon.co.jp	608
朝日新聞	www.asahi.com	1,073
読売新聞	www.yomiuri.co.jp	1,004
日経新聞	www.nikkei.com	1,147
毎日新聞	sp.mainichi.jp	3,337
産経新聞	sankei.jp.msn.com/smp	656

表 2 アプリケーションが必要とする RTT

アプリケーションの種類	必要 RTT
通話アプリケーション	200ms
ブラウザ	85ms
その他	制限なし

## 4. ns-3 を用いた提案システムの実装

### 4.1 従来研究の問題点と改善点

従来研究では、コントロールサーバ内におけるアルゴリズムの有効性について検証してきた。しかし、端末アプリケーションにおけるシミュレーションや、実際的な環境において提案システムの有効性の検討はされていなかった。そこで本研究では、実際のシステム全体を含んだ状態でシミュレーションする。具体的には(1)ユーザ端末のモビリティ、(2)Wi-Fi 基地局と LTE 基地局の違い、(3)接続時 RTT のシミュレーション、という問題点があり、これらについて改善した上で実験を行う。

(1)ユーザ端末のモビリティについて、従来研究ではあるエリアにおけるユーザ端末がランダムに出入りする事象をシミュレーションしていたが、より現実に近い想定として、人々が混雑したエリアの中である一定の法則を持って動く場合を想定する。

(2)Wi-Fi 基地局と LTE 基地局の違いについて、本研究では接続できる収容数の差について着目する。一般に、Wi-Fi 基地局は LTE 基地局に比べて狭い範囲をカバーするため、収容数は少なくなる。また多元接続方式について、LTE では OFDMA(直交周波数分割多元接続)方式が用いられるのに対して、Wi-Fi では CSMA/CA 方式が用いられているため、接続台数が多くなるほど Wi-Fi 基地局では通信効率

低下する。したがって、Wi-Fi 基地局の方が LTE 基地局より収容数を小さくしてシミュレーションを行う必要がある。

(3)本システムでは、RTT ギャップの計算のため接続時 RTT を求める必要があったが、従来のシミュレーションでは CSMA/CA の仕様上端末数が増加すると待機時間が増加するため、端末数の増減による接続時 RTT の変化は 1 次関数であるとの考えで行っていた。しかしこれは理論的な推定であるため、本研究では端末に導入したアプリケーションから RTT を計測し、その実測値に基づいて評価を行う。またこのとき、より現実的な RTT が計測できるようユーザが使用しているアプリケーション種別に応じてネットワーク内に通信を発生させることとした。

### 4.2 ns-3 による開発

4.1 節で述べた改善点を検証するためのシミュレータとして、本研究では ns-3[6]を用いた。これは様々な研究や開発などの目的で広く使われており、今回の実験では ns-3 上でモビリティを扱えることや、独自のアプリケーションを実装することが可能な点を考慮し、利用した。

図 3 では ns-3 上で実装したプログラムのうちアプリケーション層に組み込むシステムのクラス群を示している。図 2 の機能構成図では、AppClient クラスは端末アプリケーションに相当し、AppServer クラスはコントロールサーバに相当する。端末アプリケーションでは CountRTT クラスを用いて RTT を計測している。このとき本システムでは PathQuick を用いる設計であるが、実装の都合上 Ping によって計測した平均値を用いている。また、コントロールサーバでは端末割当て計算部として APselection クラスが使われている。

ここでは ns-3 の仕様上、シミュレーション実行中に接続中の基地局を切り替えることは複雑な実装を必要とするため、本研究では簡易的に実装した。つまり、端末へ送信する切り替え指示情報をファイルへ書き出し、この内容に応じて端末を割当て、再度 RTT を計測することで検証を行った。これにより図 2 中の端末アプリケーション内にある「基地局の接続先変更」を模擬的に実装した。

また本プログラムでは、図 2 中の端末アプリケーションにある「Wi-Fi 基地局の情報」は実装していない。これは配置する Wi-Fi 基地局の情報は既に取得済みと仮定して実験を行っており、また端末側で認識できる電波強度の低い基地局を取り除く工程を省いているからである。以上の開発を踏まえて、評価実験を行った。

## 5. 評価実験

### 5.1 実験で用いたトポロジとパラメータ

本実験では、提案システムを実際のネットワーク機器に導入したとき、どのような振る舞いをするかを調べるため、以下のような構成や条件を設定した。

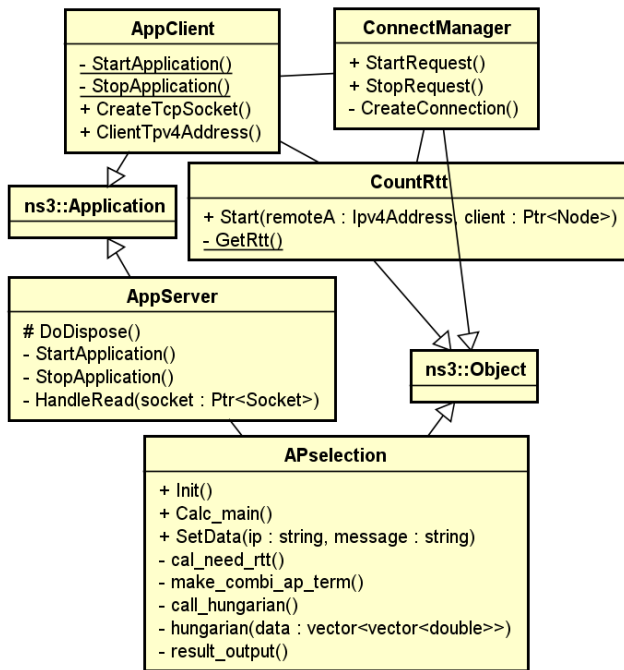


図 3 ns-3 上のアプリケーションにおけるクラス図

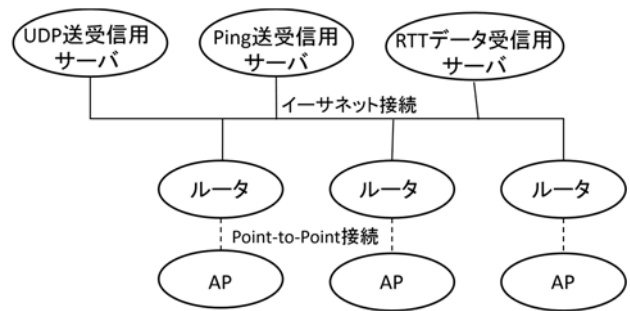


図 4 実験で用いたトポロジ

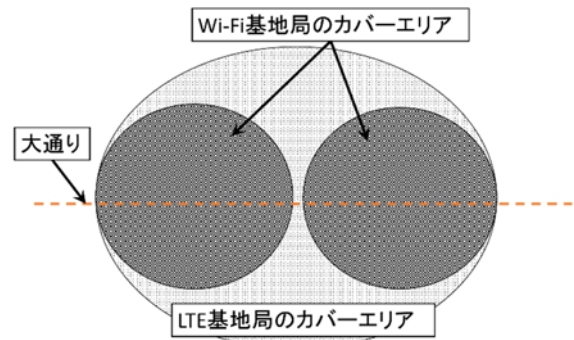


図 5 実験を行ったエリア設計

図 4 は実験で構成したトポロジで、アクセスポイント (AP) が 3 台のときの場合である。ここでは図 2 におけるコントローラサーバのうち端末が Ping を用いて RTT を計測する際のアクセス先サーバと得られた RTT を送信する場合の接続先サーバを分けている。また一部のユーザが通話アプリケーションを利用している状態を模擬するため、ユーザ端末と定期的に UDP パケットを送受信するためのサーバを用意した。さらに、各 AP とルータは専用リンクである Point-to-Point (P2P) 接続でそれぞれつなぎ、各ルータとサーバはイーサネットにて接続されていると設計した。

一方、図 5 では各 AP とユーザ端末の配置について示している。人が集まり混雑しているエリアを想定した。LTE 基地局が全体をカバーし、Wi-Fi 基地局は、それよりも小さい範囲で局所的なエリアをカバーしている。また中央に大通りがあると仮定し、この大通りに沿って端末を持った人が動く。

実験を行った各ケースの条件を表 3 に示す。今回の実験では、どの基地局にも接続できない端末が発生しないよう、エリア内に存在する端末数が、全ての基地局の収容可能数の総和よりも小さい値となるようにした。Cisco 社による Wi-Fi ネットワーク設計の例[7]より、LTE 基地局と Wi-Fi 基地局の収容可能数の比率については、全体の収容可能数に対しておおよそ Wi-Fi 利用者が 25%存在するような値とした。また 4.1 節で述べたとおり、LTE 基地局は Wi-Fi 基地局よりも収容数が多いという設定でシミュレーションを行うこととした。case3 から 5 では全体の端末数を同じ台数とした上で、LTE 基地局の収容可能数を増やした場合を比較している。また、いずれも割当て先となる基地局は 3 つ

表 3 実験の概要

ケース名	全体の端末数(台)	収容可能数(台)		
		LTE	Wi-Fi1	Wi-Fi2
case1	60	40	20	20
case2	80	50	25	25
case3	100	60	30	30
case4	100	75	30	30
case5	100	90	30	30

とした。

各端末で使用しているアプリケーションとして「通話アプリケーション」「ブラウザ」「その他」のうちのいずれかをランダムに割当て、各アプリケーションにおける必要 RTT は表 2 より、それぞれ 200, 85, 9999ms とした。

また本実験では、実装の都合上 LTE 基地局について Wi-Fi 基地局のモジュールで代用した。すなわち、本実験では LTE 基地局と Wi-Fi 基地局では使用する規格や無線モデルに差はなく、収容数についてのみ差を設けている。

## 5.2 実験の結果と評価

実験における結果を表 4 に示す。全体として、ランダムな割当てよりハンガリアン法による割当ての方が RTT ギャップの平均値を小さくすることができた。また、ランダムな割当てをすると、場合によっては RTT ギャップが非常に大きくなってしまふことが case3 からわかる。このときハンガリアン法によって割当てると、RTT ギャップの平均は 8 分の 1 ほど小さく抑えられることがわかった。

さらに全体の端末台数が 100 台のとき、LTE の収容可能数の比率が増えた場合では RTT ギャップの平均がやや

表 4 実験における RTT ギャップの平均

ケース名	RTTギャップの平均(ms)	
	ハンガリアン法による割当て	ランダムな割当て
case1	10.65	12.60
case2	27.30	94.05
case3	35.36	456.63
case4	33.90	246.01
case5	47.22	384.89

大きくなることがわかった。これは case5 において LTE 側へ割当てられる端末数が case3, 4 に比べて多くなってしまったことが原因と考えられる。この原因としては、接続後の RTT の変化について、提案システムでは理論的に 1 次関数を用いて算出していたが、開発した ns-3 上のシステムでは実測値を用いているため予測が難しくなっていると考えられる。この点については、今後接続後の RTT を予測することについて、提案システムのアルゴリズムを改良する必要があることがわかった。

また従来研究と比較すると、全体として RTT ギャップの平均値が大きくなっている。これは、従来研究の実験では各基地局の RTT は初期値として設定した値から接続端末数に応じて、1 次関数の予測値で算出しているのに対し、本実験では実測値を用いているため、従来研究の予測よりも各基地局の RTT は増えていることがわかった。

## 6. まとめと今後の課題

ユーザ端末で使用されているアプリケーションが必要とするラウンドトリップタイム (RTT) に応じて適切な割当てを行うアルゴリズムを用いた提案システムに対して、ユーザ端末のモビリティ、Wi-Fi 基地局と LTE 基地局の収容数の差をそれぞれ考慮し、接続時 RTT 算出にて実測値を用いるといった手法による実験を行った。これによって、提案手法をより現実的なシステムとして評価でき、有効性を示すことができた。

今後は、LTE 基地局における専用のモジュールの導入や、基地局を増やした状態や、バックボーンネットワークをより広げた状態における実験と検証を行う予定である。また、RTT だけでなくスループットについても検証を行う予定である。さらに、端末が接続された後の RTT を予測する点について、アルゴリズムを改良する予定である。

## 参考文献

- [1] 亀田栄一, 篠宮紀彦: 複数の無線通信サービスが混在した環境における使用アプリケーションを考慮した基地局割り当て手法, 情報処理学会論文誌, Vol.5, No.4, pp79-87 (2015).
- [2] 西川由明, 大芝崇, 金友大, 中島一彰: 無線リンクの高負荷状態におけるアプリケーションレベル通信遅延低減方式の評価実験, 情報処理学会研究報告, Vol.2013-MBL-66, No.24, pp.1-6 (2013).

- [3] 里田浩三, 大芝崇, 吉田裕志: サービス品質向上のためのネットワーク状態推定・予測技術, 電子情報通信学会技術報告, CQ2013-56, Vol.113, No.293, pp.29-34 (2013).
- [4] 総務省: アナログ電話相当の機能を有する IP 電話用設備に係る原稿技術基準 (1), "http://www.soumu.go.jp/main\_content/000158162.pdf"
- [5] Forrester Consulting: eCommerce Web Site Performance Today, "http://www.damcogroup.co.uk/white-papers/eCommerce\_website\_perf\_wp.pdf"
- [6] ns-3, "http://www.nsnam.org/"
- [7] Cisco: スポーツおよびエンターテイメント会場向け Cisco Connected Stadium Wi-Fi, ホワイトペーパー, "http://www1.cisco.com/web/JP/product/hs/wireless/airo3500/prodlit/pdf/white\_paper\_c11-674354.pdf"