

無線 LAN における Compound TCP+ の 輻輳制御方式の検討と評価

織田 弘樹^{1,a)} 久松 潤之^{1,b)} 登尾 啓史^{1,c)}

概要: 現在, 広帯域, 高遅延なネットワーク向けのトランスポート層プロトコルとして, Compound TCP が有力視されている. 我々は, これまでに, 無線 LAN において, Compound TCP が複数のコネクションがデータ転送を行う際に, コネクション間のスループットの公平性が失われることを明らかにした. また, 我々は, この問題を解決する Compound TCP+ を提案した. Compound TCP+ は, Compound TCP ではそれぞれ独立に動作している損失ベースと遅延ベースの輻輳制御を, 真に組み合わせた輻輳制御を行う. さらに, Compound TCP+ の有効性を簡単なシミュレーションにより示した. しかしながら, Compound TCP+ の輻輳制御方式は十分に検討されていない. また, その性能評価は, 簡単なシミュレーションによってのみ行われたのみである. そこで, 本稿では, 無線 LAN における Compound TCP+ の輻輳制御方式の検討, および, その性能評価を行う. シミュレーションによる検討の結果, 無線 LAN において公平性を失うことなく, スループットの劣化を抑える輻輳制御方式を示す. また, 実験ネットワークにおける実験から, Compound TCP+ が無線 LAN において公平性を失うことなく通信することを示す.

キーワード: Compound TCP, 公平性, 無線 LAN, 輻輳制御

Congestion Control Scheme of Compound TCP+ in Wireless LAN

ODA HIROKI^{1,a)} HISAMATSU HIROYUKI^{1,b)} NOBORIO HIROSHI^{1,c)}

Abstract: Recently, Compound TCP is expected that it is the most promising transport layer protocol for high-speed and long-distance networks. In our previous work, We have presented that the loss-based congestion control mechanism performed by Compound TCP does not achieve fairness in throughput. In order to solve this problem, we have proposed Compound TCP+. It decreases the loss window when it anticipates a state where a packet loss may occur, without actual packet loss occurrence. Using simple simulation, we have shown that Compound TCP+ connections have high fairness in wireless LAN. In this paper, we evaluate the congestion control scheme of Compound TCP+ in wireless LAN. Furthermore, we implement Compound TCP+ on a Linux kernel, and evaluate the performance of it in an experiment network environment and show its effectiveness.

Keywords: Compound TCP, Fairness, Wireless LAN, Congestion Control

1. はじめに

Transmission Control Protocol (TCP) は, 現在のインターネットにおいて, 標準的に用いられているトランス

ポート層プロトコルである. しかし, 標準的な TCP である TCP NewReno は, 広帯域, 高遅延なネットワークにおいて, ネットワーク帯域を十分に使いきることができない [1]. そこで, 広帯域, 高遅延なネットワーク向けのトランスポート層プロトコル Compound TCP [2], [3] が提案された. Compound TCP の輻輳制御は, パケットの棄却を輻輳の指標とする損失ベースの輻輳制御と, ラウンド

¹ 大阪電気通信大学
Osaka Electro-Communication University
a) dt11a001@oecu.jp
b) hisamatu@isc.osakac.ac.jp
c) nobori@isc.osakac.ac.jp

トリップ時間を輻輳の指標とする遅延ベースの輻輳制御を組み合わせた輻輳制御である。Compound TCP は、損失ベースの輻輳制御と、遅延ベースの輻輳制御の 2 つの輻輳制御が同時に動作することで、空き帯域を有効に活用するように動作する。また、Compound TCP は、既存の TCP と競合した場合、競合した TCP と公平性を保つ。Compound TCP は、Windows Vista SP1 以降に搭載されており、今後さらに用いられることが考えられる。

一方、TCP には、無線 LAN において、複数のコネクションがデータ転送を行う際に、コネクション間のスループット公平性が失われる問題が発生する [4]。この問題は、無線 LAN で用いられるアクセス制御 Carrier Sense Multiple Access/ Collision Avoidance (CSMA/CA) と TCP の輻輳制御に起因する。CSMA/CA では、通信を開始する端末は、他の端末が通信していないかを確認し、その後、送信権を得てからパケットを送信する。この送信権は、すべての無線端末が公平に取得できる。しかし、この公平性が原因で、アクセスポイントにおいてバッファ溢れが発生し、大量の ACK パケットが棄却され、その結果、コネクション間にスループットの公平性が失われる。

これまでに、無線 LAN において、コネクション間のスループット公平性を改善する手法が提案されている [5], [6], [7]。[5] では、アクセスポイントの MAC 層のプロトコルを改良する事によって、コネクション間のスループットが不公平になる問題を改善している。さらに、[6] では、アクセスポイントのバッファ内パケット数に応じて、上りフローのデータパケットを、確率的に棄却する手法を提案している。しかしながら、これらの手法は、アクセスポイントに変更を加える必要がある。これは、ネットワークの中で複雑な制御を行わない、End-to-End の原則に反する。さらに、アクセスポイントの制御機構は、ハードウェア上に実装されているため、新たにアクセスポイントに対して修正を加えることは困難である。したがって、これらの手法は、現実的ではない。また、ACK パケットの棄却を輻輳の指標とする輻輳制御手法 [7] が提案されている。これは、End-to-End の原則に沿う上に、送信側の TCP を変更するのみで導入する事が可能である。しかしながら、スループットが低下する問題がある。

また、Compound TCP の研究は、現在までに複数行われている [8], [9]。[8] では、広帯域、高遅延ネットワークにおいて、Compound TCP が高いリンク利用率を示すこと、また、TCP Reno と公平に帯域を共有することが、シミュレーションおよび、実ネットワーク上の実験が示されている。また、[9] では、Compound TCP の遅延ウィンドウの閾値である γ を自動調整する手法を提案し、その有効性をシミュレーションおよび実ネットワークにおいて示している。しかし、これらの研究では、広帯域、高遅延ネットワークを対象としているか、有線ネットワークを対象とし

ており、無線 LAN における Compound TCP の振る舞いは対象とされていない。

我々は、[10] において、無線 LAN において、Compound TCP が複数のコネクションがデータ転送を行う際に、コネクション間のスループット公平性が失われることを明らかにした。この問題は、無線 LAN において、Compound TCP は、損失ベースの輻輳制御のみで動作するためである。1 つのアクセスポイントに対して、接続される端末が多く存在する場合、アクセスポイントのバッファには、大量の ACK パケットがバッファリングされ、ラウンドトリップ時間が大きくなる。そのため、Compound TCP の遅延ベースの輻輳制御は、輻輳状態であるとして動作しない。したがって、無線 LAN において、Compound TCP は、損失ベースの輻輳制御のみが動作する。Compound TCP の損失ベースの輻輳制御は、TCP と同様の輻輳制御であるため、無線 LAN において、TCP と同様の問題が発生する。

さらに、我々は、無線 LAN において、Compound TCP のコネクション間のスループット公平性が失われる問題を解決する Compound TCP+ を提案した [10]。Compound TCP+ は、Compound TCP ではそれぞれ独立に動作している損失ベースと遅延ベースの輻輳制御を、真に組み合わせた輻輳制御を行う。具体的には、遅延ベースの輻輳制御において、軽い輻輳と考えられるとき、例えば、損失ベースの輻輳制御が輻輳を検知していないくても、損失ベースの輻輳制御で用いる損失ウィンドウを減少させる。これにより、Compound TCP+ は、アクセスポイントのバッファ溢れを防ぎ、その結果、コネクション間の不公平性を改善する。しかし、Compound TCP+ の損失ウィンドウの動作は十分に検討されていない。また、その性能評価は、簡単なシミュレーションによるのみ行われたのみである。そこで、本稿では、無線 LAN における Compound TCP+ の輻輳制御方式の検討、および、その性能評価を行う。シミュレーションによる検討の結果、無線 LAN において公平性を失うことなく、スループットの劣化を抑える輻輳制御方式を示す。また、実験ネットワークにおける実験から、Compound TCP+ が、無線 LAN において公平性を失うことなく通信することを示す。

本稿の構成は以下の通りである。まず、2 章では、Compound TCP の輻輳制御を説明し、その後、無線 LAN において、Compound TCP コネクションの公平性が失われる原因を説明する。3 章では、検討の対象となる Compound TCP+ の輻輳制御方式を述べる。4 章では、シミュレーションによる Compound TCP+ の輻輳制御方式を検討し、さらに、実験ネットワークにおける Compound TCP+ の性能評価を行う。最後に 5 章では、本論文のまとめと今後の課題を述べる。

2. Compound TCP

本章では、まず、Compound TCP の輻輳制御を説明する。次に、無線 LAN において、Compound TCP のコネクション間のスループット公平性が失われる原因を説明する。

2.1 Compound TCP の輻輳制御

Compound TCP は、パケット棄却を輻輳の指標とする損失ベースの輻輳制御と、ラウンドトリップを輻輳の指標とする遅延ベースの輻輳制御を組み合わせた、ウィンドウ型の輻輳制御を行う。1 ラウンドトリップ時間にネットワークに送出するパケット数、送出ウィンドウ $swnd$ を次式から求める。

$$swnd = cwnd + dwnd$$

ただし、 $cwnd$ は、損失ベースの輻輳制御で用いられる損失ウィンドウ、そして、 $dwnd$ は、遅延ベースの輻輳制御で用いられる遅延ウィンドウである。Compound TCP は、損失ベースの輻輳制御と、遅延ベースの輻輳制御をそれぞれ独立に同時に動作させ、それぞれの制御においてウィンドウを決定し、その和をもって、実際にパケットを送出する際に用いるウィンドウを決定する。以下では、損失ベース、遅延ベースの輻輳制御をそれぞれ説明する。

損失ベースの輻輳制御は、スロースタートフェーズと輻輳回避フェーズの 2 つのフェーズから構成されている。損失ベースの輻輳制御は、各動作フェーズにおいて ACK パケットを受信する毎に、損失ウィンドウを次式に従い決定する。

$$cwnd = \begin{cases} cwnd + 1 & (\text{slow start phase}) \\ cwnd + \frac{1}{swnd} & (\text{congestion avoidance phase}) \end{cases}$$

Compound TCP は、スロースタートフェーズでは、指数的に損失ウィンドウを増加させる。また、輻輳回避フェーズでは、線形的に損失ウィンドウを増加させる。

また、パケット棄却を検出したとき、Compound TCP は、次式に従って損失ウィンドウを減少させる。

$$cwnd = \begin{cases} \frac{cwnd}{2} & (\text{duplicate ACKs}) \\ 1. & (\text{timeout}) \end{cases}$$

重複 ACK の受信によりパケット棄却を検出したとき、ネットワークに軽度の輻輳が発生したと判断して、Compound TCP は、損失ウィンドウを半減する。また、タイムアウトによりパケット棄却を検出したとき、ネットワークに重度の輻輳が発生したと判断し、Compound TCP は、損失

ウィンドウを 1 に減少させる。このように、Compound TCP の損失ベースの輻輳制御は、TCP と同様の輻輳制御を行う。

遅延ベースの輻輳制御は、損失ベースの輻輳制御と同様に、スロースタートフェーズと輻輳回避フェーズのそれぞれのフェーズによって動作が異なる。遅延ベースの輻輳制御は、スロースタートフェーズ時において遅延ウィンドウの増減を行わない。輻輳回避フェーズ時における遅延ウィンドウの増減方法は、以下の手順で計算される。まず、ネットワーク中に滞留しているパケット数の推測値 $Diff$ を次式から求める。

$$Diff = \left(\frac{swnd}{baseRTT} - \frac{swnd}{RTT} \right) \cdot baseRTT \quad (1)$$

ただし、 $baseRTT$ は、ラウンドトリップ時間の最小値、 RTT は、現在のラウンドトリップ時間である。この $Diff$ を用いて、遅延ウィンドウを $1RTT$ 毎に次式から求める。

$$dwnd = \begin{cases} dwnd + (\alpha \cdot swnd^k - 1)^+ & (Diff < \gamma) \\ (dwnd - \zeta \cdot Diff)^+ & (Diff \geq \gamma) \end{cases}$$

ただし、 α 、 β 、 k 、 ζ は、Compound TCP の制御パラメータであり、 γ は、ネットワークの輻輳状態を判断する閾値である。遅延ベースの輻輳制御は、 $Diff$ が γ を下回る場合、ネットワークに未使用帯域があると判断し、遅延ウィンドウを増加させる。 $Diff$ が γ を上回る場合、ネットワークは輻輳状態であると判断し、遅延ウィンドウを減少させる。

パケット棄却を検出したとき、遅延ウィンドウは次式で決定される。

$$dwnd = \begin{cases} (swnd * (1 - \beta) - cwnd/2)^+ & (\text{duplicate ACKs}) \\ 0 & (\text{timeout}) \end{cases}$$

重複 ACK の受信によりパケット棄却を検出したとき、ネットワークに軽度の輻輳が発生したと判断する。この時、遅延ウィンドウを約 $\beta dwnd$ (ただし $0 < \beta < 1$) だけ減少させる。また、タイムアウトによりパケット棄却を検出したとき、ネットワークに重度の輻輳が発生したと判断し、Compound TCP の遅延ベースの輻輳制御は、遅延ウィンドウを 0 とする。

2.2 無線 LAN における Compound TCP の公平性

無線 LAN では、パケットの衝突を回避するために、CSMA/CA によるアクセス制御が行われる。CSMA/CA では、パケットを送出する端末は、まず、他の端末が通信の有無を確認する。その後、送信権を得てからパケットを送信する。各無線端末およびアクセスポイントは、公平に

送信権を得ることができる。ここで、多数の無線端末がアクセスポイントを経由して受信ホストへ、Compound TCPを用いてデータ転送する場合を考える。1つのアクセスポイントに対して接続される無線端末数を n とした時、送信権は公平に得られるため、各無線端末およびアクセスポイントが、送信機会を得る確率は $1/(n+1)$ となる。しかし、上下フロー単位で考えた場合、上りフローには n 台の無線端末が存在するので、上りフローが送信機会を得る確率は $n/(n+1)$ となる。一方、下りフローは、無線端末はアクセスポイント 1 台のみであるため $1/(n+1)$ となる。このように、無線端末数の増加に伴って、下りフローが送信機会を得る確率が減少する。そのため、無線端末が増加するほど、アクセスポイントが送信機会を得る確率が低くなり、ACK パケットを送信することができないことが多くなる。その結果、アクセスポイントのバッファに大量の ACK パケットがバッファリングされる。

Compound TCP は、ネットワーク中の滞留パケット数が多く存在する、すなわち、ネットワークが輻輳状態である場合、損失ベースの輻輳制御のみが送出ウィンドウを決定する [10]。そのため、アクセスポイント内のバッファに、多くの ACK パケットが存在する無線 LAN において、Compound TCP は、損失ベースの輻輳制御のみが動作する。損失ベースの輻輳制御は、TCP と同様にパケットの棄却を検出するまで、損失ウィンドウを増加し続ける。その結果、アクセスポイントのバッファが溢れ、ACK パケットが棄却される。

Compound TCP は、重複する ACK パケットを 3 回受信した場合、パケット棄却が発生したと判断し、高速再送を行う。高速再送では、再送タイマーのタイムアウトまで待たずに、棄却されたパケットを再送する。アクセスポイントにおいてバッファ溢れが発生している場合、送出ウィンドウが小さいコネクションは、高速再送に必要な重複 ACK を受信することが困難になる。パケット棄却が発生し、かつ、十分な重複 ACK を受信することができなかった場合、そのコネクションはタイムアウトとなる。

Compound TCP は、タイムアウトが発生した場合、損失ウィンドウを 1 にまで減少させ、遅延ウィンドウを 0 とする。従って、送出ウィンドウは 1 となる。送出ウィンドウが非常に小さい値になることで、パケット棄却が発生した時、そのコネクションは、再びタイムアウトとなる可能性が高い。よって、1 度タイムアウトが発生したコネクションは、送出ウィンドウを増加させることができず、スループットは非常に低くなる。一方、タイムアウトが発生せず、送出ウィンドウが大きいコネクションは、送出ウィンドウが小さいコネクションに比べて、パケット棄却が発生した場合でも高速再送となる確率が高い。その結果、送出ウィンドウの差が大きくなり、スループットの差が大きくなる。このようにして、コネクション間でスループット

の公平性が失われる。

3. Compound TCP+ の輻輳制御

Compound TCP+ は、遅延ベースの輻輳制御によって、軽い輻輳を検出したときに、損失ベースの輻輳制御で用いる損失ウィンドウの動作を、Compound TCP から変更する。具体的には、Compound TCP+ は、遅延ベースで用いられる、遅延ウィンドウが 0 である場合、ネットワーク中に多くのパケットが滞在しており、軽度の輻輳状態であると考えられる。この場合、Compound TCP では、パケット棄却が発生しない限り、損失ウィンドウを増加させ続ける。その結果、さらに輻輳の悪化が進み、公平性が失われる。そこで、Compound TCP+ は、遅延ウィンドウが 0 である時、損失ウィンドウを増加させない。遅延ウィンドウが 0 となるような、ネットワークが軽度の輻輳状態にある場合において、たとえ、適切に ACK パケットを受信していようとも、損失ウィンドウを増加させないことによって、Compound TCP+ は、アクセスポイントのバッファ溢れを防ぎ、公平性を維持する。

本稿では、遅延ウィンドウが 0 となったときの損失ウィンドウの動作が、以下の 3 つの式で与えられる場合を検討する。

$$cwnd = \lceil cwnd * 2/3 \rceil \quad (2)$$

$$cwnd = \lceil cwnd - 1/2 \rceil \quad (3)$$

$$cwnd = cwnd \quad (4)$$

ここで、 $\lceil x \rceil$ は、 x 以上の最小の整数である。 $dwnd = 0$ である場合、ネットワークは、許容量の限界に近い状況と考えられる。そのため、 $dwnd = 0$ である時、損失ウィンドウを増加させるべきではない。そこで、 $dwnd = 0$ である時、損失ウィンドウを乗算的に減少 (式 (2))、線形的に減少 (式 (3))、一定値 (式 (4)) とする、それぞれの場合を検討する。 $dwnd = 0$ である場合、ネットワークは、重複 ACK によるパケット棄却の検出が発生するような輻輳状態ではない。そこで、損失ウィンドウを乗算的に減少させる場合、減少後の損失ウィンドウは、重複 ACK によるパケット棄却検出時よりも大きい、 $cwnd \times 2/3$ とする (重複 ACK によるパケット棄却検出時の損失ウィンドウは $cwnd \times 1/2$ である)。また、損失ウィンドウを線形的に減少させる場合における、損失ウィンドウの減少幅は、1RTT 毎に $-1/2$ の減少とした。

4. 性能評価

本章では、まず、シミュレーションにより、Compound TCP+ の輻輳制御方式を検討する。その後、実験ネットワークにおいて、Compound TCP+ の性能評価し、その有効性を示す。

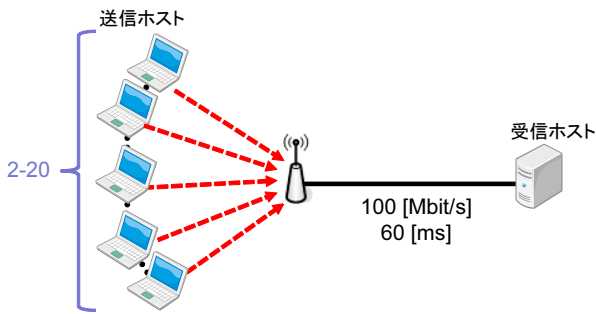


図 1 シミュレーションモデル
 Fig. 1 Simulation model

表 1 シミュレーションモデルの設定
 Table 1 Parameters used in simulations

ネットワーク環境	
無線端末数	2-20
往復伝搬遅延	120 [ms]
有線帯域幅	100 [Mbit/s]
パケットサイズ	1500 [byte]
無線 LAN パラメータ	
無線 LAN 規格	IEEE 802.11g
Slot time	9 [μ s]
SIFS	16 [μ s]
DIFS	34 [μ s]
CW _{min}	15
CW _{max}	1023
Data rate	54 [Mbit/s]

4.1 Compound TCP+ の輻輳制御方式の検討

Compound TCP+ の輻輳制御方式の検討をシミュレーションにより行う。シミュレーションは ns-2 [11] を用いた。図 1 にシミュレーションに用いたネットワークモデルを示す。無線 LAN 規格は、IEEE 802.11g とし、パラメータは Slot Time は 9 [μ s]、SIFS は 16 [μ s]、DIFS は 34 [μ s]、CW_{min} は 15、CW_{max} は 1023、Data Rate は 54 [Mbit/s] に設定した。アクセスポイントと受信端末間の帯域は 100 [Mbit/s]、遅延は 60 [ms]、無線端末数は 2 から 20 台、パケットサイズは 1500 [Byte]、アクセスポイントのバッファサイズは 100 [packet] とした。これらの条件で 500 秒間のシミュレーションを 10 回行い、最初の 100 秒を除いた後半 400 秒のシミュレーション結果の平均値を用いて評価する。また、比較のために Compound TCP のシミュレーションも行う。表 1 に、シミュレーションモデルの設定をまとめる。

公平性の指標として Fairness Index [12] を用いる。 n をサンプル数、 $x_i (1 \leq i \leq n)$ を n 個のサンプル値とすると、 n 個のサンプル値の公平性を表す Fairness Index f は、以下の式で与えられる

$$f = \frac{(\sum_{i=1}^n x_i)^2}{n \sum_{i=1}^n x_i^2} \quad (1 \leq i \leq n)$$

f は 0 以上 1 以下の値を取り、1 に近い値ほど公平性が

高い。

図 2 に、端末数が変化した場合の Compound TCP および Compound TCP+ の (a) Fairness Index, (b) 平均ラウンドトリップ時間、そして、(c) 合計スループットを、それぞれ示す。図 2(a) から、1 つのアクセスポイントに対して接続される端末が少ない時、Compound TCP および Compound TCP+ 共に、高い公平性を持つことがわかる。しかし、端末の増加に伴って、Compound TCP の公平性が低下することがわかる。一方、Compound TCP+ は、損失ウィンドウを式 (4) で定める場合を除いて、高い公平性を達成することが分かる。これは、損失ウィンドウが減少したことで、送出ウィンドウが小さくなり、アクセスポイント内のバッファを埋め尽くさなくなる。その結果、Compound TCP+ は高い公平性を達成したと考えられる。また、損失ウィンドウを式 (4) で定めた場合、端末数の増加に伴って公平性が若干悪化することがわかる。これは、 $Diff$ がコネクション数が増加するほど小さくなるためである。 $Diff$ は、送出ウィンドウ、現在のラウンドトリップ時間、最小のラウンドトリップ時間から決定される。しかし、帯域を最大限に利用した場合、1 コネクションあたりの送出ウィンドウは、コネクション数が増加するほど小さくなる。従って、 $Diff$ はコネクション数が増加するほど小さくなり、たとえ、アクセスポイントに大量のパケットがバッファリングされていても、 $Diff$ が γ を下回る場合がある。その結果、アクセスポイントにバッファリングされているパケット数に関わらず、損失ウィンドウが増加する場合がある。そのため、損失ウィンドウを一定に保つ制御を行った場合、アクセスポイントのバッファを埋め尽くし、その結果、公平性が低下する。

図 2(b) から、Compound TCP+ の平均ラウンドトリップ時間は、Compound TCP と比較して非常に低いことがわかる。Compound TCP はパケット棄却を検出するまで、損失ウィンドウを増加させ続ける。送出ウィンドウが増加するほど、アクセスポイントのバッファには、多くのパケットが蓄積する。そのため、Compound TCP の平均ラウンドトリップ時間は、非常に大きくなる。ラウンドトリップ時間が非常に大きいことは、単なるファイル転送のアプリケーションでは、問題とならないが、インタラクティブなアプリケーションでは、非常に問題となる。一方、Compound TCP+ は、ネットワークの許容量の限界に近いと考えられる時、アクセスポイント内のバッファを埋め尽くさないように制御する。その結果、Compound TCP+ のラウンドトリップ時間は小さくなる。

図 2(c) から、Compound TCP+ の合計スループットは、Compound TCP の合計スループットと比較して、低いことがわかる。これは、Compound TCP は、パケット棄却が発生するまで損失ウィンドウサイズを増加させる。一方、Compound TCP+ は $dwnd = 0$ となる場合、損失ウィンド

表 2 実験ネットワークの設定

Table 2 Parameters used for performance evaluations in experimental network

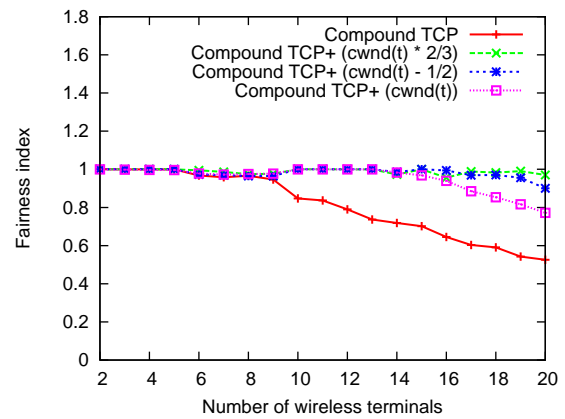
無線端末数	2-10
有線帯域	100 [Mbit/s]
往復伝搬遅延	120 [ms]
無線 LAN 規格	IEEE 802.11a
無線アクセスポイント	BUFFALO WAPM-APG300N
無線 LAN カード	BUFFALO WLI-CB-HGHP
γ	30

ウを減少または一定に保つ．そのため，Compound TCP+ の合計スループットが Compound TCP の合計スループットと比較して低くなったと考えられる．また，無線端末数が少ない時，Compound TCP+ の合計スループットが，一定となっていることがわかる．これは，Compound TCP+ は，ネットワーク中に滞留するパケット数が γ 以下となるように，送信レートを制御するためであると考えられる．以上の結果から，損失ウィンドウの減少が起こるような，ネットワーク中に滞留しているパケットが多く存在する状況においては，線形的に損失ウィンドウを減少させる，式 (3) が最適であると考えられる．

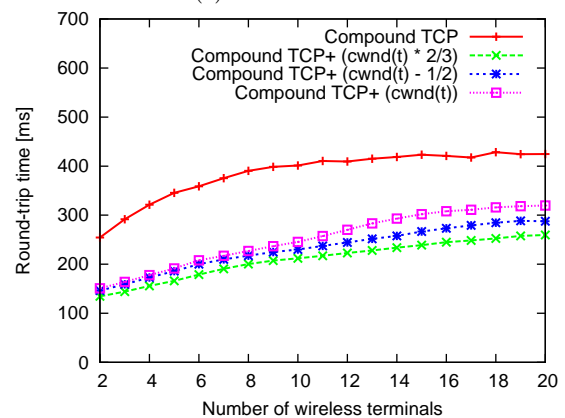
4.2 実験ネットワークにおける Compound TCP+ の評価

次に，Compound TCP+ を Linux カーネル 3.0.0 上に実装し，実験ネットワークにおける Compound TCP+ を性能評価する．図 3 に，実験ネットワークを示す．実験ネットワークは，送信側ホストとなる 2 から 10 台の無線端末，1 台のアクセスポイント，Dummynet がインストールされた計算機，1 台の受信ホストから構成される．アクセスポイントと受信ホスト間は，100 [Mbit/s] の Ethernet で接続されている．また，アクセスポイントと受信ホスト間は，Dummynet を用いて 60 [ms] の遅延を発生させている．無線 LAN 規格は IEEE 802.11a を用いた．アクセスポイントには，BUFFALO 社製 WAPM-APG300N，また，無線端末の無線 LAN カードには，BUFFALO 社製 WLI-CB-HGHP を使用した．実験では，各無線端末が同時に受信ホストに対してトラフィックを発生させる．トラフィック生成には Iperf を用いた．1 回 150 秒間の計測を 20 回行い，実験開始 60 秒後から 60 秒間の結果を用いる．Compound TCP+ は， γ を 30 とし，遅延ウィンドウが 0 である場合，損失ウィンドウを式 (3) で，決定する．また，比較のために Compound TCP を用いた場合の実験も行う．表 2 に，実験ネットワークの設定をまとめる．

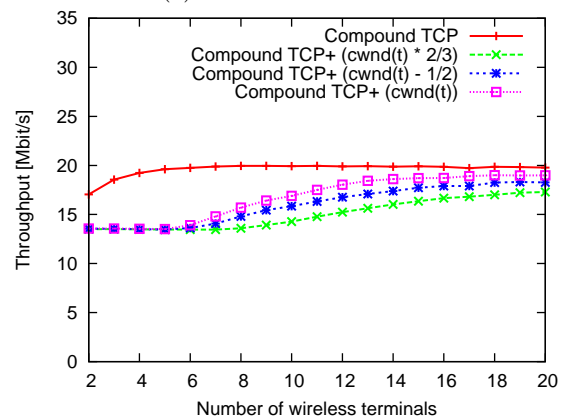
図 4 に，端末数が変化した場合の Fairness Index および，平均ラウンドトリップ時間，合計スループットを，それぞれ示す．図 4(a) から，Compound TCP の Fairness Index は，無線端末数の増加に伴い徐々に低下し，公平性



(a) Fairness Index



(b) ラウンドトリップ時間



(c) 合計スループット

図 2 シミュレーション結果

Fig. 2 Simulation results

が悪化していることがわかる．それに対して，Compound TCP+ は，無線端末が増加した場合でも，Fairness Index は低下せず，公平性を保った状態で通信することが可能であることがわかる．Compound TCP は，アクセスポイントにバッファリングされているパケット数に関わらず，損失ウィンドウを増加させる．そのため，アクセスポイントのバッファを埋め尽くし，公平性が低下したと考えられる．また，Compound TCP+ は， $dwnd = 0$ となる軽度の輻輳時に，損失ウィンドウが減少したことで，送出ウィンドウが小さくなり，アクセスポイント内のバッファを埋め尽さなくなった．その結果，Compound TCP+ は高い公平

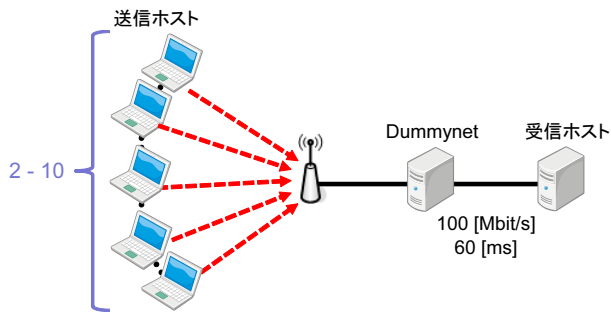


図 3 実験ネットワーク

Fig. 3 Experimental network environment

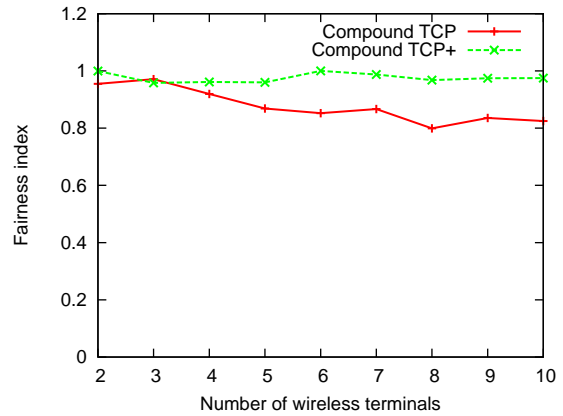
性を達成したと考えられる。

次に、図 4(b) から、Compound TCP+ の平均ラウンドトリップ時間は、シミュレーションによる評価と同様に、Compound TCP と比較して非常に低い事がわかる。これは、Compound TCP はパケット棄却を検出するまで、損失ウィンドウを増加させ続ける。そのため、アクセスポイントのバッファには、多くのパケットが蓄積した結果、平均ラウンドトリップ時間は、非常に高くなる。また、Compound TCP+ は、ネットワークの許容量の限界に近いと考えられる時、アクセスポイント内のバッファを埋め尽くさないように制御する。Compound TCP+ がバッファを埋め尽くしていないように制御していることは、Compound TCP+ のラウンドトリップ時間が、Compound TCP と比較して低いことからわかる。

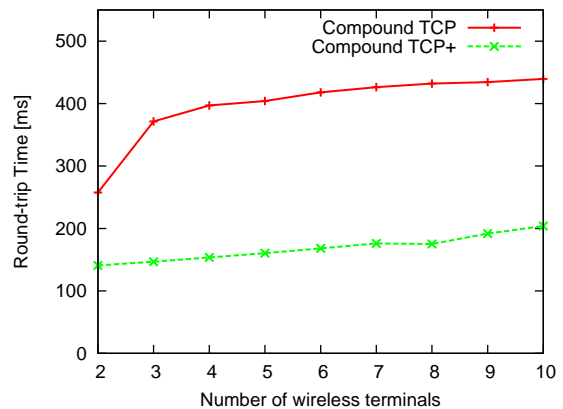
また、図 4(c) から、シミュレーション結果と異なり、Compound TCP+ の合計スループットは、Compound TCP の合計スループットと、ほぼ等しいことがわかる。これは次のように説明できる。実験ネットワークでは、シミュレーションよりも、平均ラウンドトリップ時間が小さい。すなわち、ネットワークの滞留パケット数が少ない。これは実験ネットワークでは、シミュレーションに比べて、アクセスポイントでのパケットの処理時間が短いためと考えられる。ネットワーク中の滞留パケットが少ないとき、損失ベースの輻輳制御は、ネットワークのリンク、ルータのバッファをすべて埋め尽くそうとするどん欲な制御であるので、損失ウィンドウは大きくする。その結果、Compound TCP+ の合計スループットは、シミュレーション結果よりも高くなったと考えられる。以上の結果より、無線 LAN において、Compound TCP+ は、バッファを埋め尽くさない制御を行う事によって、スループットが低下することなく、高い公平性を維持することが可能であることを示した。

5. まとめと今後の課題

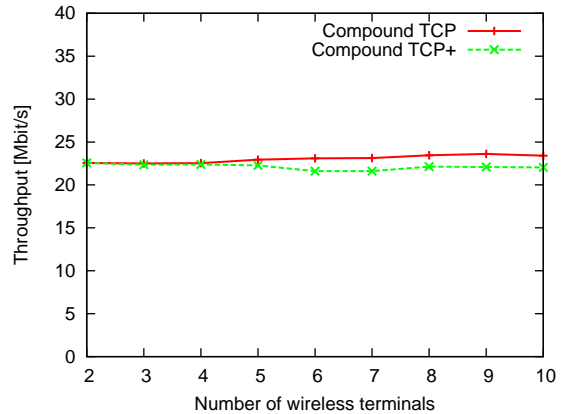
本稿では、無線 LAN において、Compound TCP のコネクション間公平性を改善する Compound TCP+ の輻輳制御方式を検討し、さらに、実験ネットワークにおいて、Compound TCP+ を評価した。シミュレーションによる



(a) Fairness Index



(b) 平均ラウンドトリップ時間



(c) 合計スループット

図 4 実験結果

Fig. 4 Experimental results

検討の結果、結果、損失ウィンドウを、乗算的に減少するように定めた場合、高い公平性を得られることがわかった。しかし、損失ウィンドウの減少幅が大きいため、スループットは低下する。そのため、 $dwnd = 0$ 時における損失ウィンドウ削減方法には、線型的に損失ウィンドウを減少するように定めることによって、公平性を維持しつつ、スループットの低下を抑えられることを示した。また、実験ネットワークにおける評価の結果、無線 LAN において、Compound TCP+ は、高いスループットを得ること、また、高い公平性を維持することを示した。

現在、Compound TCP+ と同様に、送信側となる無線

端末の輻輳制御を変更することによって、無線 LAN において、コネクション間のスループット公平性を改善する [7] の手法との比較評価に取り組んでいる。また、本稿では、実験ネットワークにおける評価では、無線端末数は最大で 10 台であった。公衆無線 LAN サービスなど、実ネットワークでは、それ以上の端末が 1 つのアクセスポイントに対して接続されると考えられる。そこで、無線端末数が多数存在する場合における、Compound TCP+ の性能評価も行う予定である。

参考文献

- [1] Katabi, D., Handley, M. and Rohrs, C.: Congestion control for high bandwidth-delay product networks, *Proceedings of ACM SIGCOMM 2002*, pp. 89–102 (2002).
- [2] Tan, K., Song, J., Zhang, Q. and Sridharan, M.: Compound TCP: A Scalable and TCP-Friendly Congestion Control for High-speed Networks, *Proceedings of PFLDnet 2006* (2006).
- [3] Tan, K., Song, J. and Zhang, Q.: A Compound TCP Approach for High-speed and Long Distance Networks, *Proceedings of IEEE INFOCOM 2006*, pp. 1–12 (2006).
- [4] Pileosof, S., Ramjee, R., Raz, D., Shavitt, Y. and Sinha, P.: Understanding TCP fairness over Wireless LAN, *Proceedings of IEEE INFOCOM 2003*, pp. 863–872 (2003).
- [5] Abeysekera, B. A. H. S., Matsuda, T. and Takine, T.: Dynamic Contention Window Control to Achieve Fairness Between Uplink and Downlink Flows in IEEE 802.11 WLANs, *Proceedings of IEEE WCNC'07*, pp. 2109–2114 (2007).
- [6] Hirano, Y. and Murase, T.: Uplink TCP Traffic control with monitoring Downlink Buffer for Throughput Fairness over Wireless LANs, *Proceedings of PIMRC 2009*, pp. 737–741 (2009).
- [7] Hashimoto, M., Hasegawa, G. and Murata, M.: A Transport-Layer Solution for Alleviating TCP Unfairness in a Wireless LAN Environment, *IEICE Transactions on Communications*, Vol. E94-B, pp. 765–776 (2011).
- [8] J.Leith, D., Andrew, L. L. H., Quetchenbach, T. and Shorten, R. N.: Experimental Evaluation of Delay/Loss-based TCP Congestion Control Algorithms, *Proceedings of PFLDnet 2008* (2008).
- [9] Tan, K., Song, J., Zhang, Q. and Sridharan, M.: CTCP-TUBE: Improving TCP-Friendliness Over Low-Buffered Network Links, *Proceedings of PFLDnet 2008* (2008).
- [10] Oda, H. and Hisamatsu, H.: Compound TCP+ for Fairness Improvement among Compound TCP Connections in a Wireless LAN, *Proceedings of IEEE 2010 International Communication Quality and Reliability Workshop*, pp. 1–6 (2010).
- [11] : The network simulator – ns2, SAMAN, CONSER and ACIRI (online), available from <http://www.isi.edu/nsnam/ns/> (accessed 2012-04-09).
- [12] Jain, R.: Throughput fairness index: An explanation, *ATM Forum Contribution 99-0045* (1999).