社団法人　電子情報通信学会
THE INSTITUTE OF ELECTRONICS,
INFORMATION AND COMMUNICATION ENGINEERS

信学技報
TECHNICAL REPORT OF IEICE.

モバイルルータ近接時の公平性のためのフロー制御方法の提案

安藤　玲未† 　村瀬　勉†† 　小口　正人†

† お茶の水女子大学　〒 112-8610　東京都文京区大塚 2-1-1
†† NEC　〒 211-8666 神奈川県川崎市中原区下沼部 1753
E-mail: †remi@ogl.is.ocha.ac.jp , oguchi@computer.org, ††t-murase@ap.jp.nec.com

あらまし　近年，無線 LAN(WLAN) 上でのマルチメディア通信の需要の増加に加え，モバイルルータ (携帯型アクセスポイント，以下，AP) が急速に普及している．このことから，AP とその端末（例えば携帯や PC，ゲーム機等）が併せて移動する環境 (WLAN モバイル環境) が多くなってきた．無線 LAN のチャネル数には限りがあるため，多くのルータが近付くと，同一チャネルを使わざるを得ず，干渉が起こり，WLAN システム全体および TCP/UDP フローのスループットは劣化する．この劣化は，電波干渉，トランスポートプロトコル，端末の省電力機能など多くの要因が重なって発生するため，単純なシミュレーションモデルで，実際の性能を議論することは難しい．本研究では，実機実験にて WLAN システム自体が移動し複数の WLAN が近接するときの TCP/UDP のフローレベルでの特性評価，及び WLAN 間の不公平性を改善するためのどん欲な TCP を用いた制御方法の検討を行った．実験評価により，距離により決まる 3 つの状態において，UDP と TCP（端末から AP の向きのデータトラヒック）ではそれぞれ大きく異なるスループット特性を持つことを明らかにした．また，WLAN 間に接続端末数に偏りがある時は，TCP においては，WLAN 間で不公平が生じ，これを改善するためにスループットをどん欲に獲得しようとする TCP を用いることで，不公平を大きく改善できることを示した．

キーワード　無線 LAN，モバイルルータ，干渉，公平性

Method of flow control for the fairness of the mobile router when come close together

Remi ANDO†, Tutomu MURASE††, and Masato OGUCHI†

† Ochanomizu University　Otuka 2-1-1,Bunkyo-Ku,Tokyo 112-8610 Japan
††　NEC Corporation　1753 Shimonumabe,Nakahara-ku,Kawasaki,Kanagawa,211-8666,Japan
E-mail: †remi@ogl.is.ocha.ac.jp , oguchi@computer.org, ††t-murase@ap.jp.nec.com

Abstract　A mobile router (access point: AP) and associated terminals to the AP move together with mobile users. Since a number of Wireless LAN (WLAN) channels is limited when multiple WLANs come close each other, the multiple WLANs may have no choices except using the same channel. In the case, Quality of Services such as throughput can be degraded. This results from both radio interference as well as transport protocol behavior, power saving mechanism, etc. Thus, performance evaluation should be made by using real machines.. In this study, we investigate characteristics of throughput in TCP/UDP flows of real machines when the distance between two WLANs changes. The experimental results shows there are three states in different interference levels and characteristics of individual flow throughput in TCP significantly differ from that in UDP. Moreover, unfairness in individual WLAN throughput occurs if WLANs have different numbers of terminals and flows. In order to mitigate the unfairness, we propose a solution in which greedy TCP is employed instead of normal TCP in the smaller throughput WLAN to mitigate the unfairness and shows effectiveness of the solution.

Key words　wireless LAN, mobile router, interference, fairness

1. はじめに

近年，無線 LAN 上でのマルチメディア通信の需要の増加に加え，モバイルルータが急速に普及している．本研究におけるモバイルルータとは，個人の端末とは IEEE の無線 LAN で接続し，インターネットとの接続には WiMAX や 3G，LTE などと接続するルータあるいはアクセスポイントのことをさす．このモバイルルータの普及により，ルータと個人の端末，例えば携帯や PC，タブレット端末等が併せて移動する環境 (モバイル環境) が多くなってきた．このことからモバイルルータと個人の端末 (本研究では，これらを併せて ”無線 LAN システム ” と呼ぶ) で大量のデータを送受信することが想定される．

しかし，無線 LAN のチャネル数は限定されており，その数以上のルータが集まった時は同じチャネルを使わなければならず，干渉が起こる．従来はアクセスポイント (以下，AP) は固定して利用することが多かったため，無線 LAN 同士が移動して干渉することに関する研究はあまり行われていなかった．モバイル環境では，モバイルルータを持った人同士が自由に動き回るため，非常にダイナミックに干渉は起こり，干渉下での性能劣化，及びこの性能劣化に対する制御方法を検討することは必須である．

従来の研究では，移動することによる干渉の影響については，マルチホップの干渉 [?] やハンドオーバを伴う移動環境 [?] [?] では行われているが，無線 LAN システム自体が移動する環境ではない．また，無線 LAN システム自体が移動する環境 [?] において評価が行われている場合においても，MAC レベルのキャパシティについての評価であり，TCP/UDP のフローレベルの検証が必要になっている．

そこで，本研究では，モバイル環境でのフローの特性評価，及び性能劣化時の制御方法の検討を実機環境にて行った．

具体的には，2 台の無線 LAN システム間距離を変化させ，干渉が TCP/UDP フローの QoS 特性にどのくらい影響を及ぼすのか検証を行う．ルータ間距離が十分な時は問題なく通信できるが，ルータ間距離が小さくなると，お互いの通信が干渉を引き起こす原因となることが想定されるのでこれを定量的に評価する．

また，2 台のルータ間に接続端末数に偏りがある時は，MAC 層の制御とトランスポート層の制御が組み合わさることで不公平が生じ，端末数の少ない方の QoS パフォーマンスが落ちると想定される．この不公平の解消に関する QoS のアイデアは MAC レベルの制御や IP レベルの制御などがあるが，今回は比較的実現が容易なトランスポート層の輻輳制御を変更することで解決し，公平性の改善を目指す．

本稿ではまず，2 章で関連研究について述べ，MAC レベル (CSMA/CA) で干渉が起こる際，スループットにどう影響するのかを説明する．3 章ではモバイル環境での TCP/UDP スループットの実験結果，及び不公平具合を示し，4 章で不公平を緩和するための解決策を提案する．最後に 5 章でまとめを述べる．

2. 従来研究

2.1 関連研究

干渉による性能劣化に対する解決策に関する研究は，マルチホップネットワークやハンドオーバを伴う無線 LAN 環境において，既に行われている [?] [?] [?]．これらは，各 AP の干渉を考慮し，最適なスループットが得られるモデルや手法を提案している．このような電波を感知して制御をする提案手法は，固定の AP に対して効果的である．しかし，本研究ではモバイルルータを用い，AP 自体が頻繁に移動することを前提としているため，このような制御は有効ではない．

無線 LAN システム自体が動く環境での評価については, [?] [?] で既に行われている. [?] は無線 LAN システム間の距離が小さくなると MAC レベルでのシステムのキャパシティが減少することをシミュレーションにて示している．しかし，これらの研究では，MAC フレームエラー及びキャパシティの変動が上位レイヤプロトコルに与える影響については述べていない．QoS 対応のアプリケーション設計や，QoS 制御の検討に必要であるため，システムの特性に加え，フローレベルの特性を知る必要がある．そこで本研究では，無線 LAN システム同士が近づく環境において，MAC エラーやキャパシティの変動が TCP/UDP フローに与える影響について実験を行う．また，TCP と UDP では，振舞が異なることが想定されるため，3 章で述べる．

2.2 TCP-AV

ここで，4 章で用いる TCP-AV [?] について説明する．TCP-AV は，TCP-Reno をもとに改良された QoS-TCP の 1 つであり，目標帯域を用いてスロースタート閾値を設定し，目標帯域を確保するように輻輳ウィンドウを誘導する仕組みになっている．また，パケットロス検出時にも輻輳ウィンドウをできるだけ高く保つよう TCP を変更している．

無線 LAN における TCP スループットは，帯域を分け合う端末数，輻輳制御の振舞，ルータのバッファにおける TCP-ACK のロス，バッテリー節約のための NIC や OS の振舞など，多くの要素によって決まる．TCP は，ACK 待ち，タイムアウトやバックオフ状態，NIC や OS がスリープモードになると TCP-ACK が返ってくるまでデータ送信を待機しなければならない [?] [?].

もし N_p 台の端末が TCP においてデータを送信できない場合は，N 台の送信端末が持っているチャネルのトータルスループットを N-N_p 台の送信端末で分け合うことになる．一方で，TCP-AV はこのような状況に陥ることが殆どなく，上述した通りデータを送信し続けることができる [?].

以上の理由から，TCP-AV は TCP よりも多くのスループットを得ることができる．

2.3 干渉下での CSMA/CA の振舞

干渉下での CSMA/CA の特性は以下で説明する状態 1，状態 2，状態 3 の 3 つに分類され，それぞれ異なる QoS 特性を持つ．図??に示すように，WLAN-1 と WLAN-2 は独立した無線 LAN システムで，それぞれの無線 LAN システムは 1 台のモバイルルータ AP_i，AP_i と接続する N_i 台の送信端末，AP_i と

有線接続する 1 台の受信端末で構成されている．モバイルルータは AP として動作し，いずれも同じチャネルを使用する．各無線端末は AP を介して受信端末に向けて TCP または UDP の通信を行う．図??は 2 つの無線 LAN システム間の距離 d の変化により，状態 1，状態 2，状態 3 の 3 つの状態となることを示している．この実験環境では，同じ無線 LAN システム内の AP と端末は十分近い位置に配置する．点線は，キャリアセンスのドメインのイメージを示す．

また，図??は状態 1〜3 における CSMA/CA の動作例を示す．各状態について説明する．

- 状態 1：無線 LAN システム間距離 (d) が，十分に離れ，お互い干渉を与えない大きさである．つまり，無線信号 (図??ではノイズと表記) が他の無線 LAN システムにノイズとしてビットエラーを生じるには弱すぎるため，他の無線 LAN システムからの干渉の影響が現れない．
- 状態 2：無線 LAN システムは，他の無線 LAN システムと干渉し，お互いのスループットに影響を及ぼす．スループットが減少する理由は 2 つあり，1 つはビットエラーによるもので，もう 1 つはキャリアによってビジーになる状態である．一般に，干渉信号が強い時，デバイスに応じて信号がキャリアとして認識される．この時，各端末は他のシステムの通信中であるため，データ送信を待たなければならない．また，信号がキャリアとして認識するには小さすぎる場合には，キャリアが無いものと判断して，データを送信する時にビットエラーを引き起こすことがある．このビットエラーは，MAC フレームでのエラーのため，リトライアウトやフレーム再送の原因となる MAC フレームロスを引き起こす．そのため，再送及びバックオフによるウエイト状態となり，TCP 及び UDP のパケットを送信することが出来ず，スループットは減少する．つまり，無線 LAN システム間距離が小さくなるにつれて，干渉信号が強くなり，ビットエラーやキャリアビジーが起こる確率が高くなり，その結果フローレベルのスループットも低下する
- 状態 3：各無線 LAN システムが完全に 1 つの CSMA/CA ドメインとなる．この状態では，同じチャネルを使用している全ての無線 LAN システムが 1 つの CSMA/CA ドメインとなる．各フローは，キャパシティを $1/k$ で分け合う．ここで，k とは，互いに干渉しているシステムの総端末数である．例えば，WLAN-1 は 2 台 (N_1=2)，WLAN-2 は 8 台 (N_2=8) の送信端末で通信を行っているとすると，2 台の AP も含め，送信機会は 1/12 である．

以上の 3 つの状態があると考えられる．これらの 3 つの状態は d の大きさによるが，具体的な d の値は，システム構成，干渉の状態やデバイスの振舞特性によって変化する．

2.4 不公平の問題

状態 2，状態 3 では，端末数に偏りがある場合，無線 LAN システムごとのトータルスループットにおいて，不公平が起こる．例えば，N_1=2，N_2=8 の時，それぞれの端末のスループットは全体の 1/10 でフロー間では公平だが，トータルスループットは WLAN-1 と WLAN-2 はそれぞれ 2/10 と 8/10 となり，システム間では不公平が生じる．

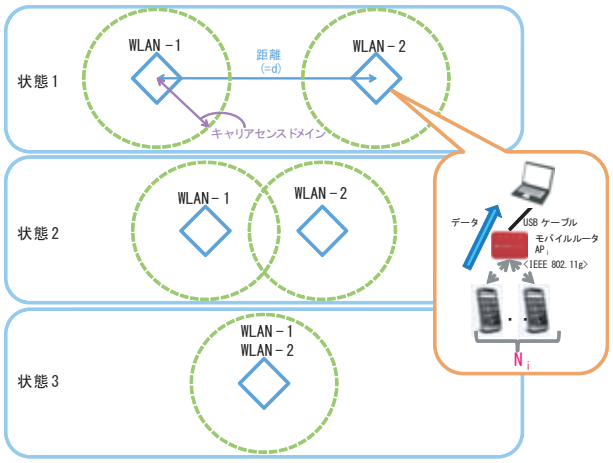

図 1　実 験 環 境

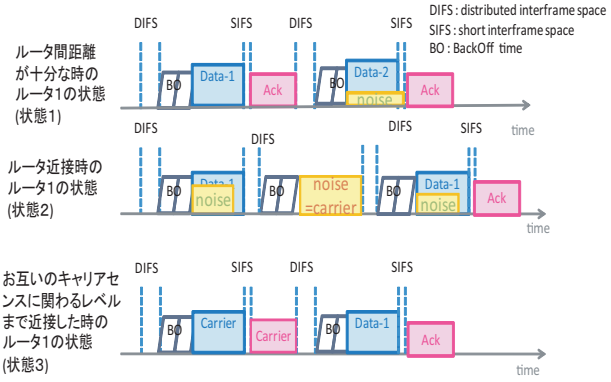

図 2　CSMA/CA

また，TCP はデータに対して TCP-ACK を返さなければならないため，TCP と UDP によって不公平の度合いも異なる．uplink 方向の TCP フローはルータのバッファあふれによる TCP-ACK のロスにより輻輳ウィンドウの減少につながる．このため，ルータのバッファサイズに応じて TCP-ACK のロス具合が異なることや，TCP-ACK のロスによりスループットが減少することは知られている [?]．このロスの影響はデータを送信する端末数に比例するが，輻輳ウィンドウの減少やタイムアウトを引き起こし，端末数が多くなると不公平が起こりやすくなる．状態 1 では，個々のシステム内の端末数に依存し，状態 2 や状態 3 では，関係する全てのシステム内の端末数に依存する．

以上の現象を検証するため，実機環境にて評価を行う．

3. 実機環境におけるスループット特性

3.1 実 験 機 器

本実験で，無線 LAN には IEEE802.11g を用いる．11g では理論上 54Mbps の速度で通信を行うが，実環境でのトータルスループットは 20Mbps 程度である．そのため，fair-share(通信可能帯域を送信端末台数で割った値) は，例えば 5 台で通信を行う場合，4Mbps となる．

モバイル端末には市販の Android 端末 (Nexus One，Galaxy S) を用いており，これらは通常 TCP(Cubic) として動作する．

実験に使用するモバイルルータ (NEC Aterm WM3500R) のバッファサイズを測定した所，275.5 パケットで，これは通常固定して使用する AP とほぼ同程度のバッファサイズであることが分かっている．

スループット測定には Iperf を用い，TCP，UDP 共にパケットサイズは 1460byte とした．

3.2 実験環境

ルータ間距離が変化することにより，電波環境やルータに接続される端末数が変化し，QoS パフォーマンスに影響が出ると想定される．また，TCP と UDP の違いによっても振舞が異なる．実験環境を図??に示す．d を変化させることで，3 つの状態における各フローのスループット測定を行った．本実験では，以下の 3 つの環境において，電波干渉により，どの程度スループットが減少するのかに焦点を当てる．

- model A: ルータ 1 とルータ 2 に 5 台ずつ端末が接続し，TCP 通信を行う場合
- model B: ルータ 1 に 2 台，ルータ 2 に 8 台端末が接続し，TCP 通信を行う場合
- model C: ルータ 1 に 2 台，ルータ 2 に 8 台端末が接続し，UDP 通信を行う場合

実験に使用する AP 以外の AP が多数存在していることを予め検出したが，これらの AP がほぼトラヒックがなく，実験に影響しないことを，パケットキャプチャの解析および実験に使用する WLAN のスループットが無干渉の場合の 20Mbps と等しいことで確認した．

3.3 TCP 及び UDP のスループット

図??が model A，model B，model C における，それぞれのフロー 1 本あたりのスループットである．model A では，WLAN-1 も WLAN-2 もほぼ同じ結果だったため，グラフは平均した結果である．model A 及び model B では，2 つの無線 LAN システムが 24m<= d の時，状態 1 であった．状態 1 の時，それぞれの無線 LAN システムはトータルスループットで 20Mbps 程度出ている．model C では UDP で通信を行っており，UDP は TCP-ACK を返さず一方向の通信であるため，トータルスループットは model A 及び model B よりもかなり高めになる．

無線 LAN システム同士が近付くことによりスループットを徐々に下げ，図??の 2 m < d < 24 m の時は，状態 2 になる．前述した通り，TCP と UDP では振舞が異なる．Model C の結果で示したように UDP フローはキャパシティを均等に分け，フロー毎のスループットはほぼ同じ値となり，例えば d=0m の時，約 2Mbps となる．しかし，model B におけるフロー毎の TCP のスループットは同じ値ではない．ここで，フロー数の少ない WLAN(つまりシステムスループットが小さい WLAN) を弱い WLAN, 多い WLAN(つまりシステムスループットが大きい WLAN) を強い WLAN と呼ぶ． 弱い WLAN である WLAN-1 の TCP スループットは UDP のスループットと比較し，トータルスループットの値は大きい．一方，強い WLAN である WLAN-2 の TCP スループットは UDP スループットと比較し小さい．この時，WLAN-1 側のフローの RTT は平均して約 2.4msec，WLAN-2 側のフローの RTT は約 10.3msec となっていた．端末数の多い方が大きな RTT 値をとっている．

d < =2m の時，2 つの独立した無線 LAN システムは完全に 1 つの CSMA/CA ドメインとなり，トータルスループットである 20Mbps を 2 つの無線 LAN システムで分け合う．

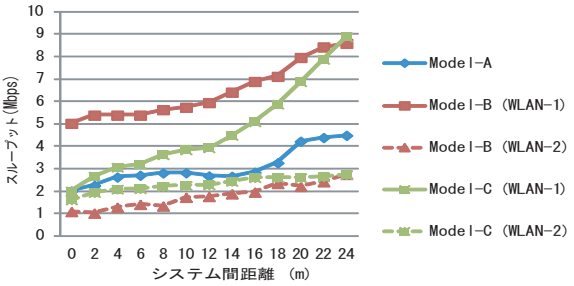

図 3 モバイル環境におけるスループット特性

3.4 MAC エラー率

状態 2 と状態 3 でスループットが減少したことを詳細に検証するため，model A のパケットをもとに MAC エラー率を測定した．結果を図??に示す．状態 2 では，MAC フレームエラーが起こるため，無線 LAN システム同士が近付くとエラー率は上昇し，状態 3 では MAC フレームでのエラーは多少起こるものの，お互いの通信がキャリアとして認識できている分，エラー率は減少することが示された．

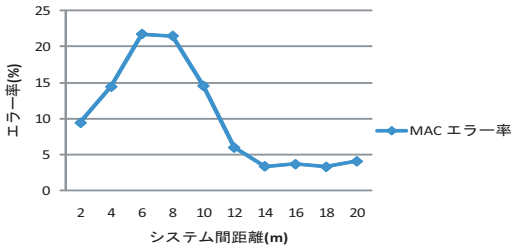

図 4 MAC エラー率

3.5 無線 LAN システム間の不公平

公平性を測る指標として，Jain の Fairness Index(FI) を無線 LAN システムに対し適用する．FI の値 (fi) は，以下のように定義される．

$$fi = \frac{(\sum_{i=i}^{k} x_i)^2}{k \sum_{i=i}^{k} x_i^2} \qquad (1 \leqq i \leqq k)$$

ここで，k は考慮している無線 LAN システムの個数，x_i は各無線 LAN システムのトータルスループットを表す．図??の「TCP(改善前)」に fi の値を示す．fi の値は 0.0 から 1.0 の間で，fi=1.0 の時，全ての無線 LAN システムは同じトータルスループットであることを示す．24m < d の時，fi=1.0，つまり状態 1 では不公平は起こっていない．

modelB では，ルータ間に接続端末数の偏りがあるため，0m < d < 24m，つまり状態 2 と状態 3 では不公平が起こってい

る．d=0m，つまり状態 3 では，不公平の度合いが最大となり，fi=0.88 となった．

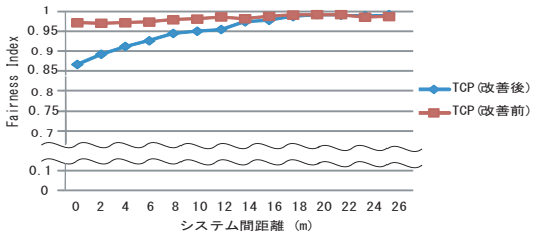

図 5　Fairness Index

4. モバイル環境間の公平性のためのフロー制御方法の提案

4.1 TCP-AV を使用した制御方法

2 つの無線 LAN システム間の状態 2 と状態 3 の不公平性の改善について検討する．しかし，LSI チップ上で実行されている MAC 層のプロトコルやメカニズムを修正することは難しく，また，ネットワーク上の全ての IP 機器に修正が必要になる可能性がある IP 層のプロトコルやメカニズムを修正することも難しい．そこで，本研究では TCP など比較的変更が容易な所を調整することで不公平を解消することを検討する．

我々は，弱い無線 LAN システムの通常 TCP の代わりに TCP-AV で通信する方法を提案する．TCP-AV は通常 TCP(実験では，通常 TCP として TCP CUBIC を用いた) と比較し，帯域を多く取ることができ，不公平を緩和することができると考えられる．

2 章で述べた通り，TCP-AV フローは 1 つの無線 LAN システム内で他の TCP フローから帯域を奪うが，さらに，TCP-AV フローは状態 2 及び状態 3 においても，他の無線 LAN システムの TCP フローから帯域を奪う．メカニズムを以下に示す．TCP はルータにおけるバッファあふれによる ACK ロスのためにタイムアウトの可能性があり，その場合，データを送ることが出来なくなる [?]．一方で，2 章で述べたように，TCP-AV はデータを送り続けることができる．WLAN-1 が N_1 台，WLAN-2 が N_2 台と通信を行っている時，もし N_p 台の端末が NIC においてデータを送信できなかった場合，N=N_1+N_2-N_p 台の端末があるチャネルのトータルキャパシティを使うことができる．つまり，チャネルキャパシティは送信可能な N 台で共有するが，TCP-AV はいつも送信可能な状態である．

以上の理由により，弱い WLAN の TCP-AV は fair-share 以上のスループットを取ることができるだけでなく，強い WLAN のフローからも帯域をとることができる．従って，TCP-AV により，弱い無線 LAN システムのシステムスループットを増加し，公平性を向上させることができる．

4.2 提案方法の評価

提案手法を評価するため，TCP-AV を Nexus One 上に実装した．モバイル端末は通常の TCP プロトコルか TCP-AV プロトコルに切り替えて使用する．TCP-AV の目標帯域は不公平を改善するのに十分な値に設定する．今回は 10Mbps とし，Model B で実験を行う．図??は改善前の WLAN-1 と WLAN-2 それぞれの 1 台あたりのスループットと，改善後の WLAN-1 と WLAN-2 それぞれの 1 台あたりのスループットを示している．改善前，改善後の fi は図??に示されている．

図??に示すように，d=0 の時，改善前に fi=0.88 だった公平性は，fi=0.98 にまで上昇させることが出来た．TCP-AV は不公平を緩和するのに効果的であることが示された．ただし，TCP-AV を何本使った時に最も効果があるのか，TCP-AV の目標帯域設定をいくつに設定すれば良いのか，また，どのような情報があればこれらを決定できるのか，などについては今後検討していく．また，UDP での不公平緩和についても今後検討していく．

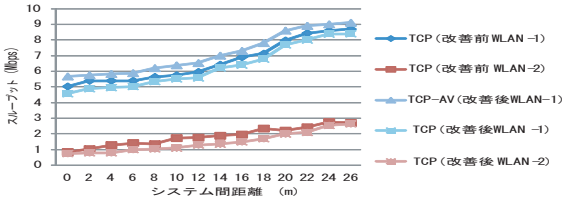

図 6　改善前及び改善後のスループット

5. おわりに

モバイルルータ環境での無線 LAN の特性評価を行った．モバイルルータ環境では，ルータ間距離に応じて，3 つの状態モデルがあることを説明し，各状態のフローレベルスループット特性について検証を行った．これらの特性は電波信号の干渉と端末上で動作しているデバイスの動作に依存すると考えられるため，実機での評価を行った．これにより，複数のシステム間で TCP と UDP では異なる特性があること，ルータ間に接続端末数の偏りがある時は，システムごとのトータルスループットの点で不公平が生じ，端末数の多い方が有利であることが明らかになった．

本実験で示された不公平の問題を緩和する制御として，通常 TCP の代わりに TCP-AV を用いる方法を提案した．この提案手法の評価実験を行った結果，Fairness Index の値は 0.88 から 0.98 に上昇し，有効であることが明らかになった．

謝辞

本研究は一部，独立行政法人情報通信研究機構の委託研究「新世代ネットワークを支えるネットワーク仮想化基盤技術の研究開発・課題ウ　新世代ネットワークアプリケーションの研究開発」によるものである．また本研究を進めるにあたり大変有用なアドバイスを頂いた京都大学の新熊亮一先生と神戸大学の太田能先生に深く感謝致します．

文　献

[1] Micah Z.Brodsky, Robert T.Morris, "In Defense of Wireless Carrier Sense", ACM SIGCOMM 2009 conference on Data communication, pp.147-158, Aug. 2009.

[2] I.Ramani, S.Savage, "SyncScan: Practical Fast Handoff for 802.11 Infrastructure Networks", Infocom 2005, pp.675-684, Mar. 2005.

[3] S.Seo, J.Song, H.Wu, Y.Zhang, "Throughput-based MAC layer handoff in WLAN", Infocom Workshops, pp.1-2, 2009, Mar. 2009.

[4] K.Jain, J.Padhye, V.Padmanabhan, L.Qiu, "Impact of Interference on Multi-hop Wireless Network Performance", ACM MobiCom 2003, pp.66-80, Sep. 2003.

[5] J.Zhu, B.Metzler, X.Guo, Y.Liu, "Adaptive CSMA for Scalable Network Capacity in High-Density WLAN: a Hardware Prototyping Approach", IEEE Infocom 2006, pp.1-10, Apr.2006.

[6] K.Yamanegi, G.Hasegawa, M.Murata, "Achieving predictable throughput of TCP based on inline network measurement",vol. 106, no. 237, IN2006-50, pp. 7-12, Sep. 2006.

[7] H.Shimonishi, T.Hama, T.Murase, "TCP Congestion Control Enhancements for Streaming Media," Consumer Communications and Networking Conference 2007, pp.303-307, Jan. 2007.

[8] W.Wang, C.Wu, S.Ohzahata, T.Kato, "Performance analysis of iPad TCP communications", IN-2011-43, pp.85-90, June. 2011.

[9] M. Hashimoto, G. Hasegawa and M. Murata, "Trade-off evaluation between fairness and throughput for TCP congestion control mechanisms in a wireless LAN environment," Performance Evaluation of Computer and Telecommunication Systems 2010, pp.22-29, July 2010.

[10] R.Ando, T.Murase, M.Oguchi, "Characteristics of QoS-Guaranteed TCP on Real Mobile Terminal in Wireless LAN," IEEE 2011 International Communications Quality and Reliability Workshop2011, CQR035, May. 2011.

[11] D.-M. Chiu and R. Jain," Analysis of the increase and decrease algorithms for congestion avoidance in computer networks, "Computer Networks and ISDN Systems, vol. 17, pp. 1-14, 1989.