

無線 LAN 環境における TCP フロー間の公平性改善手法の実験評価と 評価指標の提案

橋本 匡史[†] 長谷川 剛^{††} 村田 正幸[†]

[†] 大阪大学 大学院情報科学研究科 〒 560-0871 大阪府吹田市山田丘 1-5

^{††} 大阪大学 サイバーメディアセンター 〒 560-0043 大阪府豊中市待兼山町 1-32

E-mail: [†]{m-hasimt,murata}@ist.osaka-u.ac.jp, ^{††}hasegawa@cmc.osaka-u.ac.jp

あらまし IEEE 802.11 無線 LAN 環境において、TCP フロー間に深刻な不公平が発生することが指摘されている。これは、アクセスポイントのバッファにおいて大量の TCP ACK パケットが廃棄されるほどの輻輳が発生しているにもかかわらず、TCP が輻輳制御を行わないことに起因する。本稿では、そのような不公平問題に対して、我々が提案している改善手法の性能評価を、実無線 LAN 環境を用いた実験により行う。評価指標として、TCP フロー間の単純な公平性だけでなく、ネットワークのボトルネック箇所における帯域利用効率を考慮した指標を提案し用いる。提案指標を利用した評価により、我々の提案している改善手法が最大で 180 % の改善効果があることを示す。また、複数のベンダのアクセスポイントおよび無線インターフェースを用いた実験結果より、提案方式が無線 LAN 部分の実装にかかわらず効果を発揮することを示す。

キーワード 無線 LAN, 公平性, 輻輳制御, 評価指標

Experimental Evaluation of TCP Congestion Control Mechanisms in Wireless LAN Environment with a Novel Performance Metric

Masafumi HASHIMOTO[†], Go HASEGAWA^{††}, and Masayuki MURATA[†]

[†] Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University 1-5, Yamadaoka, Suita, Osaka, 560-0871 Japan

^{††} Cybermedia Center, Osaka University 1-32, Machikaneyama, Toyonaka, Osaka 560-0043 Japan

E-mail: [†]{m-hasimt,murata}@ist.osaka-u.ac.jp, ^{††}hasegawa@cmc.osaka-u.ac.jp

Abstract It has been pointed out in the past researches that per-flow unfairness in TCP throughput can be found in IEEE 802.11 wireless LAN environment. The main reason for the unfairness is that TCP keeps growing the congestion window size even when the access point is highly congested and numerous TCP ACK packets are discarded. In this report, we first propose a novel performance metric, considering both of per-flow fairness and bandwidth efficiency at network bottleneck. We then evaluate the performance of our proposed method for alleviating TCP unfairness problem through experiments in real wireless LAN environment using the metric. We show that the proposed method can improve TCP fairness up to 180 % regardless of vendor implementations of wireless access points and wireless interface cards.

Key words wireless LAN, fairness, congestion control, performance metric

1. はじめに

近年、無線ネットワーク技術の向上にともない、無線 LAN を通じたインターネットアクセスが一般的になり、空港や駅などの公共の施設において、無線 LAN 技術を用いたインターネットアクセスサービスが提供されるようになってきた。このようなサービスを提供する場合においては、無線 LAN 部分におけるユーザ間の公平性が重要となる。

無線 LAN 規格として、IEEE によって標準化された、2.4 GHz 帯を利用する IEEE 802.11b [1] や IEEE 802.11g [2]、5 GHz 帯を利用する IEEE 802.11a [3] などがある。無線伝送速度は IEEE 802.11b の場合は最大 11 Mbps であり、IEEE 802.11a および IEEE 802.11g の場合は最大 54 Mbps である。さらに、近年標準化された IEEE 802.11n [4] は無線伝送速度は最大 600 Mbps であるなど、さらなる高速化が行われている。これらの無線 LAN 規格では無線媒体へのアクセス制御方式に CSMA/CA を用い

ている [5]。CSMA/CA は、搬送波を検出するためにバックオフ時間だけフレーム送信を待ち、通信中の端末が存在しないことを確認することによって、フレームの衝突をできるだけ避けようと試みる。無線 LAN における通信は、アクセスポイントを介した、アクセスポイントから無線端末への通信およびその逆向きの通信から構成される。CSMA/CA により無線 LAN 内の各端末が無線媒体にアクセスする機会は等しいため、端末間の MAC レベルにおける公平性は確保される。しかし、アクセスポイントから無線端末への通信は 1 台のアクセスポイントによる通信であるのに対し、その逆向きの通信は複数台の無線端末による通信であるため、アクセスポイントから無線端末への通信とその逆向きの通信ではアクセス機会に不均等が生じる。これは、CSMA/CA によって実現される MAC レベルにおける端末間の公平性が上位レイヤにおける公平性に直接つながらないことを意味している。

このような問題に対して、さまざまな手法が提案されている [6-9]。これらの手法は、アクセスポイントにおける MAC プロトコルのパラメータやキュー管理機構を変更することで TCP フロー間の公平性を改善している。しかし、通常無線アクセスポイントの MAC 機能はハードウェア化されており、その変更には大きなコストがともなう。また、キュー管理機構の変更により改善を図る手法においては、アクセスポイントを通過しているフロー数や各フローのスループットを推定する必要がある。

そこで我々は、無線 LAN 環境において発生する TCP フロー間の公平性問題に対して、トランスポートレイヤにおける改善手法を提案した [10, 11]。この手法は、TCP フロー間の不公平の原因となっている TCP ACK パケットの損失に対して輻輳制御を行うことによって TCP フロー間の公平性を改善している [11] では、シミュレーション評価を通して、提案手法が TCP フロー間の公平性を改善できていることを示している。

フロー間やユーザ間の公平性を評価する際の評価指標としては、次式で定義される Jain の fairness index [12] が広く利用されている。

$$F_j(X_n) = \frac{(\sum_{i=1}^n x_i)^2}{n \sum_{i=1}^n x_i^2}$$

なお、 n は標本数である。この指標は無次元量を対象としてを評価するための指標であり、標本のばらつきが小さいほど値が 1 に近づく。一方、標本のばらつきが大きいほど値は $1/n$ に近づく。Jain の fairness index は標本のスケールには依存しないため、例えば、\$30 と \$40 と \$10 をそれぞれ 3 人に割り当てたときの公平性と \$300 と \$400 と \$100 をそれぞれ 3 人に割り当てたときの公平性を等しく評価できる。しかし、目標となる標本の合計値が決まっており、それを満たしながら公平性を比較する場合ではこの指標は利用できない。本稿においては、目標となる標本の合計値とはネットワーク帯域に相当する。すなわち、この指標では、ネットワーク帯域の利用効率を考慮した公平性の評価を行うことができないと言える。

そこで本稿では、ネットワーク帯域の利用効率を考慮した新しい公平性指標を提案する。次に [10, 11] において提案している、無線 LAN 環境で発生する TCP フロー間の公平性改善手法を実無線 LAN 環境での実験によって評価する。提案指標を利用した実験評価を通して、我々が提案している改善手法が最大で 180 % の改善効果があることを示す。

2. TCP フロー間の公平性

通常の無線 LAN 環境においては、アクセスポイントを含む無線 LAN 内のすべての無線端末が CSMA/CA のパラメータに同一のものを利用する。そのため、十分長い時間においては、競合する無線端末間では無線帯域へのアクセス機会が等しくなる。一方、各無線端末からアクセスポイントへの上り方向の通信はそれぞれの無線端末から送信され、アクセスポイントから各ステーションへの下り方向の通信はアクセスポイントから送信される。したがって、無線端末数を n とすると、上りフローのアクセス機会が $n/(n+1)$ であるのに対し、下りフローのアクセス機会が $1/(n+1)$ となる。そのため、無線 LAN においてはアクセスポイントがボトルネックとなり輻輳が発生する。無線 LAN 環境で利用されるアプリケーションを考えると、下りトラヒックのみではなく上りトラヒックも存在するため、このアクセス機会の差は問題となる。このため、MAC レイヤにおいては公平であっても上位レイヤにおいて公平になるとは限らない。

さらに、TCP フローにおいては上下フロー間だけではなく、上りフロー間においても深刻な不公平が生じる。上述のような原因で輻輳が発生すると、アクセスポイントのバッファにおいて、上り TCP フローの TCP ACK パケット、および下り TCP フローのデータパケットが廃棄される。TCP はデータパケットが 1 つでも損失すると輻輳制御により輻輳ウィンドウを減少させる。しかし、TCP ACK パケットが損失した場合は輻輳制御が行なわれない。そのため、上り TCP フローは再送タイムアウトが発生しない限り、ウィンドウサイズを増加し続ける。再送タイムアウトが発生した上り TCP フローは輻輳ウィンドウを 1 に設定し、輻輳ウィンドウを再び増加させる。このとき、アクセスポイントの輻輳が改善されておらず、さらに、輻輳ウィンドウが小さいほど 1 ウィンドウ内の全ての TCP ACK パケットが廃棄されやすいため、一度再送タイムアウトが発生した上り TCP フローは輻輳ウィンドウを増加させることが困難となる。以上の理由により、上り TCP フロー間では深刻な不公平が生じる。

また、上下 TCP フローが混在する環境においては、上述のように上り TCP フローは TCP ACK の廃棄に対して輻輳制御を行わないが、下り TCP フローはデータパケットの廃棄に対して輻輳制御を行う。その結果、上り TCP フローは下り TCP フローより多くの無線帯域を獲得するため、上下 TCP フロー間に深刻な不公平が生じる。

このような無線 LAN 環境において発生する TCP フロー間の公平性問題に関して様々な手法が提案されている [6-9]。[6] では、TCP 受信側から返信される TCP ACK パケット内の広告ウィンドウをアクセスポイントにおいて書き換えることにより、上下フロー間の公平性を改善している。しかし、この手法では各フローのラウンドトリップ時間 (RTT) が異なる場合において公平性の改善効果が低下することや、無線帯域が有効に利用できない場合があることが指摘されている。

[7] において提案されている手法では、アクセスポイントの MAC プロトコルのみを変更し、通常 Distributed InterFrame Space (DIFS) 期間行うキャリアセンスの期間を DIFS 期間より短い Point InterFrame Space (PIFS) 期間に変更することで、上下

フロー間および上りフロー間の公平性を改善する [8] では、アクセスポイントのバッファをデータパケットと TCP ACK パケットのそれぞれを格納するための 2 つのバッファに分割する。各バッファに格納されたパケットには、上下フロー数や広告ウィンドウサイズなどをパラメータとして個別に決定されるパケット廃棄確率が設定される [9] では、アクセスポイントにおいて TCP ACK パケットをフィルタリングすることにより、上りフロー間の公平性を改善している。この手法は TCP が輻輳制御に累積 ACK を用いていることを利用し、アクセスポイントのバッファに蓄積される TCP ACK パケット数を減らすことで公平性の改善を実現している。

しかし [6, 8, 9] の手法は、アクセスポイントにおいて TCP ヘッダを解析する必要があり、さらに [9] の手法の場合は各フローの情報を保持する必要がある。

IEEE 802.11e [13] は無線 LAN において様々なサービス品質 (QoS) をサポートした規格である。IEEE 802.11e は各フローをその優先度に応じて 4 つのアクセスカテゴリに振り分けることにより、フロー間の異なる QoS を実現する。そのため、無線端末間の公平性の改善は行うことができず、パラメータ設定が難しいという問題がある。

そこで我々は、TCP フロー間において不公平が生じている際に、アクセスポイントのバッファにおいて大量の TCP ACK パケットが廃棄されている点に注目し、TCP ACK パケットの損失を指標とした公平性手法を提案している [10, 11]。この手法は、上記の既存の改善手法で必要な、MAC プロトコルの変更やフロー数の推定および複雑なパラメータ設定を必要としない。この手法の詳細については 4.1 節において説明する。

上記のようなフロー間の公平性に関する検討においては、公平性の定義が重要となる。従来の公平性の定義では、無線 LAN 内の競合するフローが獲得する無線帯域を等しく獲得することを公平であるとしていた [6-9, 14]。しかし、無線 LAN 環境における公平性を改善する手法は、公平性を改善する一方でネットワークスループットが低下することがある。そのため、ネットワークスループットが高ければ公平性が損なわれても許容できるのか、あるいは逆に、公平性が高ければスループットは損なわれても許容できるか、といった、スループットと公平性との間のトレードオフの議論が必要である。しかし、Jain の fairness index ではこのトレードオフ関係の評価することができない。このため、無線 LAN 環境における公平性の評価の際には無線帯域の利用効率を含めた新しい指標が必要である。

そこで本稿では、ボトルネックとなるネットワーク帯域を有効利用しつつ、競合するフロー間で等しくネットワーク帯域を獲得することを公平であると定義し、新しい公平性指標を提案する。

3. ネットワーク帯域を考慮した公平性指標

ボトルネックリンク帯域を共有している n 本のフローが獲得したスループットが $X_n = \{x_1, x_2, \dots, x_{n-1}, x_n\}$ であり、ボトルネックリンクの帯域を C であるとする。つまり、 $\sum_{i=1}^n x_i \leq C$ である。このとき、フロー間の公平性を満し、かつネットワーク帯域を 100% 利用している状態における公平なスループットを x_f とし、 $x_f = \frac{C}{n}$ と定義する。ここで、Jain の fairness index $F_j(X_n)$ と合計スループットの関係から新指標 $F(X_n, C)$ が満

すべき性質を以下のように定義する。

(i) $F_j(X_n) = F_j(Y_n)$ であるとき $\sum_{i=1}^n x_i < \sum_{i=1}^n y_i \leq C$ ならば、 $F(X_n, C) < F(Y_n, C)$ である。

(ii) $\sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n y_i \leq C$ であるとき $F(X_n) < F(Y_n)$ ならば、 $F(X_n, C) < F(Y_n, C)$ である。

上記の性質を満たすように指標を以下のように決定する。公平なスループット x_f から各フローのスループットからどれだけ離れているかを表す指標 $h(X_n, C)$ を、下記のように決定する。

$$h(X_n, C) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_f)^2 \quad (1)$$

さらに、(1) 式を公平なスループットで正規化すると次式のようになる。

$$g(X_n, C) = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_f)^2}}{x_f} \quad (2)$$

(2) 式は公平なスループットを基準とし、それからどれだけ相対的にばらついているかを表す。ここで、 X_n の変動係数を COV とすると、Jain の fairness index が $1/(1 + COV^2)$ と書けること [12] を参考に、指標 $f(X_n, C)$ を次式のように決定する。

$$\begin{aligned} f(X_n, C) &= \frac{1}{1 + g(X_n, C)^2} \\ &= \frac{C^2}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - 2C \sum_{i=1}^n x_i + 2C^2} \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、(1) 式は各フローのスループットと公平性のスループットの差のみで値が決まるため、合計スループットが大きいにもかかわらず (3) 式の値に差が表れないことがある。例えば、ネットワーク帯域が 10 Mbps であると仮定し、 $X_5 = \{3, 1, 1, 1, 1\}$ と $Y_5 = \{3, 3, 1, 1, 1\}$ のようにネットワーク帯域を獲得した場合を考える。このとき、公平なスループットは $x_f = 2$ Mbps であるため、 $f(X_5, 10) = f(Y_5, 10) = 0.8$ となるが合計スループットは Y_5 の方が大きい。このため、(3) 式に対して、ネットワーク帯域に対して獲得した合計スループット ($\sum_{i=1}^n x_i$) / C によって重みづけが必要となる。したがって、ネットワーク帯域の利用効率を考慮した公平性指標 (fairness and efficiency index) として次式を提案する。

$$F(X_n, C) = \frac{C^{2-\alpha} \left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^\alpha}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - 2C \sum_{i=1}^n x_i + 2C^2} \quad (4)$$

なお、 α はネットワーク帯域の利用効率の指標への寄与度を調節するためのパラメータである。

本指標は上述した性質を満たしており、ネットワーク帯域の利用効率が高く、各フローが獲得したスループットが等しいほど 1 に近づき、ネットワーク帯域の利用効率が低く、各フローが獲得したスループットのばらつきが大きいほど 0 に近づく。また、ネットワーク帯域と合計スループットが等しい場合 ($C = \sum_{i=1}^n x_i$) においては、Jain の fairness index と等価である。

本稿では、提案指標と Sliding Window Method (SWM) [15] を組み合わせて評価を行う。SWM は様々な大きさの時間粒度における公平性を定量的に評価でき、小さな時間粒度における公平性 (short-term 公平性) および大きな時間粒度における公平性 (long-term 公平性) を同時に評価できる利点がある。(4) 式を利

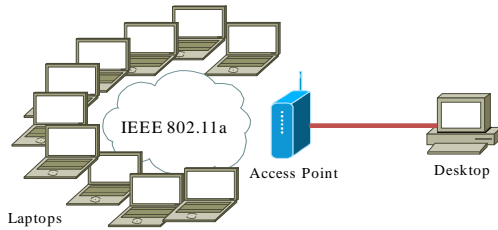


図1 実験ネットワーク環境

用した SWM は次式ようになる .

$$SWM(w) = \frac{C^{2-\alpha} \left(\sum_{i=1}^n x_i(w) \right)^\alpha}{n \sum_{i=1}^n x_i(w)^2 - 2C \sum_{i=1}^n x_i(w) + 2C^2} \quad (5)$$

なお, w はウィンドウサイズであり, $x_i(w)$ はフロー i の w 間における平均スループットである .

4. ACK パケットの損失に対する輻輳制御手法

本章ではまず [11] において提案している TCP フロー間の公平性改善手法の概要について説明する . 次に, 実無線 LAN 環境で評価環境および実験方法について説明し, 3. 章において提案した指標による評価結果を示す .

4.1 提案手法

無線 LAN 環境において生じる TCP フロー間のスループットに関する深刻な不公平は, TCP ACK パケットが大量に廃棄されるような輻輳が生じているにもかかわらず, TCP が輻輳ウィンドウを増加し続けることが原因で発生する . そのため, 提案手法においては, TCP ACK パケットの損失に対しても輻輳制御を行うことにより公平性の改善を図る .

TCP ACK パケットの損失は, 送信側 TCP が受信する TCP ACK パケットのシーケンス番号を監視することにより判断する . 受信した TCP ACK パケットのシーケンス番号が 1 パケット分ずつ増加する場合は TCP ACK パケットの廃棄は発生していないと判断し, また, シーケンス番号の増加が 2 パケット以上であれば TCP ACK パケットが廃棄されたと判断する . このとき, シーケンス番号の増加幅を廃棄された TCP ACK パケット数として計上する . さらに, 1 RTT 中に観測された TCP ACK パケットの廃棄数が閾値 thresh_ack_losses 以上である場合にネットワーク上で輻輳が発生していると判断し, 現在の輻輳ウィンドウサイズを半減する . このとき, ネットワーク内におけるパケット順序の入れ替えなどによる輻輳の誤検出を低減させるため, 1 RTT の間待機する時間を設ける . 具体的には, 待機期間内に, 現在受信されている最大シーケンス番号より以前のシーケンス番号の TCP ACK パケットを受信した場合は輻輳の誤検出が発生したと判断し, TCP ACK パケットの廃棄数を 1 パケット分差し引く . また, データパケットの廃棄を検出した場合においては, その後の 1 RTT 間は, TCP ACK パケットの廃棄数の計上は行わない .

4.2 実験環境

IEEE 802.11a 無線 LAN を用いた実験環境を図 1 に示す . 10 台の無線端末が 1 つのアクセスポイントを共有し, アクセスポイントから 1 台の有線端末までは有線リンクにより接続されている . すべての無線端末はアクセスポイントから 50 cm 以内に配置した . 無線端末は DELL Latitude E5500 を使用し, 有

表 1 実験に利用した無線デバイス
(a) 無線 LAN カード (b) アクセスポイント

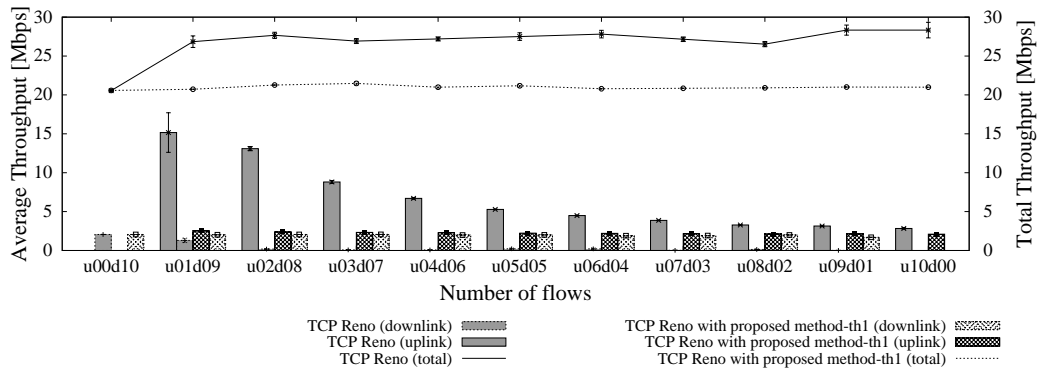
ベンダ	品名	ベンダ	品名
Buffalo	WLI-CB-AGHP	Buffalo	WAPS-HP-AM54G54
NEC	Aterm WL54AG	NEC	Aterm WR8500N

線端末には DELL Precision 360 を使用した . 無線端末および有線端末の OS には Ubuntu 8.10 (Linux kernel 2.6.18) を利用した . Linux カーネルには提案手法を適用した TCP Reno を組み込み, さらに TCP コネクション情報の取得のために Web100 [16] のパッチを適用した . Web100 はカーネルの TCP/IP プロトコルスタックに TCP コネクションの情報を記録するための命令セットを追加するパッチであり, コネクション単位で輻輳ウィンドウの変化や RTT, 再送タイムアウトの発生回数などの TCP コネクションの情報を低オーバーヘッドで取得が可能となる . 無線端末の無線インターフェースとアクセスポイントには表 1 に示す機器を利用し, 無線端末の無線インターフェースは 1 つの実験の中では同じ種類のもので統一した .

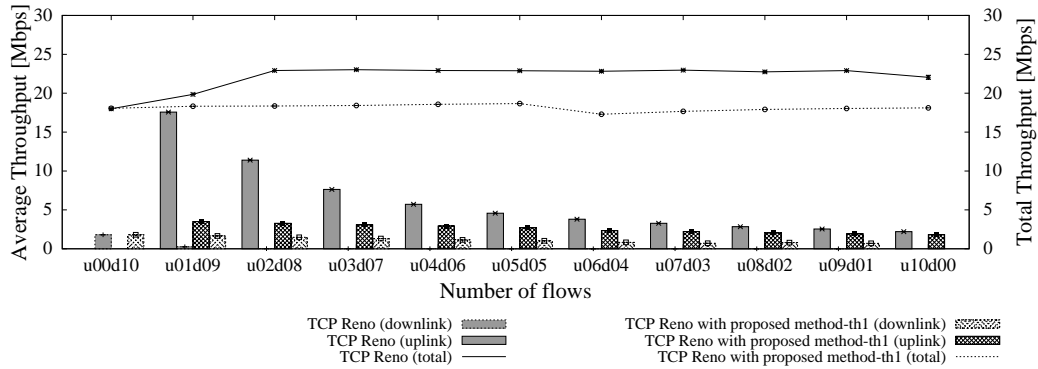
評価実験はバルクデータの転送を想定し, Iperf [17] を用いてトラフィックを生成した . TCP には提案手法を適用した TCP Reno と比較のため提案手法を適用していない TCP Reno を利用した . 1 回の実験時間は 180 秒とし, 各 TCP コネクションは実験開始時に同時に発生させた . TCP 受信側の Delayed ACK は無効にしておき, アクセスポイントにおいて設定できるベンダ独自の無線機能は無効化した . 以上の条件において, 合計 TCP コネクション数が 10 本になるように上下 TCP コネクションの本数を変化させて, それぞれの組合せに対して 10 回ずつ実験を行った . なお, TCP コネクションは無線端末 1 台から 1 本ずつ発生させた .

4.3 実験評価

無線端末に Buffalo 社の無線 LAN カードを利用し, Buffalo 社および NEC 社製のアクセスポイントを用いた場合における, 上下フローそれぞれの平均スループットと合計スループットをそれぞれ図 2(a) および図 2(b) に示す . なお, 横軸の $uxdy$ は上り TCP フローが x 本であり, 下り TCP フローが y 本である場合の結果を表す . スループットは実験開始後 50 秒以降に転送したデータ量を用いて計算し, 提案手法の閾値 thresh_ack_losses は 1 をとした . また, 無線端末に NEC 社の無線 LAN カードを利用した場合は紙面の都合上掲載していないが, 実験結果は図 2 の結果と大きな違いはない . 図 2 から, 提案手法を利用していない場合においては, 上り TCP フローが 1 本でも存在していると上り TCP フローが多く無線帯域を獲得し, 多くの下り TCP フローがほとんど通信できない状態 (以下, 飢餓状態と表現する) になっていることがわかる . 一方で, 提案手法を利用した場合においては, 上り TCP フローの本数および下り TCP フローの本数にかかわらず, 下り TCP フローの獲得できるスループットを大きく改善できていることがわかる . しかし, NEC 社のアクセスポイントを利用した場合 (図 2(b)) においては, 下り TCP フローが飢餓状態に陥いるのを改善できているものの, 提案手法による改善効果が低いことがわかる . これは, NEC 社のアクセスポイントが家庭向けの製品であり, TCP フロー数 10 本に対してアクセスポイントのバッファサイズが小さかったためだと考えられる . また, アクセスポイントの種類に



(a) アクセスポイント: Buffalo WAPS-HP-AM54G54



(b) アクセスポイント: NEC Aterm WR8500N

図2 上下フローそれぞれの平均スループットと合計 (無線 LAN カード: Buffalo WLI-CB-HGHP)

かわらず、上りフローが1本以上存在している場合において、提案手法を利用すると利用しない場合に比べて合計スループットが低下していることがわかる。これは以下の理由によるものであると考えられる。TCPは通常、1つのTCP ACKパケットによって1つのデータパケットの確認応答を行っている。ここで、ウィンドウサイズ分のデータパケットを送信し、TCP ACKパケットの返信を待っている状態を考える。この時、上りTCPフローの場合は1つのTCP ACKパケットがアクセスポイントから無線端末へ送信されると、その無線端末のTCPは1つのデータパケットを送信可能になる。逆に言うと、TCP ACKパケットが返信されなければ、無線端末は新たにデータパケットを送信できない。そのため、MACレベルにおいてはアクセスポイントの送信機会は $1/(n+1)$ であるが、TCPレベルにおいては実質 $1/2$ になる。しかし、提案手法を利用しない場合においては、TCP ACKパケットがアクセスポイントにおいて大量に廃棄されることによって、結果的に1つのTCP ACKパケットにより複数のデータパケットの確認応答が可能となる。この状態においては、無線端末は複数のデータパケットが送信可能となるため、TCPレベルにおけるアクセスポイントの送信機会は $1/(n+1)$ に近づく。このため、複数の無線端末から送信される単位時間当たりのデータパケット数がアクセスポイントから送信される単位時間当たりのTCP ACKパケット数より多くなり、合計スループットが向上する。これに対して、提案手法はTCP ACKパケットの廃棄に対して輻輳制御を行うことにより、本来のTCPの動作であるデータパケットとTCP ACKパケットの1対1対応を実現する。このため、提案手法においては、上記の提案手法を利用しない場合における合計スループットの向

上効果が得られない。以上の理由により、上りTCPフローが存在する場合において、提案手法を利用した場合と利用しない場合では合計スループットに差が生じる。しかし、提案手法を用いない場合におけるこのスループットの向上は、著しい公平性の劣化を伴うものである。

次に、3.章において提案した公平性を指標を利用したSWMの値の変化を図3と図4に示す。なお、無線端末においてはBuffalo社の無線LANカードを利用し、アクセスポイントはBuffalo社のアクセスポイント(図3)とNEC社のアクセスポイント(図4)を利用した。いずれの場合も、提案指標の C にはIEEE 802.11aの最大伝送速度である54 Mbpsを設定し、(5)式に含まれるパラメータ α は1とした。図3(a)および図4(a)より、下りTCPフローのみの場合は提案手法を利用するか否かにかかわらず、公平性はほぼ同等であることがわかる。これは、下りTCPフローのみの場合はアクセスポイントのパツファにおいてTCP ACKパケットが廃棄されないため、提案手法を利用した場合においても提案手法を利用しない場合と同等の動作をするためである。また、Buffalo社のアクセスポイントを利用した場合において、上りTCPフローと下りTCPフローが混在、あるいは、上りTCPフローのみの場合には、提案手法は長い時間間隔における公平性を最大で約180%の改善効果があるだけでなく、短い時間間隔における公平性についても改善できていることがわかる(図3(b)および図3(c))。一方で、NEC社のアクセスポイントを利用した場合においては、提案手法の改善効果が低いことがわかる(図4(b)および図4(c))。これは、NEC社のアクセスポイントにおいては、10本のフローに対してアクセスポイントのパツファサイズが十分でなく、さらに、提案手

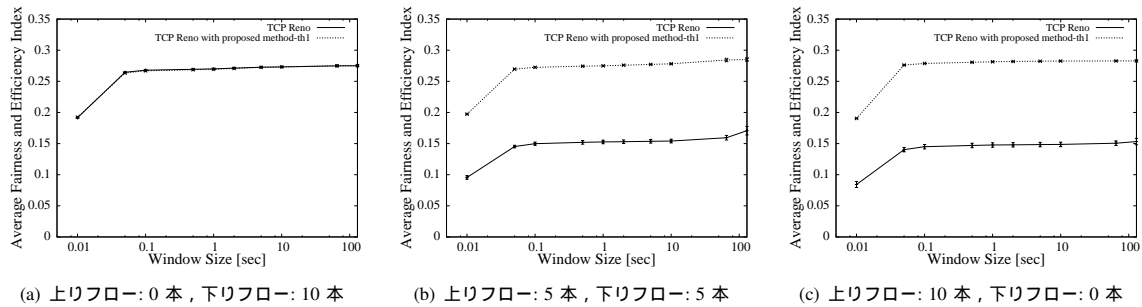


図3 Sliding window method (アクセスポイント: Buffalo WAPS-AM54G54)

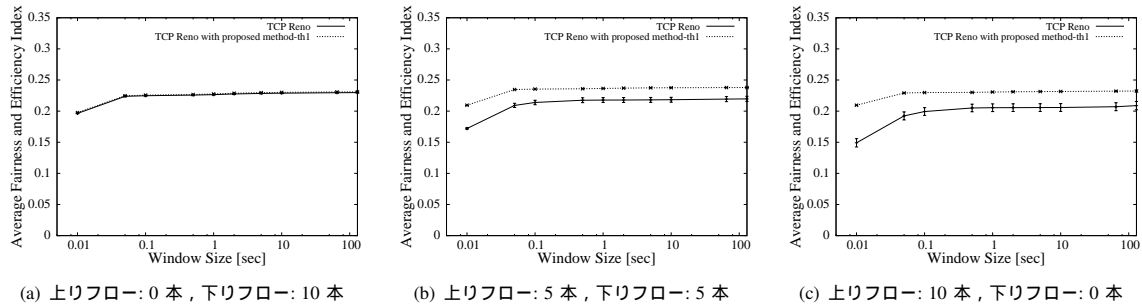


図4 Sliding window method (アクセスポイント: NEC Aterm WR8500N)

法では上述のスループット向上効果が得られないためである。

5. おわりに

本稿では、公平性を評価する指標として、ネットワークのボトルネックリンク帯域を考慮した新しい指標を提案した。提案指標は、ネットワークのボトルネックリンク帯域を基にして公平なスループットを定め、各フローのスループットと公平なスループットとの差を利用することを特徴とする公平性指標である。さらに、実無線 LAN 環境において、我々が提案している TCP フロー間の公平性改善手法の評価を行った。実験評価を通して、提案手法は上り TCP フロー数と下り TCP フロー数にかかわらず、上下フロー間の公平性を改善できることを示した。また、提案手法を適用することにより合計スループットが低下するものの、TCP フローが飢餓状態となるのを回避できることを示した。さらに、提案指標を用いた評価結果より、提案手法が最大で 180% の改善効果がある一方で、合計スループットが低下する場合があることがわかった。今後の予定として、提案手法において合計スループットが低下する問題を改善したい。

文献

- [1] IEEE 802.11b, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications: Higher-Speed Physical Layer Extension in the 2.4 GHz Band. IEEE, Feb. 1999.
- [2] IEEE 802.11g, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications: Further Higher Data Rate Extension in the 2.4 GHz Band. IEEE, 2003.
- [3] IEEE 802.11a, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications: High-speed Physical Layer in the 5 GHz Band. IEEE, Feb. 1999.
- [4] IEEE 802.11n, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications: Enhancements for Higher Throughput. IEEE, 2009.
- [5] IEEE 802.11-2007, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications. IEEE, June 2007.
- [6] S. Pilosof, R. Ramjee, D. Raz, Y. Shavitt, and P. Sinha, "Understanding TCP fairness over wireless LAN," in *Proceedings of IEEE INFO-*

- COM 2003, vol. 2, pp. 863–872, Mar. 2003.
- [7] Y. Fukuda and Y. Oie, "Unfair and inefficient share of wireless LAN resource among uplink and downlink data traffic and its solution," *IEICE Transactions on Communications*, vol. E88-B, pp. 1577–1585, Apr. 2005.
- [8] J. Ha and C.-H. Choi, "TCP fairness for uplink and downlink flows in WLANs," in *Proceedings of IEEE Global Telecommunications Conference 2006*, pp. 1–5, Nov. 2006.
- [9] F. Keceli, I. Inan, and E. Ayanoglu, "TCP ACK congestion control and filtering for fairness provision in the uplink of IEEE 802.11 infrastructure basic service set," in *Proceedings of IEEE International Conference on Communications*, pp. 4512–4517, June 2007.
- [10] 橋本 匡史, 長谷川 剛, 村田 正幸, "無線 LAN 環境における複合型 TCP 輻輳制御手法の性能評価とその改善手法," 電子情報通信学会技術研究報告 NS2008-28, vol. 108, pp. 13–18, July 2008.
- [11] M. Hashimoto, G. Hasegawa, and M. Murata, "Performance evaluation and improvement of hybrid TCP congestion control mechanisms in wireless LAN environment," in *Proceeding of ATNAC 2008*, pp. 367–372, Dec. 2008.
- [12] 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.
- [13] IEEE 802.11e, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications: Medium Access Control (MAC) Quality of Service Enhancements. IEEE, Oct. 2005.
- [14] N. Blefari-Melazzi, A. Detti, I. Habib, A. Ordine, and S. Salsano, "TCP fairness issues in IEEE 802.11 networks: Problem analysis and solutions based on rate control," in *Proceedings of IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 6, pp. 1346–1355, Apr. 2007.
- [15] C. E. Koksall, H. Kassab, and H. Balakrishnan, "An analysis of short-term fairness in wireless media access protocols," in *Proceedings of ACM Sigmetrics 2000*, June 2000.
- [16] M. Mathis, J. Heffner, and R. Reddy, "Web100: Extended tcp instrumentation for research, education and diagnosis," *ACM Computer Communications Review*, vol. 33, pp. 69–79, July 2003.
- [17] A. Tirumala, F. Qin, J. Dugan, J. Ferguson, and K. Gibbs, "Iperf-the TCP/UDP bandwidth measurement tool." available at <http://dast.nlanr.net/Projects/Iperf/>.