複数無線通信サービス環境におけるアプリケーション特性とネットワーク指標を考慮した基地局割り当て手法

Studies on efficient assignment of base stations with considering application characteristics and network indexes in heterogeneous wireless communication services

07D5203　亀田 栄一　　　指導教員:　篠宮 紀彦

Abstract

While the LTE has been in widespread use and the line speed for data communications has also been improved, the exploding data traffic required by evolving applications is thought to increase the utilization factor of public WiFi services from now on. The throughput (TP) and the round trip time (RTT), however, might become longer for reasons of increasing heavy processing load on a public WiFi station or network load. On the other hand, the required TP or RTT are totally dependent on the application which a user is working on. This paper defines a degree of satisfaction of terminal that is the difference between the required TP or RTT for a user's application and the actual TP or RTT obtained when a mobile terminal gets connected to a station. The paper firstly formulates a problem to assign some mobile terminals with the different communications services by means of graph theory, and it also proposes a method to maximize the degree of satisfaction of terminal in the whole system with considering the required TP or RTT for user's applications based on a connection service determination logic by Hungarian method.

Keywords: WiFi Service，Round-Trip Time，Assignment Problem.

1　はじめに

通信技術の進展の歴史を展望すると，通信環境が整備されることに伴い，より高い品質のネットワーク環境を要求するアプリケーションが開発され，過剰供給と思われた通信速度や通信帯域が，アプリケーションの要求を満たせなくなるという状況がしばしば発生し，さらなる設備投資・技術革新が為される状況が繰り返してきた．これは，需要と供給の際限の無い競争であり，将来にわたっても技術革新によっては解決できない根源的な問題である．

この根源的な問題に対処するため，限られたネットワーク資源を適切に配分するための割り当て問題を解くことが重要となる．この問題は，ネットワーク上のステークホルダーが多様化する将来の IoT 時代においてはさらに重要な課題となることが考えられ，割り当て問題を解くことは，その解決に寄与すると考えられる．

本研究では，対象をスマートフォンなどの携帯端末に絞って，割り当て問題を考える．我々は，求められるネットワーク環境の品質は，端末で使用しているアプリケーションの種類によって異なるという点に着目してサービス劣化の原因を考察し，「端末の基地局への割り当てにおけるミスマッチにより，サービス劣化が発生している」という仮説を立てた．このミスマッチは，端末の基地局の割り当てにおいて，端末で使用しているアプリケーションを考慮していないことに起因すると考えられる．この仮説が正しければ，ある端末で使用しているアプリケーションにとって適切な基地局に端末を割り当てることにより，限られたネットワーク資源の利用効率が向上し，ユーザの満足度が向上すると考えられる．

本論文では，アプリケーション毎の特性を考慮した適切なネットワーク性能指標によりユーザ満足度を設定し，ユーザ満足度が最大となるような基地局と端末の割り当て方法を提案する．また，既存端末も含めた割り当て処理を定期的に繰り返すことにより，端末の参入と離脱が継続的に発生している実際的な環境でのシミュレーション実験を行った．

2　割り当て問題への定式化

2.1　端末満足度の定義

ここでは，大都市の駅などのような，一定時間内にモバイル端末の参入または離脱が継続して発生するような場所を想定して，モバイル端末を使用しているユーザが体感するレスポンスタイムについて考える．ユーザが体感するレスポンスタイムは，モバイル端末がある基地局に接続した場合に得られる TP や RTT が，端末上で使用されているアプリケーションが必要とする TP や RTT より悪化した場合に，低下すると考えられる．

ここで，各アプリケーションにおいてユーザ満足度に影響を与える性能指標について考える．厳密なリアルタイム性を要求されるアプリケーションにおいては，端末と対象サーバ間の RTT が重要である．RTT の値が大きいと，端末と対象サーバ間での通信においてタイムラグが発生することになり，ユーザの満足度を低下させることになる．厳密なリアルタイム性を要求されないアプリケーションにおいては，ある一定時

間内に対象サーバから端末まで送信できるデータ量を示すTPが重要であると言える．これらを踏まえ，各アプリケーション分類におけるネットワーク指標を表1のように設定した．

表1　各アプリケーション分類におけるネットワーク指標

アプリケーション	ネットワーク指標
ブラウザ	TP
動画ストリーミング	TP
通話アプリケーション	RTT
その他	-

本研究では，各アプリケーションをネットワーク指標を基にグループ G_{TP} とグループ G_{RTT} に分類し，それぞれのアプリケーションを使用している端末の満足度（端末満足度）を，式1と定義する．

$$S_i = \begin{cases} \dfrac{TP_{link}}{TP_{need}} & (APP_i \in G_{TP}) \\ \\ \dfrac{RTT_{need}}{RTT_{link}} & (APP_i \in G_{RTT}) \end{cases} \tag{1}$$

ここで，S_i は端末 i の満足度，APP_i は端末 i で使用されているアプリケーション，TP_{need} はアプリケーションが必要とする TP（必要 TP），TP_{link} は端末がある基地局に接続した場合に得られる TP（接続時 TP），RTT_{need} は使用しているアプリケーションが必要とする RTT（必要 RTT），RTT_{link} は端末がある基地局に接続した場合に得られる RTT（接続時 RTT）を，それぞれ示す．本研究の目的は端末満足度 S_i の調和平均の最大化であり，対象エリアに存在する端末数を n とすると，目的関数は以下の通りである．

$$\text{maximize } \frac{n}{\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{S_i}} \tag{2}$$

$$\text{subject to } 0 < S_i \leq 1 \tag{3}$$

2.2　G_{TP} に属するアプリケーション

2.2.1　必要 TP

まず，ブラウザにおいて必要な TP について考える．多くのサイトのトップページが $1,500$kB 以下であるため，ここでは $1,500$kB 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 [1]．x[B] のデータを y[s] で表示させるために必要な TP T[bps] は，$T = 8x/y$ で表すことができる．$1,500$kB のサイトを $2,000$ms で表示させるために必要な TP は，6Mbps である．よって，ブラウザにおける必要 TP は，6Mbps とする．

次に，動画ストリーミングアプリケーションにおける必要な TP は，現在日本で多く利用されている動画ストリーミングサービスが公表している通信条件を踏まえ，2Mbps とする．

2.2.2　接続時 TP

ある端末がある基地局に接続した場合に得られる TP は，実際にその基地局に接続しないと正確には把握できない．しかし，各端末がすべての基地局に接続して TP を計ることは現実的ではない．そこで本研究では，PathQuick[2] の技術を利用して，バックボーンネットワークからアクセスネットワークを経由した各基地局までの TP を定期的に把握することとする．PathQuick によって得られたある基地局の TP の値を TP_{pq} とし，その後にその基地局に接続された端末数を x とする．また，当該基地局に接続される端末数による当該基地局の TP の変化を表す TP 関数を $f_{tp}(x)$ とする．この時，当該基地局の接続時 TP(TP_{link}) は，$TP_{link} = TP_{pq} + f_{tp}(x)$ で表すことができる．

2.3　G_{RTT} に属するアプリケーション

2.3.1　必要 RTT

通話アプリケーションに必要な RTT について考える．通話については，総務省が「050 ＩＰ電話」の遅延の基準を「400ms 未満」と定めている [3]．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．対象端末から目的のサーバまでの間で必要な RTT は，400ms の半分の 200ms 程度と考えることができる．よって，通話アプリケーションの必要 RTT は，200ms とする．

2.3.2　接続時 RTT

バックボーンネットワークからアクセスネットワークを経由した各基地局までの RTT は，ping を使用して定期的に把握しておく．ping によって得られたある基地局の RTT の値を RTT_{ping} とし，その後にその基地局に接続された端末数を x とする．また，当該基地局に接続される端末数による当該基地局の RTT の変化を表す RTT 関数を $f_{rtt}(x)$ とする．この時，当該基地局の接続時 RTT(RTT_{link}) は，$RTT_{link} = RTT_{ping} + f_{rtt}(x)$ で表すことができる．

2.4　定式化

基地局 b_i の j 番目の基地局リソースを a_j^i，基地局 b_i の端末収容可能数を x_i，基地局数を P とすると，a_1^1，a_2^1，$....a_{x_1}^1$，a_1^2，a_2^2，$....a_{x_2}^2$，$...a_1^P$，a_2^P，$....a_{x_P}^P$ の基地局リソースが存在すると捉えることができる．全体収容数 M は，$M = \sum_{i=1}^{P} x_i$ で求められる．

3　提案システム

提案システムは，基地局情報取得部，接続先決定部，端末制御部の3つの部分により構成される．

3.1　基地局情報取得部

各基地局に基地局情報取得のための専用端末を常時接続させておく．また，アクセスネットワークの外部に，接続先コントロールサーバを設置する．接続先コントロールサーバから各基地局に接続した情報取得用端末に対して定期的にパケットを送信する．情報取得用端末は，受信したパケットの受信間隔を基に，アクセスネットワークを経由した各基地局への TP(TP_{pq}) を定期的に把握する．また，接続先コントロールサーバから各基地局に対して定期的に ping パケットを送信し，各基地局までの RTT(RTT_{ping}) を定期的に算出する．

3.2　接続先決定部

各基地局に対する各端末の端末満足度を基に，全体収容数 M から端末数 n 個だけ抽出した基地局リソースと，n 個の端末における，最適な組み合わせを算出する．

この時，各端末における必要 TP もしくは必要 RTT は，各端末で使用されているアプリケーションに基づいて，2.2.1 項

および 2.3.1 項の値を設定する．また，接続時 TP および接続時 RTT は，基地局情報取得部によって定期的に取得された TP_{pq}，RTT_{ping} およびその後に対象基地局に接続された端末数を基に算出され，これらの値を基に端末満足度を算出する．全体収容数 M から，端末数 n を抽出するすべての組み合わせについて，同様の計算を行う．すべての組み合わせで算出された解のうち，端末満足度の調和平均が最大となるものを，全体の最適解として選択する．

なお本研究では，上記の最適解の算出において，割り当て問題の解法の一つであるハンガリアン法を使用する [5]．

3.3 割り当て問題（ハンガリアン法）

n 個だけ抽出した基地局リソースと，n 個の端末の，それぞれの組み合わせにおける端末満足度は，サイズ $n \times n$ の行列で表すことができる．これを割り当て問題において入力される行列と見なす．ここで行列の各行は各基地局リソースを表し，各列は各端末を表している．本研究では，与えられた行列に対して，ハンガリアン法を使用して，重みが最小となる組み合わせを導出する．

3.4 端末制御部

3.2 節にて算出された組み合わせを基に，接続先コントロールサーバから各端末へ制御情報を送信する．各端末は，受信した制御情報に従って，接続先の基地局を切り替える．

4 シミュレーション実験による評価

大都市の駅内における 1 エリアを想定して，3 章で述べた提案システム全体のうち接続先決定部についてシミュレーションプログラムを作成し，実験を行った．

4.1 実験の概要

駅内のあるエリアにおいて接続可能な 3 つの基地局が存在していると仮定し，表 2 に示す 4 つのケースで端末の割り当てを行った．ここで各ケースの特徴をまとめると以下の通りである．

ケース 1　1 つの基地局だけ値が異なる．TP と RTT に負の相関関係がある．

ケース 2　全ての基地局の値が異なる．TP と RTT に負の相関関係がある．

ケース 3　全ての基地局の値が異なる．TP と RTT に正の相関関係がある．

ケース 4　全ての基地局の値が異なる．TP と RTT に相関関係がない．

各ケースにおける TP 初期値は PathQuick によって取得された値に，RTT 初期値は ping によって取得された値にそれぞれ相当する．

表 2　各基地局の TP 初期値・RTT 初期値

Case	基地局 1		基地局 2		基地局 3	
	TP	RTT	TP	RTT	TP	RTT
1	10Mbps	100ms	10Mbps	100ms	15Mbps	50ms
2	10Mbps	100ms	15Mbps	75ms	20Mbps	50ms
3	10Mbps	50ms	15Mbps	75ms	20Mbps	100ms
4	20Mbps	100ms	15Mbps	50ms	10Mbps	75ms

表 3　各アプリケーションの必要 TP・必要 RTT

アプリケーション	グループ	必要 TP	必要 RTT
ブラウザ	G_{TP}	6Mbps	-
動画ストリーミング	G_{TP}	2Mbps	-
通話アプリケーション	G_{RTT}	-	200ms
その他	-	-	-

各基地局の収容可能数は，全て 150 台とした．各基地局に接続される端末は，0 台から 150 台の値を取ることになる．今回の実験では，TP 関数，RTT 関数は 1 次関数とみなし，結果として TP が 7.5Mbps〜15Mbps の値を，RTT が 1ms〜300ms の値を取ると仮定して，全ての基地局において端末 1 台あたりの TP の増分を -0.05Mbps，RTT の増分を 2ms とした．これらは，それぞれ TP 関数および RTT 関数の傾きに相当する．

各端末で使用しているアプリケーションとしては，「ブラウザ」「動画ストリーミング」「通話アプリケーション」「その他」のうちのいずれかをランダムに割り当てた．各アプリケーションにおける必要 TP および必要 RTT は，表 3 の通りとする．

同エリアには，当初 100 台の端末が存在し，3 つの基地局にランダムに割り当てられているとする．また，1 秒毎に 0 台〜1 台の離脱端末と，1 台〜2 台の新規参入端末が発生することとし，その度に割り当て計算（イテレーション）を行う．イテレーションを 200 回繰り返して 1 回のシミュレーションとする．これらの一連のシミュレーションを 20 回実施し，各回の平均を取った．

本実験では，まず解法 1 として，200 回のすべてのイテレーションにおいて，新規参入端末のみを対象に割り当て計算を行った．次に，解法 2 として，イテレーションの 50 回，100 回，150 回，200 回では既存端末も含めた全端末での割り当て計算を行い，それ以外の回では新規参入端末のみを対象とした割り当て計算を行った．

シミュレーションプログラムでは，各基地局の収容可能数全体から端末数分を抽出しうるすべての組み合わせ数に対して，ハンガリアン法による計算を行い，全組み合わせの中で端末満足度の調和平均が最大となる組み合わせの中で，最低値が最大になる組み合わせを選択している．また，提案システムでの計算（解法 1，解法 2）以外に，以下の 2 つのロジックについても，各ケースにおける計算を行った．

1. 文献 [4] で提案されている手法（解法 3）
2. 各端末をランダムに基地局に割り当てる手法（解法 4）

4.2 実験の評価

4.2.1 端末満足度

ケース 1 における各解法のシミュレーションによって得られた端末満足度の値を，図 1 に示す．ここで示した端末満足度は，式 1 で示した各端末の端末満足度の調和平均を算出した上で，20 回の試行回数分の相加平均を算出した値である．まず，今回の実験では，0 台〜1 台の離脱端末と，1 台〜2 台の新規参入端末を 1 秒毎に発生させているため，イテレーショ

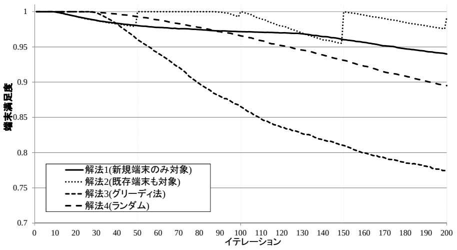

図１　端末満足度（ケース１）

ンを重ねる毎に，エリア内の端末が増え，全体として端末満足度は低下する傾向にある．そのため，解法 4(ランダム) ではいずれのケースでも徐々に低下している．

その上で，解法 1(新規端末のみ対象) と解法 2(既存端末も対象) を比べると，すべてのケースで解法 2(既存端末も対象) のほうが高い端末満足度を示している．このことから，既存端末も含めた割り当て計算を定期的に行うことが有効であると考えられる．

また解法 2(既存端末も対象) は，解法 3(グリーディ法)，解法 4(ランダム) と比べても，50 回目のイテレーション以降は，全てのケースにおいて端末満足度が高い結果となっている．1 回〜49 回のイテレーションでは，当初ランダムに割り当てられた既存端末が一度も割り当て計算の対象となっていないため，全体の端末満足度が下がっているが，50 回目のイテレーションで既存端末を対象とした割り当て計算を一度実施することにより，それ以降のイテレーションでは端末満足度が高い状態を維持することが分かった．以上のことから，本提案システムが有効であることが確認できた．

4.2.2　割り当て計算に要する処理時間

解法 2，解法 3，解法 4 のケース 1 における対象端末数毎の処理時間を表 4 に示す．解法 2 については，端末数が 200 台から 250 台に増えた時点で処理時間が減少している．これは，各基地局の収容可能数による制限により，組み合わせ数が減少するためと考えられる．また，解法 2 は，解法 3，解法 4 に比べれば時間がかかっているが，一定時間内には終了することが確認できた．解法 3，解法 4 の処理時間は十分に短いが，端末満足度を考慮していない．限られたリソースを複数の端末で効率よく利用し合うためには，過度な割り当てを回避しなければならず，端末満足度を考慮した本提案法式の有効性は十分にあると考えられる．なお，どの解法においても，全てのケースでほぼ同じ値を取った．これは，ケースが異なっても RTT と TP が変化するだけで，処理時間には影響がないためと考えられる．

5　まとめと今後の課題

ユーザが使用しているアプリケーションを考慮した端末満足度について定義し，端末満足度を最大化させる接続先決定ロジックを割り当て問題として定式化した．また，ハンガリアン法を用いて，既存端末も含めた割り当て計算を定期的におこなう接続先決定システムを提案した．更にシミュレーションプログラムによる実験を行い，端末満足度の最大化，処理時間の２つの観点からその有効性を示した．

表４　端末数毎の処理時間

端末数	処理時間 (秒)		
	解法 2	解法 3	解法 4
50	0.112	0.003	0.002
100	1.923	0.006	0.005
150	9.526	0.010	0.009
200	20.742	0.014	0.014
250	19.579	0.019	0.020
300	6.424	0.026	0.027

今後は，実システムを構築して，本研究で定義した端末満足度がユーザ満足度の定量的な指標になっているのかについて確認する．また，提案システムのシステム構成は，グリーディ法やランダムな手法に比べれば複雑になってしまっている．今後は，よりシンプルなシステム構成を検討する．さらに行動予測機能の実装についても，今後検討していく予定である．

参考文献

[1] Forrester Consulting : eCommerce Web Site Performance Today，http://www.damcogroup.com/white-papers/ecommerce_website_perf_wp.pdf.

[2] 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).

[3] 総務省 : アナログ電話相当の機能を有するＩＰ電話用設備に係る現行技術基準（１），http://www.soumu.go.jp/main_content/000158162.pdf.

[4] Zhikui Chen, Dalian, Qianzi Xiong, Yang Liu, Chongming Huang : A strategy for differentiated access service selection based on application in wlans, Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS),2014 IEEE, pp.317-322 (2014).

[5] Ravindra K. Ahuja，Thomas L. Magnanti，James B. Orlin : NETWORK FLOWS: Theory, algorithms, and Applications，Prentice Hall (1993).