

バックボーンルータにおける RED の動的閾値制御方式

長谷川 剛 板谷 夏樹 村田 正幸

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 1-30

TEL: 06-6850-6616, FAX: 06-6850-6589

E-mail: {hasegawa, n-itaya, murata}@ics.es.osaka-u.ac.jp

あらまし インターネット利用者の急激な増加にともない、バックボーンルータにおけるフロー数が増加している。その結果、収容フロー数の多いボトルネックリンクでは、TCP フロー間の公平性が悪化することが指摘されている。ボトルネックリンクでの TCP の公平性を改善するための一つの方法として、RED (Random Early Detection) ルータを用いることが有効であると言われているが、フロー数が 1000 を越えるような場合の RED の評価はこれまで行われていない。そこで本稿では、まずフロー数が非常に多い環境における RED ルータと従来の TD (Tail-Drop) ルータの性能を比較評価する。その結果、パラメータ設定が適切な場合は、RED の公平性は TD に対して優れているが、パラメータ設定が不適切な時には RED の性能が TD よりも劣化する場合があることを示す。このことから、RED の性能を十分に発揮させるためには、パラメータ設定を正しく行うことが重要であると言える。そこで本稿本では、RED のパラメータをルータの輻輳状況に応じて動的に変化させ、ネットワーク状況の変化に対応する動的パラメータ設定方式である dt-RED (RED with dynamic threshold control)方式を提案し、性能評価を行う。

キーワード TCP (Transmission Control Protocol)、TailDrop、RED (Random Early Detection)、閾値、公平性

The dynamic threthold control algorithm of RED for thousands of TCP flows

Go Hasegawa Natsuki Itaya Masayuki Murata

Cybermedia Center, Osaka University

1-30, Machikaneyama, Toyonaka, Osaka 560-0043, Japan

TEL: +81-6-6850-6616, FAX: +81-6-6850-6589

E-mail: {hasegawa, n-itaya, murata}@ics.es.osaka-u.ac.jp

Abstract In this paper, we first investigate the performance of RED and the traditional TD (Tail-Drop) routers when there are more than 1000 TCP connections in the network, especially in term of fairness among connections. The result is that RED can achieve better fairness than TD when its control parameters are appropriately tuned according to the network condition. However, when the parameters are not regulated properly, the performance of RED seriously degrades. That is, for the effective usage of RED, the control parameters must be set carefully. However, it is very difficult because the network condition varies largely, especially when the number of accommodated connections is large. In this paper, therefore, we propose dt-RED (RED with dynamic threshold control), which dynamically regulates the RED parameters according to the observed behavior of the RED queue. We confirm the effectiveness of the proposed algorithm through some simulation experiments, and the results show that it can provide better fairness than the original RED, and TD routers, without careful setting of the parameters.

Keyword TCP (Transmission Control Protocol)、TailDrop、RED (Random Early Detection)、Threshold、Fairness

1 はじめに

インターネットにおける輻輳の原因や輻輳制御に関してはさまざまな研究が行われている。なかでも、現在のインターネットでのトラヒックの多くの部分を占めるTCP (Transmission Control Protocol) [1]の性能向上に関する研究が盛んに行われている。特に、インターネット利用者の急速な増加にともなうトラヒックの増加、フロー数の増加といった問題点を背景として、現在用いられているTCPの問題点を指摘し、その改善方式が多く提案されている。また、TCPの輻輳制御方式の改善に関する研究と並んで、ルータでのフロー間の公平性や、スループットを向上させるためのさまざまルータバッファ制御方式が提案されている [2-4]。それらの制御方式の中で、1993年に文献 [5] において提案されたRED (Random Early Detection) 方式が、オーバーヘッドが小さく、Tail Drop方式に比べて高いスループットを維持し、フロー間の公平性を改善できるといわれており、RED方式についてさまざまな研究が行われている [6-11]。しかし、これらの研究のほとんどは、ルータでの収容コネクション数として1~100本程度を想定しており、フロー数が1000を越えるようなバックボーンルータでRED方式を使用した場合の性能評価はこれまで行われていない。また、これらの検討の多くはボトルネックリンクの利用率、及びTCPコネクションのスループットに着目しており、フロー間の公平性の観点からの評価はほとんど行われていない。

そこで本稿ではまず、フロー数が非常に多いネットワーク環境において、REDルータとインターネット上で従来用いられているTail Dropルータとの性能比較評価を行う。評価に際しては、特にコネクション間の公平性に着目する。その結果、RED方式に必要な制御パラメータであるパケット廃棄確率や閾値等の設定が適切に行われている場合は、RED方式はTail Drop方式に対して優れた公平性を示すが、制御パラメータの設定が適切でない場合には、RED方式の性能はTail Drop方式のそれよりも劣化することを明らかにする。

次に、RED方式のパラメータをルータの輻輳状況に応じて動的に変化させ、ネットワーク状況の変化に対応する動的パラメータ方式であるdt-RED (RED with dynamic threshold control) 方式を提案し、その評価を行う。提案方式においては、上記の考察に基づき、バッファの有効利用を図りながら平均キュー長 (バッファ内パケット数) を安定させるために、パケット廃棄率ではなくパケット廃棄の契機となるしきい値を動的にコントロールする。そして、提案方式を用いることで、制御パラメータを環境に応じて変更することなく、Tail Drop方式、および既存のRED方式に比べて高い公平性を実現し、またリンク利用率の低下も抑えることができることを、シミュレーション結果を通して明らかにする。

2 RED: Randon Early Detection

RED方式は、確率的なパケット廃棄を行うことでバースト的なパケット廃棄の発生を防止し、平均キュー長 (バッファ内パケット数) を利用した輻輳検知方式を利用する

ことでより安定した輻輳制御を行うことを目的としている。これにより、従来のTD (Tail Drop) において発生するバースト的 (連続的) なパケット廃棄を防止するため、TCPコネクションのスループット、及び公平性の向上が期待される。

RED方式ではパケット到着毎に、ローパスフィルタの一種である重み付き指数平均を用いて現在のキュー長から平均キュー長 \bar{q} を計算する。すなわち、現在のキュー長を q とすると、REDルータはパケット到着毎に、平均キュー長 \bar{q} の値を以下の式で更新する。式中の w_q は平均キュー長に対する実際のキュー長の重みを決定するRED方式の制御パラメータである。

$$\bar{q} \leftarrow (1 - w_q)\bar{q} + w_q q$$

この平均キュー長 \bar{q} を2つのしきい値 minimum threshold (min_{th}) および、maximum threshold (max_{th}) と比較し、以下のように到着パケットに対する処理を行う。

1. $\bar{q} \leq min_{th}$ ならば到着パケットをバッファへ格納する。
2. $min_{th} < \bar{q} \leq max_{th}$ ならば以下パケット廃棄確率 p_a を計算し、確率 p_a で到着パケットを廃棄し、

$$p_b \leftarrow \frac{\bar{q} - max_{th}}{max_{th} - min_{th}} max_p, p_a \leftarrow \frac{p_b}{1 - count \cdot p_b}$$

とする。

3. $max_{th} < \bar{q}$ ならば到着パケットを廃棄する。

3 公平性の評価

本章では、ボトルネックルータが収容するTCPフロー数が多い環境でのフロー間の公平性に特に着目し、シミュレーション結果を通じてTD方式とRED方式の性能評価を行う。シミュレーションには、ネットワークシミュレータns [12]を用いる。

3.1 ネットワークトポロジー

図1にシミュレーションで用いるネットワークトポロジーを示す。ここでは、 N 台の送信側端末 (ルータが収容するTCPコネクション数に相当) が帯域、及び伝搬遅延時間が同一であるリンクで1台のルータに接続され、ルータから受信側端末へのリンクをボトルネックリンクとして共有しているネットワークを想定している。送信側端末とルータ間の各リンクの帯域は100 [Mbps]、伝搬遅延時間を2 [msec]とする。また、ボトルネックリンクの帯域を BW [Mbps]、伝搬遅延時間を τ [msec]、ルータのバッファサイズを B [packets]とし、これらの値を変化させることにより、さまざまな環境における評価を行う。ルータのバッファではTD方式あるいはRED方式を用いる。RED方式の初期パラメータは、 $max_{th}=15$ [packets]、 $min_{th}=5$ [packets]、 $max_p=0.1$ 、 $w_q=0.002$ とする。これは、文献 [5] において推奨されている値であり、以降では“推奨値”と呼ぶ。

3.2 公平性の評価基準

本稿では、公平性の評価指標としてFairness Index値 [13]を用いる。Fairness Index値は以下のように定義される。 n をサンプル数、 x_i ($1 \leq i \leq n$) を n 個のサンプル値と

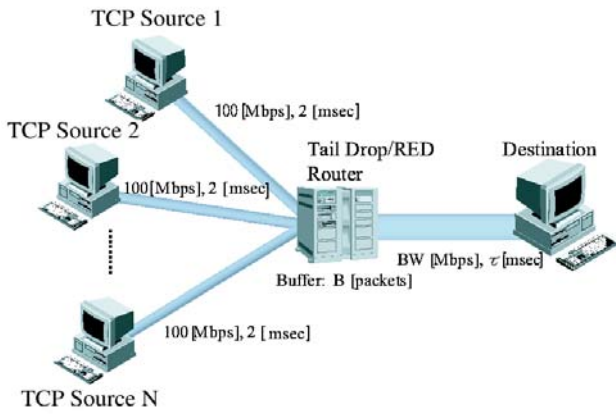


図 1: ネットワークトポロジー

すると、 n 個のサンプル値の公平性を表す指標 f を、

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

とする。 f は 0 以上 1 以下の値を取り、1 に近いほど公平性が高い。

3.3 評価結果

本節では、FTP (File Transfer Protocol) によるファイル転送等のアプリケーションを想定し、各送信側端末が無制限長のファイルを転送する場合の公平性を評価する。公平性の指標としては式 (1) を用いるが、ここでは、 N 台の各送信側端末が受信側端末へ 1000 秒間のデータ転送を行った場合の各 TCP コネクションのスループットを 100 秒毎に計測し、サンプル値 x_i とすることによって、式 (1) による公平性の評価を行う。ただし、初期動作の影響を排除するため、シミュレーション開始から 100 秒間の結果は破棄する。なお、無限長ファイル転送ではなく、Web アクセスのような短いファイル転送を繰り返す場合の評価も行っている。結果に関しては本稿では割愛するが、全体的な傾向は本節で述べる無限長ファイル転送の場合と同様である。

図 2 は、図 1 のネットワークにおいて $BW = 1.5$ [Mbps]、 $\tau = 4$ [msec] とし、バッファサイズ B を 100 [packets] (図 2(a))、1000 [packets] (図 2(b))、及び 10000 [packets] (図 2(c)) とした場合の、コネクション数 N に対する Fairness Index 値の変化を示したものである。RED 方式においては、閾値 max_{th} が推奨値の 15 の場合に加え、バッファサイズに応じて様々な値に変更した場合の結果を示している。図 2(a)–2(c) をみると、特に推奨値を用いた場合には、コネクション数が増えると RED 方式の公平性が急激に劣化し、TD 方式と比較して大きく劣っていることがわかる。これは、推奨値においてはバッファサイズに関係なく $max_{th}=15$ であるため、TD 方式と比較して利用できるバッファサイズが小さく、パケット廃棄率が高くなるためである。

次に図 3 は、伝搬遅延時間 τ を 400 [msec] とした場合の結果を示している。ここでも、パラメータとして推奨

値を用いた場合の RED 方式は、コネクション数の増加にともなって急激に公平性を劣化させ、TD 方式との比較でも大きく劣っている。TD 方式では、コネクション数が少ない場合は、バッファサイズが変化しても公平性は大きくは変化しないが、図 3(c) に示すように、コネクション数が多い場合には、バッファサイズを大きくすることによって公平性が改善していることがわかる。すなわち、TCP コネクションが 1000 本と非常に多い場合には、ある程度大きなバッファが必要であるといえる。

さらに、図 2、3 から、RED 方式において閾値 max_{th} を変化させることによって、公平性が大幅に向上することがわかる。これは、 max_{th} を大きくすることによって、RED 方式における平均キュー長が max_{th} に達することが少なくなり、連続的なパケット廃棄を回避することができるためである。しかし、 max_{th} を大きくしても、TD 方式に比べて公平性が劣っている場合もある (例えば図 3(c))。これは、これらの環境においては、TD 方式においてもバッファ溢れによるパケット廃棄がほとんど発生しないためである。このような場合は、RED 方式によって強制的にパケット廃棄を発生させることが、フロー間の公平性が劣化する原因となる。

4 RED の動的パラメータ設定方式

3 章の結果から、RED 方式におけるパラメータとして文献 [5] に示されている推奨値を用いると、特にルータが収容するフロー数が多い場合に性能が非常に劣化することがわかった。これは、パラメータ max_{th} が、バッファサイズ B に関係なく 15 に固定されているため、ルータのバッファが十分大きい場合にも、そのバッファを有効に利用できないためである。また、 max_{th} をバッファサイズに応じて大きく設定することにより、RED 方式の公平性を大きく向上させることが可能であるが、適切な max_{th} の値は、コネクション数、バッファサイズ、リンク帯域等に大きく依存することがわかった。これは、RED 方式におけるパラメータ設定の困難さを示している。すなわち、RED 方式のパラメータセットを 1 種類に固定し、収容するコネクション数、リンク帯域、バッファサイズ等が変化しても常に良好な性能を発揮させることは非常に困難であると言える。そこで本章では、RED 方式のパラメータのうち主にパケット廃棄のしきい値である min_{th} 及び max_{th} を、ルータバッファのキュー長に応じて動的に変化させる方式である、dt-RED (RED with dynamic threshold control) 方式を提案する。

3 章において示したように、RED 方式は、平均キュー長が頻繁にしきい値 max_{th} に達するような輻輳状態においては、十分な性能を発揮できない。従って、dt-RED 方式では、平均キュー長 \bar{q} を監視し、その変化に合わせて閾値 max_{th} 及び min_{th} をルータのバッファサイズが許す範囲で変化させ、平均キュー長が常に max_{th} と min_{th} の間になるように制御を行う。閾値の制御は、ルータにパケットが N 個到着する毎 (以下、観測期間と呼ぶ) に行う。以下、順に max_{th} 、 min_{th} 、 max_p の動的制御アルゴリズムを示す。

- max_{th} の制御

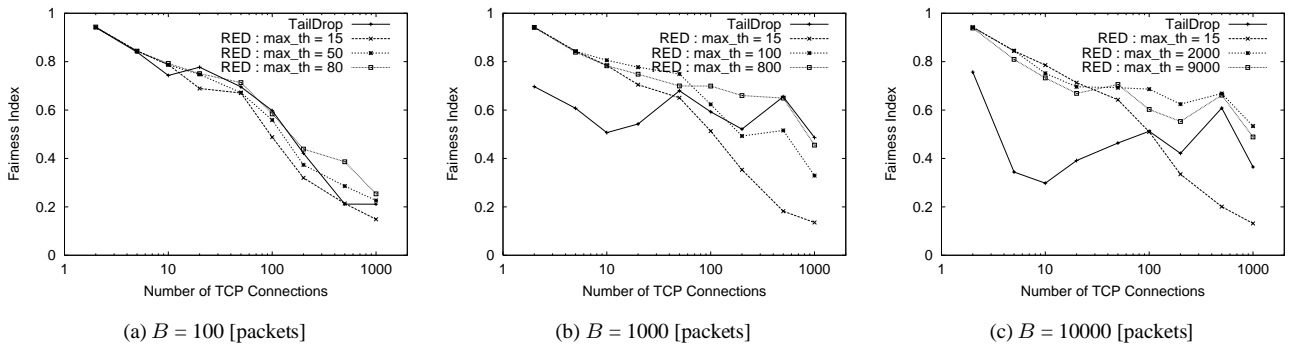


図 2: TD, RED 方式の公平性比較 ($BW = 1.5$ [Mbps], $\tau = 4$ [msec])

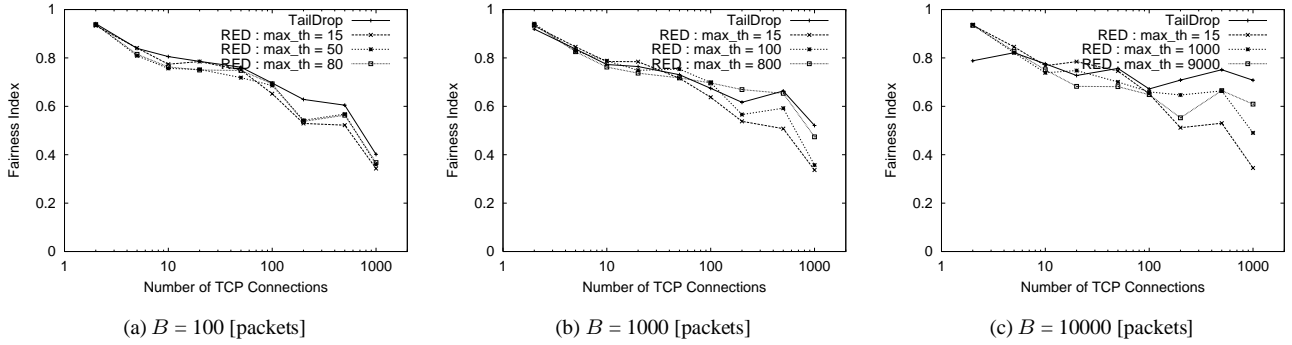


図 3: TD, RED 方式の公平性比較 ($BW = 1.5$ [Mbps], $\tau = 400$ [msec])

観測期間内に平均キュー長 \bar{q} が $X_{max} \cdot max_{th}$ に 1 回以上達した場合、 max_{th} の値を式 (2) によって大きくする。

$$max_{th} \leftarrow max_{th} + \alpha_{max} \cdot B \quad (2)$$

また、観測期間中常に $(\bar{q} - min_{th}) < Y_{max} \cdot (max_{th} - min_{th})$ であった場合、 max_{th} の値を式 (3) によって小さくする。

$$max_{th} \leftarrow max_{th} - \beta_{max} \cdot (max_{th} - min_{th}) \quad (3)$$

ここで、 $\alpha_{max}, \beta_{max}$ はそれぞれ、 max_{th} の増加率と減少率とを決定する、dt-RED 方式の制御パラメータである。また、 X_{max} は max_{th} の値が現在の平均キュー長に対して小さいことを判断するためのしきい値であり、 Y_{max} は max_{th} の値が現在の平均キュー長に対して大きすぎること判断するためのしきい値である。

- min_{th} の制御

観測期間内に実際のキュー長が 1 回以上 0 になる場合、リンク利用率が低下していると判断し、 min_{th} の値を式 (4) によって大きくする。

$$min_{th} \leftarrow min_{th} + \alpha_{min} \cdot (max_{th} - min_{th}) \quad (4)$$

逆に、実際のキュー長が 1 回も 0 にならない、かつ平均キュー長 \bar{q} が min_{th} よりも大きい場合には、リンク利用率が十分であると判断し、輻輳を回避する

ために min_{th} の値を式 (5) で更新する。

$$min_{th} \leftarrow min_{th} - \beta_{min} \cdot (max_{th} - min_{th}) \quad (5)$$

ここで、 $\alpha_{min}, \beta_{min}$ はそれぞれ、 min_{th} の増加率、減少率を決定する、dt-RED 方式の制御パラメータである。

- max_p の制御

上述の max_{th}, min_{th} の制御ではリンク利用率の低下やバースト的なパケット廃棄を避けられない場合に制御を行なう。まず、観測期間内に平均キュー長 \bar{q} が 1 回以上 max_{th} に達すると同時に $max_{th} \geq B \cdot X_{buf}$ となっている場合、 max_{th} を大きくすることで平均キュー長を安定化させることが望めないため、 max_p の値を式 (6) によって大きくする。

$$max_p \leftarrow \alpha_p \cdot max_p \quad (6)$$

また、式 (4) によって min_{th} が増加し続け、観測期間中常に $min_{th} \geq \frac{1}{2}B$ である場合、パケット廃棄率が高すぎると判断し、リンク利用率を上げるために、 max_p の値を式 (7) によって小さくする。

$$max_p \leftarrow \beta_p \cdot max_p \quad (7)$$

ここで、 α_p, β_p は max_p の増加率、および減少率を決定する dt-RED 方式のコントロールパラメータであり、 X_{buf} は平均キュー長の増大を抑えられず、 max_p を大きくする必要があることを判断するためのしきい値である。

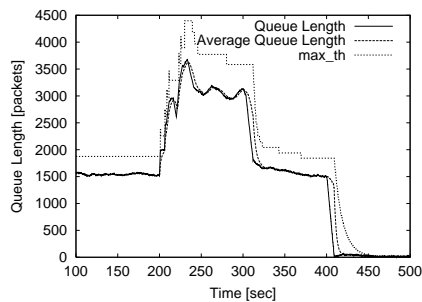


図 4: dt-RED 方式における閾値の変化

dt-RED 方式は、 min_{th} 、 max_{th} 、 max_p を動的に制御するために新たに 8 つの制御パラメータを導入している。しかし、RED 方式と違い、これらのパラメータの値は dt-RED 方式の性能に与える影響は小さい。つまり、一組のパラメータセットを用いることで、さまざまなネットワーク環境に対応することができる。このことは 5 章において、シミュレーション結果を通じて明らかにする。

5 提案方式の性能評価

本章では、4 章において提案した dt-RED 方式を、TD 方式、及び RED 方式と公平性の比較することによって、その性能評価を行う。シミュレーションで用いるネットワークトポロジは 3.1 節で示したものを、ポトルネットワークに dt-RED 方式を用いる。dt-RED 方式のパラメータとして $N = 100$ [packets]、 $\alpha_{max} = \alpha_{min} = \beta_{max} = \beta_{min} = 0.05$ 、 $X_{max} = 0.9$ 、 $Y_{max} = X_{buf} = 0.8$ を用いる。また、 max_p 及び w_q は RED 方式と同じものを用いる。またここでは 4 章で説明したアルゴリズムのうち、 max_p のコントロールは用いず、 max_{th} 、 min_{th} の制御のみを行なっている。

ここでは、3 章で得られた結果と対応するものとして、各送信側端末が無制限のファイル転送を行なう場合における公平性の評価結果を示す。なお、Web アクセスのような短いファイル転送を繰り返す場合の評価もあわせて行い、提案方式の有効性を確認している。

図 4 は dt-RED 方式が、ネットワーク環境の動的な変化に合わせて max_{th} の値を変化させている様子を示したものである。ここでは $BW = 1.5$ [Mbps]、 $\tau = 4$ [msec]、 $B = 10000$ [packets] とし、TCP コネクション数 N をシミュレーション開始から 200 [sec]までは 500、200 [sec]–300 [sec]は 1000、300 [sec]–400 [sec]は 500、400 [sec]–500 [sec]は 10 に変化させている。図から、平均キュー長がコネクション数の増減にしたがって変化するのに対応して、 max_{th} が変化していることがわかる。このような動作をすることで、dt-RED 方式ではパースト的なパケット廃棄を極力避け、高い公平性を実現する。

図 5 は、 $BW = 1.5$ [Mbps]、 $\tau = 4$ [msec]、 $B = 100$ [packets] (図 5(a))、1000 [packets] (図 5(b))、及び 10000 [packets] (図 5(c)) とした場合の、コネクション数 N に対する Fairness Index 値の変化を示したものである。ここでは、dt-RED 方式の結果とともに、TD 方式、文献 [5] で推奨されているパラメータの値を用いた RED 方

式、及び 3 章で得られた最適なパラメータ調整を行なった RED 方式の結果を示している。図から、dt-RED 方式はさまざまなネットワーク環境において、最適なパラメータ調整を行った RED 方式と同等か、あるいはそれ以上の性能を示していることがわかる。

図 6 は $BW = 1.5$ [Mbps]、 $\tau = 400$ [msec] の場合の結果を示している。この場合も図 5 と同様、RED 方式において最適パラメータ調整を行なった場合と同じ、あるいはそれを上回る公平性を実現している。さらに、最適なパラメータ調整を行った RED 方式の公平性が TD 方式に比べて劣化している場合でも、公平性を劣化させていない(図 6(b))。これはコネクション数が異なる環境において max_{th} を固定して RED 方式を用いると、コネクション数によってその max_{th} が最適でない場合があるのに対し、dt-RED 方式は動的にパラメータ調整を行い、コネクション数に応じて常に各パラメータを最適な値に設定することができるためである。しかし、図 6(c) では dt-RED 方式を用いても公平性が改善していない。これは、dt-RED 方式は RED 方式と同様にパケット廃棄を意図的に発生させるため、TD 方式においてパケット廃棄が発生しないようなネットワーク環境においては、TD 方式よりも性能が劣化することは避けられないことを示している。このような状況における dt-RED 方式の改善方式については今後の課題としたい。

これらの結果から、dt-RED 方式では RED 方式のパラメータをネットワークの状況に合わせて設定した場合と同程度か、それを上回る公平性を実現できることが明らかとなった。また、dt-RED 方式では一組のパラメータセットを用いて、異なった環境でそれぞれ最適なパラメータチューニングを行なった RED 方式を上回る公平性を実現できることを示した。これによって、dt-RED 方式を用いることで RED 方式の欠点であるパラメータ設定の困難さを解消できることがわかった。

dt-RED 方式は RED 方式を基に、そのパラメータを動的に制御する方式であるため、最適なパラメータチューニングを施した RED 方式に対して、著しい公平性の改善を示すわけではない。しかし、RED 方式ではネットワーク環境の変化によって制御パラメータをその都度慎重に設定しなければ十分な性能を発揮できないのに対して、dt-RED 方式では制御パラメータを、一種類に固定したままで RED 方式における最良の結果と同程度の結果を実現できる。このことは、コネクション数、輻輳状況などが大きく変化する、実際のネットワーク上のルータに適用する上で非常に重要な意味を持つといえる。

6 おわりに

本稿では、特にフロー数が非常に多い環境での TCP コネクション間の公平性に着目した RED (Random Early Detection) 方式の性能評価、及び公平性を改善するための RED 方式の動的パラメータ設定方式の提案と評価を行った。まず、シミュレーションによってコネクション間の公平性に着目して RED 方式と TD 方式との性能比較を行った。その結果、RED 方式が TD 方式に対して高い公平性を得るためには、パラメータをフロー数、キュー

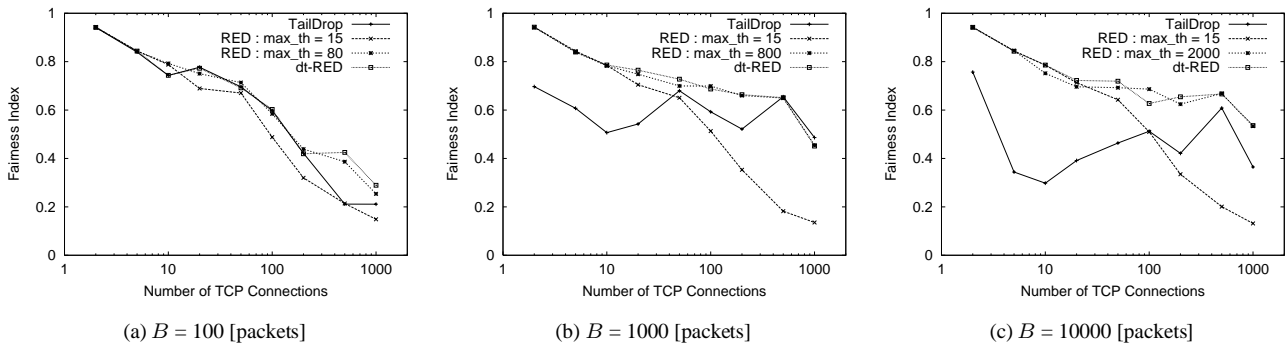


図 5: TD, RED, dt-RED 方式の公平性比較 ($BW = 1.5$ [Mbps], $\tau = 4$ [msec])

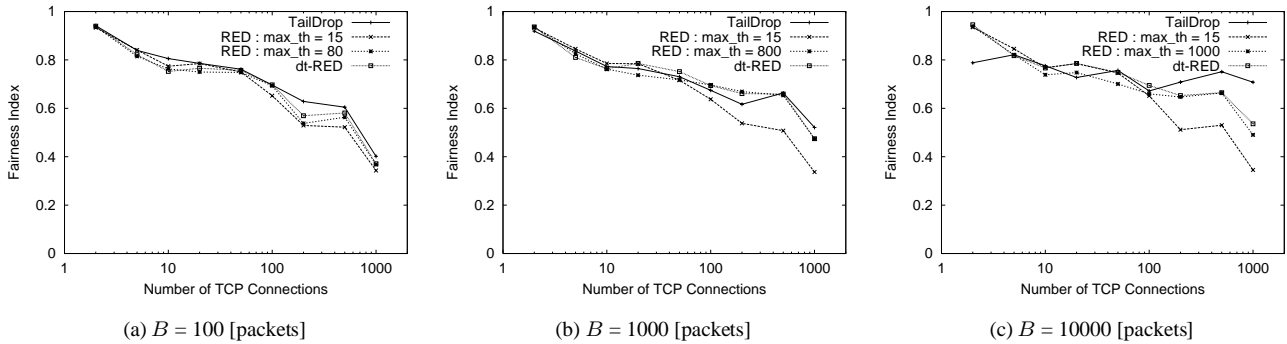


図 6: TD, RED, dt-RED 方式の公平性比較 ($BW = 1.5$ [Mbps], $\tau = 400$ [msec])

長といったネットワークの環境に応じて適切に設定することが必要であり、その静的に設定したパラメータを用いて、常に高い公平性を実現することは困難であることを示した。

それらの結果を基に、本稿ではさらに RED 方式のパラメータ設定を動的に行う dt-RED (RED with dynamic threshold control) 方式を提案し、その性能を評価した。その結果、従来の TD 方式および、既存の RED 方式よりも高い公平性を示すことが明らかとなった。

謝辞

本研究の一部は、日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業における研究プロジェクト「高度マルチメディア応用システム構築のための先進的ネットワークアーキテクチャの研究」、科学技術庁の平成 10 年度科学技術振興調整費による「高度医療ネットワークに関する研究調査」、通信・放送機構「次世代広帯域ネットワーク利用技術の研究開発プロジェクト」、及び(財)電気通信普及財団の研究助成「超高速ネットワークのためのトランスポート層プロトコルに関する研究」によっている。ここに記して謝意を表す。

参考文献

[1] W. R. Stevens, *TCP/IP Illustrated, Volume 1: The Protocols*. Reading, Massachusetts: Addison-Wesley, 1994.
 [2] L. S. Brakmo, S. W.O'Malley, and L. L. Peterson, "TCP Vegas: New techniques for congestion detection and avoidance," in *Proceedings of ACM SIGCOMM'94*, pp. 24–35, Oct. 1994.

[3] S. Floyd and T. Henderson, "The NewReno modification to TCP's fast recovery algorithm," *Request for Comments 2582*, Apr. 1999.
 [4] M. Mathis, J. Mahdavi, S. Floyd, and A. Romanow, "TCP selective acknowledgement options," *Request for Comments 2018*, Oct. 1996.
 [5] S. Floyd and V. Jacobson, "Random early detection gateways for congestion avoidance," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 1, pp. 397–413, Aug. 1993.
 [6] Carlos M.Pazos and Juan C.Sanchez Agrelo and Mrio Gerla, "Using back-pressure to improve TCP performance with many flows," in *Proceedings of IEEE INFOCOM'99*, March 1999.
 [7] Thomas Bonald and Martin May Jean-Chrysostome Bolot, "Analytic evaluation of RED performance," in *Proceedings of IEEE INFOCOM 2000*, March 2000.
 [8] D. Lin and R. Morris, "Dynamics of random early detection," *ACM Computer Communication Review*, vol. 27, pp. 127–137, Oct. 1997.
 [9] Yin Zhang and Lili Qiu, "Understanding the end-to-end performance impact of RED in a heterogeneous environment," Tech. Rep. Cornell CS Technical Report 2000-1802, July 2000.
 [10] Martin May, Jean Bolot, Christophe Diot, and Bryan Lyles, "Reasons not to deploy RED," in *Proceedings of IWQoS'99*, June 1999.
 [11] Mikkel Christiansen, Kevin Jeffay, David Ott, F. Donelson Smith, "Tuning RED for web traffic," in *Proceedings of ACM SIGCOMM 2000*, August 2000.
 [12] "Network simulator - ns (version 2)." available from <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.
 [13] R. Jain, "Throughput fairness index: An explanation," *ATM Forum Contribution 99-0045*, February 1999.