A Packet Discarding Method with Two Parameters

Atsuro Fujii Non-member (Okayama Prefectural University, fujii221@c.oka-pu.ac.jp)

Hiroshi Inai Member (Okayama Prefectural University, inai@c.oka-pu.ac.jp)

Keywords: Packet Discarding, Active Queue Management, Random Early Detection, Routers

In order to avoid congestion in the network and to achieve a fair share of the resource among communication flows, the packet discarding method called RED (Random Early Detection)⁽¹⁾ has been proposed. In that method, a router randomly discards arriving packets before its buffer overflows. Although some enhanced methods of RED, such as Flow RED⁽²⁾, Balanced RED, Stabilized RED, Adaptive RED, Easy RED⁽³⁾ and so on, have been proposed, they (except for Easy RED) employ complicated controls to achieve high throughput and fairness among communication flows. However, many control parameters in the complicated methods would prevent from reaching their practical stages. This paper proposes a simple packet discarding method which reduces the number of parameters and provides better performance than existing ones.

The proposed method omits the probabilistic packet discard from RED. The discarding algorithm is as follows. In the same way as RED, at every packet arrival, the router calculates a moving average of the queue length avg ,

$$avg \leftarrow \begin{cases} (1 - w_q)avg + w_q q & (q \neq 0) \\ (1 - w_q)^m avg & (q = 0) \end{cases}$$

where q , w_q and m are the current queue length, the queue weight, and the queue idle period, respectively. If avg is less than or equal to the threshold max_{th} , then the router discards the arriving packet, otherwise the router stores the packet. Note that the arriving packet will be discarded when the buffer is full.

In order to evaluate the performance of our method, we execute simulation with a single bottleneck link in a dumb-bell topology. Figures 1 and 2 respectively show influence of w_q and max_{th} on the total throughput, where K in Fig. 2 is the buffer size of the congested router. Too large or too small w_q degrades the throughput performance. Under a

Fig. 1. Influence of w_q on the throughput.

large w_q , our method acts like a drop tail with the buffer size max_{th} . For a small w_q , the buffer would become full before avg reaches the threshold. On the other hand, max_{th} has a slight influence on the throughput.

Fig. 3 shows a comparison of the throughput. The proposed method outperforms the existing ones.

Fig. 2. Influence of max_{th} on the throughput.

Fig. 3. Comparison of the throughput.

References

- (1) S. Floyd and V. Jacobson: "Random Early Detection Gateways for Congestion Avoidance", IEEE/ACM Transactions on Networking, Vol.1, No.4, pp.397-413 (1993-8)
- (2) D. Lin and R. Morris: "Dynamics of Random Early Detection", ACM SIGCOMM Computer Communication Review, Vol.27, No.4, pp.127-137 (1997-10)
- (3) L. A. Grieco and S. Mascolo: "TCP Westwood and Easy RED to Improve Fairness in High-Speed Networks", Protocols for High Speed Networks, LNCS 2334, pp.130-146, Springer (2002)

パラメータの少ないパケット廃棄方式

非会員 藤井 敦朗* 正員 稲井 寛*

A Packet Discarding Method with Two Parametrers

Atsuro Fujii*, Non-member, Hiroshi Inai*, Member

In order to avoid congestion in the network and to achieve a fair share of the resource among communication flows, the packet discarding method called RED (Random Early Detection) has been proposed. In that method, a router randomly discards arriving packets before its buffer overflows. Although some enhanced methods of RED have been proposed, they employ complicated controls to achieve high throughput and fairness among communication flows. However, many control parameters in the complicated methods would prevent from reaching their practical stages. This paper proposes a simple packet discarding method which reduces the number of parameters and provides better performance than existing ones. Concretely speaking, our method omits the probabilistic packet discard from RED. Via simulation, the proposed method provides higher throughput than existing ones and almost equal fairness.

キーワード：パケット廃棄, 能動的キュー管理, Radom Early Detection, ルータ

Keywords: Packet Discarding, Active Queue Management, Radom Early Detection, Routers

1. はじめに

近年, インターネットの利用者の増加に伴いネットワーク上のトラフィックも増大している。ネットワーク内で輻輳が発生し, ルータのバッファが満杯になると, そのルータに到着したパケットは廃棄される。このように自然なパケットの廃棄を後方廃棄 (Drop Tail) という。パケット廃棄が発生すると, TCP による通信では, 送信ホストは輻輳解消のためにウィンドウサイズを減少させて, 送信レートを下げる。そのため, 輻輳により, 多くの送信ホストがほぼ同時に送信レートを下げ, ネットワーク全体のスループットが大幅に低下することが報告されている⁽²⁾。また, バッファが満杯のとき偶然に到着したパケットが廃棄されることは, フロー間の公平性を損なう要因となっている。特にバースト性の高いトラフィックの場合には, ある特定のフローに属するパケットのみが廃棄される恐れがある。そもそも廃棄されるべきは輻輳を招いたフローに属するパケットであり, 輻輳時に到着したパケットではない。そこで, ルータのバッファ溢れが発生する前に当該ルータが到着パケットをランダムに廃棄することで輻輳を回避し, フロー間の

スループットの公平性をも確保する RED (Random Early Detection)⁽³⁾ が考案された。

RED には, Flow RED⁽⁴⁾, Balanced RED⁽⁵⁾, Stabilized RED⁽⁶⁾, Adaptive RED⁽⁷⁾, Easy RED⁽⁸⁾ などの様々な改良版が提案されている。これらの方式の中では, フローごとのキュー長を制御する Flow RED が最も高いスループットを示すことが報告されている⁽⁹⁾。しかし, Easy RED 以外の方式では数多くのパラメータを調整する必要があり, 実運用が難しいという問題が考えられる。その一方で, Easy RED は RED のパラメータを削減した簡潔な方式であるが, この方式は時々刻々と変動するルータ内の実キュー長により到着パケットの廃棄を判断しているため, キュー長の急激な変化の影響を受け易く, 実質的に後方廃棄と同様の状態に陥る恐れがある。そこで, 本研究では, RED より少ない数のパラメータで RED や Flow RED と同等以上のスループット, 公平性を実現する方式を提案する。

以下, 2 章では, 既存方式の概要と問題点を述べ, 新たな方式を提案する。3 章では, パケット廃棄方式の性能を評価するためのシミュレーションモデルを構築する。4 章では, シミュレーションにより, パラメータ値が提案方式の性能に及ぼす影響について考察する。5 章では, 既存方式との性能比較を行って, 提案方式の有効性を示す。最後に 6 章で, 本研究で得られた結果のまとめと今後の課題について述べる。

* 岡山県立大学情報工学部情報通信工学科
〒719-1197 岡山県総社市窪木 111 番地
Department of Communication Engineering
Okayama Prefectural University
111, Kuboki, Soja, Okayama 719-1197

2. パケット廃棄方式

本節では、後の章で性能比較の対象とした RED, Flow RED, Easy RED の概要と問題点を述べた後、Easy RED とは異なる視点でパラメータを削減した場合について考察し、改良方式を提案する。

〈2・1〉 **RED** RED⁽³⁾ は、まず、当該ルータ内の平均キュー長 avg を算出する。 avg は実キュー長 q の移動平均で、重み係数を w_q とすると、次式のように表される。

$$avg \leftarrow \begin{cases} (1 - w_q)avg + w_q q & (q \neq 0) \\ (1 - w_q)^m avg & (q = 0) \end{cases}$$

但し、 m はキューが最後に空になってから現在までの経過時間である。平均キュー長 avg はパケットが到着するたびに更新される。

次に、平均キュー長 avg に基づいて、到着パケットを廃棄する確率（以降、廃棄確率という） p_a を次式のように決定する。

$$p_a = \begin{cases} 0 & (0 < avg < min_{th}) \\ \frac{p_b}{(1 - count \times p_b)} & (min_{th} \leq avg \leq max_{th}) \\ 1 & (max_{th} < avg) \end{cases}$$

ここで、 min_{th} , max_{th} , $count$ はそれぞれキュー長に関する下段の閾値、上段の閾値、最後に廃棄を行ってからバッファに格納されたパケット数である。また、 p_b は次のように与えられる。

$$p_b = \frac{avg - min_{th}}{max_{th} - min_{th}} max_p$$

尚、 max_p は p_b の最大値である。

RED のパラメータは w_q , min_{th} , max_{th} , max_p の 4 つであり、他の avg , q , m , p_a , p_b , $count$ は変数である。RED はバッファが溢れる前からパケットを確率的に廃棄し、特定のフローに属するパケットが連続的に廃棄されにくくすることによって、フロー間の公平性の維持を図っている。また、複数のフローに属するパケットがほぼ同時に廃棄されたときに全体のスループットが低下する現象の回避も図っている。

〈2・2〉 **Flow RED** Flow RED⁽⁴⁾ はフロー間の公平性を向上することを目的として、RED を拡張した方式である。RED で扱う 4 つのパラメータに、フローごとのバッファ内パケット数の下段の閾値 min_q と上段の閾値 max_q の 2 つのパラメータが追加されている。これらのパラメータの追加により、RED よりもさらにパラメータ調整が困難になると考えられる。また、変数として、フローごとのバッファ内パケット数 $qlen_i$ （但し、添字の i はフロー ID）とそれらの平均 $avgcq$ が追加されている。これらにより、フローごとのきめ細かなパケット廃棄を実現しているが、フロー数の増加に伴って変数の個数も増加する。

Flow RED におけるパケット廃棄は次のとおりである。

$qlen_i \geq max_q$ または $qlen_i \geq avgcq$ のとき到着パケットを廃棄し、 $min_{th} \leq avg < max_{th}$ かつ $qlen_i \geq max[min_q, avgcq]$ のとき確率 p_a で到着パケットを廃棄する。また、 $avg < min_{th}$ のとき到着パケットを格納する。そして、これら以外のとき到着パケットを廃棄する。但し、平均キュー長 avg , 廃棄確率 p_a は RED と同様の方法により算出する。また、フローごとのバッファ内パケット数の平均 $avgcq$ については、 avg をバッファ内に現存するフロー数 N_{active} で割った値が用いられている。

〈2・3〉 **Easy RED** Easy RED⁽⁸⁾ は RED を簡素化したパケット廃棄方式である。平均キュー長 avg を廃止し、実キュー長 q により輻輳の度合いを判断することとしている。これに伴って、上段の閾値 max_{th} も廃止されている。 max_{th} は強制廃棄ラインであり、実キュー長が max_{th} に達すると到着パケットを廃棄することになると、バッファサイズを max_{th} とする後方廃棄と同様になってしまうためである。さらに、廃棄確率を固定値としている。これらの簡素化により、パラメータは下段の閾値 min_{th} と廃棄確率 p_{drop} の 2 つのみ、変数は実キュー長 q の 1 つのみとなっている。

Easy RED におけるパケット廃棄は次のとおりである。 $q \leq min_{th}$ のとき到着パケットをバッファに格納し、 $q > min_{th}$ のとき確率 p_{drop} で到着パケットを廃棄する。但し、キュー溢れの場合には到着パケットは廃棄される。

Easy RED では、実キュー長が min_{th} を超えると確率的な廃棄を行って輻輳回避を図るが、フロー数の増加などによってキュー長が急激に増加してバッファサイズに近づいた場合には、実質的に後方廃棄と同様の状態に陥る恐れがある。

〈2・4〉 **RED のパラメータ削減** 前節で述べたように、Easy RED には後方廃棄と同様の現象が起こり得るという問題がある。これは、Easy RED が実キュー長 q を輻輳の判断に用いていることに起因している。そこで、平均キュー長 avg を残し、その一方で、下段の閾値 min_{th} を廃止して、上段の閾値 max_{th} を残すことを考える。これにより、到着パケットの確率的な廃棄が行われなくなるため、当該ルータを通過するフロー間の公平性が低下する恐れがある。しかし、その一方で、バッファに余裕があるにもかかわらず確率的な廃棄が起こることがなくなるため、各フローが必要以上に送信レートを下げることがなくなり、スループットの向上が期待できる。

ここで、RED において到着パケットの確率的な廃棄を行う場合と行わない場合で、フローごとの廃棄パケット数に生じる偏りについて検討する。尚、確率的な廃棄を行わない場合とは、 $p_b = 0$ と固定して RED を運用することに相当する。後の 3 章で述べるモデルのシミュレーションを行って、100 [Mbps] のボトルネック回線に 100 本のフローが集まったときのフローごとの廃棄パケット数を計測した。尚、RED のパラメータ値については、5 の冒頭にあげた数値を用いている。

横軸をフロー ID とし、縦軸を廃棄されたパケット数とするグラフを図 1, 2 に示す。図から、確率的な廃棄を行わない場合では廃棄されるパケット総数は多いが、確率的な廃棄を行う場合と比較して、フローごとに廃棄されるパケット数にはそれほど大きな偏りはないことがわかる。このことは、確率的な廃棄を行わなくても高い公平性を実現することが可能であることを示していると考えられる。しかし、全体の廃棄数が多いことはスループットの低下につながる恐れがあるため、強制廃棄ラインである max_{th} を調整する必要があると思われる。

〈2・5〉 提案方式 前節の検討に基づいて、次のようなパケット廃棄方式を提案する。

まず、RED と同様の方法で平均キュー長 avg を算出する。そして、 $avg \leq max_{th}$ のときに到着パケットをバッファに格納し、 $avg > max_{th}$ のときに到着パケットを廃棄する。但し、キュー溢れの場合には到着パケットは廃棄される。

このような簡素化により、提案方式では、パラメータは重み係数 w_q と上段の閾値 max_{th} の 2 つのみとなる。

Fig. 1. The number of discarded packets per flow when a router discards packets probabilistically.

Fig. 2. The number of discarded packets per flow when a router discards packets deterministically.

提案方式は、RED において $p_b = 0$ とすることにより、 min_{th} と max_p の 2 つのパラメータを無効にした方式である。これにより、確率的な廃棄は行われず、RED のパラメータ調整に関する既存の研究⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾では、4 つのパラメータが機能していることが前提となっており、いくつかのパラメータを無効とする設定での評価は行われていない。これは、平均キュー長に応じて線形的に変化する廃棄確率に基づいた確率的な廃棄を行うという RED の特徴を維持するためと考えられる。

3. シミュレーションモデル

パケット廃棄方式の性能を評価するため、図 3 のようなダンベル型ネットワークを考える。ダンベル型ネットワークモデルでは、ボトルネックとなる回線で接続された 2 台のルータを介して、複数ペア（図ではペア数を N としている）の送受信端末が通信を行う。ダンベル型ネットワークモデルは、文献 (6) (7) など数多くの文献で用いられている性能評価モデルであり、文献 (3)~(5) などで用いられている漏斗型ネットワーク（複数の端末が 1 台のルータを介して 1 台のサーバに接続されているネットワークで、ルータ-サーバ間の回線がボトルネックとなる）と本質的に同様のモデルである。

本モデルでは、各回線の伝送速度はすべて等しく 100 [Mbps] としている。また、全ての送受信端末は TCP Reno で通信を行うものとしている。1 つの送受信ペアで 1 つのフローを持つこととしているため、ペア数 N がフロー数となっている。各送信側端末とルータ 1 間の遅延、ルータ 2 と各受信側端末間の遅延は 10~50 [msec] の範囲でランダムに与えている。また、ルータ 1-2 間の伝播遅延は無視できるほど小さいものとしているため、ルータ間の遅延はパケット送出に要する時間となる。各送信側端末が送信を開始する時刻は 1~10 [sec] の間でランダムとし、シミュレーション時間を 100 [sec] としている。以降の章に示す数値例では、キュー長の過渡的な変化を表す図 4~7 以外は、100 [sec] のシミュレーションを 30 回実行して得られた平均値を示している。また、簡単のため、パケットサイズを 1 [KByte] の固定長とし、ルータのバッファサイズ $K = 5$ [MByte] と

Fig. 3. Simulation model.

Fig. 4. Transition of queue length ($w_q = 2 \times 10^{-2}$).

Fig. 6. Transition of queue length ($w_q = 2 \times 10^{-4}$).

Fig. 5. Transition of queue length ($w_q = 2 \times 10^{-3}$).

Fig. 7. Transition of queue length ($w_q = 2 \times 10^{-5}$).

している。したがって、ルータのバッファには5000個のパケットを収容することができる。輻輳が発生する可能性のある前段のルータ1でパケット廃棄方式を実行することとして、シミュレーションを行った。

4. パラメータ値が性能に及ぼす影響

提案方式では2つのパラメータ w_q , max_{th} を用いている。本節では、シミュレーションにより、これら2つのパラメータ値が提案方式の性能に及ぼす影響について考察する。

〈4・1〉 重み係数 w_q の影響 w_q は平均キュー長 avg の算出時に使用する重み係数である。 w_q の値が大きすぎると、実キュー長 q と平均キュー長 avg の値がほぼ等しくなるため、実質的には、 max_{th} に等しいバッファサイズで後方廃棄を行っていることになる。また、 w_q の値が小さすぎると、実キュー長の急激な変化に対応しづらくなる。特に、実キュー長が急激に増加すると、平均キュー長が max_{th} を超える以前にバッファ溢れが発生して、結果的に後方廃棄と同様の性能となる恐れがある。

まず、 w_q が実キュー長 q と平均キュー長 avg に及ぼす影響を調べるため、時間帯によりフロー数を変化させて、シミュレーションを行った。図4～7に、フロー数を0～

25[sec]では50、25～75[sec]では100、75～100[sec]では50とした場合のキュー長の推移を示す。尚、ここでは、 $w_q = 2 \times 10^{-x}$ ($x = 2, 3, 4, 5$) の場合の結果を示しているが、これは、文献(3)で使われている代表的な数値例が $w_q = 0.002$ となっていたため、その10倍から1/100までについて調べている。図4～7の縦軸はルータ1のバッファ内パケット数（以降、キュー長という）、横軸はシミュレーション時刻を表している。また、 $max_{th} = 0.5K$ としている。但し、 K はバッファサイズである。 $max_{th} = 0.5K$ というのも、文献(3)で使われている代表的な数値例である。

図から w_q が小さくなるにつれて、平均キュー長（実線）と実キュー長（破線）のずれが次第に大きくなっている。このずれによって、実キュー長が max_{th} を超えていても廃棄が起こらない場合やその逆の場合が起こり得るため、確率的な廃棄と似た効果を期待することができると考えられる。しかし、図7のように w_q が小さくなり過ぎると、フロー数が変化したときに平均キュー長と実キュー長が大きくずれてしまう。特に、フロー数が増加したときの実キュー長のオーバーシュートが大きくなると、バッファ溢れによる廃棄が起こるため、実質的に後方廃棄と同様の現象が起こる可能性が高くなる。

Fig. 8. Influence of w_q on the throughput.

Fig. 9. Influence of w_q on the fairness index.

次に、 w_q を 2×10^{-2} から 2×10^{-7} へと 1/10 倍ずつ変化させて、各フローのスループットの合計（以降、単にスループットという）と各フローのスループット間の公平性（以降、単に公平性という）を測定した結果をそれぞれ図 8、9 に示す。図の縦軸はスループットまたは公平性、横軸はフロー数を表している。フロー数については、シミュレーションの途中で変化させることなく、横軸で示された値に固定している。尚、 max_{th} をバッファサイズ K の 0.5 倍としている。

公平性の評価については、次に示す Fairness Index⁽¹⁾ を用いることにする。

$$FairnessIndex = \frac{\left(\sum_{i=1}^N \gamma_i \right)^2}{N \sum_{i=1}^N \gamma_i^2} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 N はフロー数、 γ_i はフロー i ($i = 1, 2, \dots, N$) のスループットである。Fairness Index は 0 以上 1 以下の値を取り、全ての γ_i が等しいときに 1 となるので、1 に近いほど各フロー間の公平性が高くなる。

図 8、9 から、 $w_q = 0.02$ のように w_q が大きい場合には、

平均キュー長が実キュー長にほぼ等しくなるため、実質的にバッファサイズ $0.5K$ のときの後方廃棄となり、スループット、公平性とも低い値を示している。一方、 $w_q = 2 \times 10^{-7}$ のように w_q が小さい場合には、実キュー長の変化が平均キュー長にほとんど反映されなくなるため、平均キュー長が max_{th} を超える以前にバッファ溢れによるパケット廃棄が発生し、スループット、公平性とも低い値を示している。ここで示した数値例で最も高いスループットと公平性を示したのは $w_q = 2 \times 10^{-5}$ の場合である。しかし、前述の図 7 によると、 $w_q = 2 \times 10^{-5}$ のときには、フロー数が増加したときの実キュー長のオーバシュートが大きいいため、バッファサイズによっては、バッファ溢れによるパケット廃棄が発生することが考えられる。そこで、以降の数値例では、 $w_q = 2 \times 10^{-4}$ とする。

〈4・2〉 閾値 max_{th} の影響 max_{th} は平均キュー長に対する閾値で、平均キュー長がこの値を超えた時に到着パケットは廃棄される。したがって、 max_{th} が小さすぎると、必要以上にパケットを廃棄して、スループットを低下させる恐れがある。一方、大きすぎると、平均キュー長が max_{th} を超える以前にバッファ溢れを起こしてしまい、実質的に後方廃棄と同様の状態に陥る可能性が高くなる。

$w_q = 2 \times 10^{-4}$ とし、 max_{th} をバッファサイズ K の 0.1~0.9 倍と変化させてシミュレーションを行った結果を図 10、11 に示す。これらの図の縦軸、横軸については前節の図 8、9 と同様である。フロー数が増加し、閾値 max_{th} による廃棄が起こり始めるとスループットが低下し、それに伴って公平性も低下する。しかし、 max_{th} はスループットや公平性が下がり始めるフロー数に影響を及ぼすだけで、フロー数が非常に多くなると、 max_{th} が性能に及ぼす影響はほとんどなくなっている。〈2・4〉節で行った検討では、確率的な廃棄を止めることにより、廃棄パケット総数が増加したことから、提案方式の運用に際してスループットを向上させるためには、閾値 max_{th} の調整が重要であるかのように思われたが、本節と前節の結果から、平均キュー長の重み係数 w_q が及ぼす影響を重視する必要がある。

本節で得られた結果から、 max_{th} を大きめの値に設定することでスループット、公平性ともに向上するが、 max_{th} が小さいときと比べて、その利得はそれほど大きなものではない。むしろ、大きな値ではバッファ溢れを起こしやすくなるため、注意が必要である。バッファサイズに依存するが、 max_{th} の適正な値の候補として、RED における代表的な値である $0.5K$ を使うことが考えられる。

〈4・3〉 パラメータ数削減の効果 RED では 4 つ、そして、その改良方式ではさらに多くのパラメータが用いられている。パラメータ数の増加に伴って、それらの値の組合せ数が指数関数的に増大するため、パラメータ設定に相当な時間を費やすことになる。これに対して提案方式は、パラメータ数が 2 であり、設定に要する時間の大幅な削減に寄与している。

また、RED では、ネットワーク条件の少しの変化に対し

Fig. 10. Influence of max_{th} on the throughput.

Fig. 12. Comparison of the throughput.

Fig. 11. Influence of max_{th} on the fairness index.

Fig. 13. Comparison of the fairness index.

て、適切なパラメータ値が変動することが、文献(10)(11)などで指摘されている。この問題の解決策として、パラメータ数を削減することが有効な場合がある。Easy REDでは、パラメータ数を2とすることにより、上述のパラメータの敏感性を改善している⁽⁸⁾。提案方式もパラメータ数2であるが、図8～11に示したように、これら2つのパラメータを適切に設定すると、フロー数が増加しても性能の低下を抑えることが可能となる。

提案方式におけるパラメータ調整については、図8～11より、閾値 max_{th} よりも重み係数 w_q の方が性能に及ぼす影響が大きいので、 w_q の調整に重点を置く必要がある。その際に注意すべきは、図6に示したように、平均キュー長と実キュー長の間に適度なずれを生じさせることで、確率的廃棄と同様の効果が得られ、その一方で、フロー数が急激に増加した場合においても、実キュー長のオーバーシュートが抑えられるような値を w_q に設定することである。

5. 性能比較

本章では、RED, Flow RED, Easy RED, 後方廃棄, 提案方式のスループット, 公平性を比較する。既存方式のパラメータ値については、各方式を提案している文献で用

いられている代表的な数値例や推奨値に基づいて、次のような値とした。RED: $min_{th} = 0.25K$, $max_{th} = 0.5K$, $w_q = 0.002$, $max_p = 0.02$ 。Flow RED: $min_{th} = 0.25K$, $max_{th} = 0.5K$, $w_q = 0.002$, $max_p = 0.02$, $min_q = 4$, $max_q = 0.4K$ 。Easy RED: $min_{th} = 0.25K$, $pdrop = 0.01$ 。また、提案方式のパラメータ値については、前章で検討したとおり、 $w_q = 2 \times 10^{-4}$, $max_{th} = 0.5K$ としている。各方式におけるスループット, 公平性の比較をそれぞれ図12, 13に示す。図の縦軸はスループットまたは公平性, 横軸はフロー数を表している。

後方廃棄については、ここで示した数値例では、100以上のフロー数でバッファ溢れを起こし、スループットおよび公平性が大きく低下している。しかし、バッファ溢れを起こさなければ、不必要な廃棄がないため、最も高い性能を示す方式である。

REDでは、確率的な廃棄が起こり始めるフロー数50あたりからスループットが急激に低下している。さらにフロー数が増加して平均キュー長がバッファサイズの1/2になると全ての到着パケットが強制的に廃棄されるため、さらにスループットが低下している。フロー数の増加に伴うスループットの減少とともに公平性も低下するが、フローごとの

スループットが低い値で差が小さくなっていくため、やがて公平性が増加に転じている。

Flow RED はフローごとのキュー長がフローごとの閾値を越えたときにパケットを廃棄するので、フローごとのスループットのばらつきが抑えられて総スループットが高くなったと考えられる。公平性については、RED より低い値を示しているが、RED に比べて高いスループットで公平性を保っており、それほど問題とはならないと考えられる。

Easy RED では、実キュー長がバッファサイズの 1/4 を超えた時点で即座に確率的廃棄が行われており、他方式に比べて早めに確率的な廃棄が起きていると考えられるため、スループットが下がり始めるフロー数が最も小さくなっている。しかし、それ以上フロー数が増加してもバッファ溢れが起これない限り確率的廃棄しか起これないため、これによりキュー長が増加して RED より高いスループットを示していると考えられる。Easy RED は上述のように早めに確率的な廃棄を行っているため、高い公平性を示しているが、総スループットは低く、フローあたりのスループットも低くなっている。

提案方式は、比較対象とした全ての方式の中で最も高いスループットを示している。これは、早めの確率的廃棄を行わず、キュー長がある程度大きくなってから廃棄しているためと考えられる。そして、フロー数が増加しても、後方廃棄のようにスループットが落ち込むことはない。これは、平均キュー長が閾値を超えることによる廃棄がランダム廃棄に似た廃棄を行っているためと考えられる。公平性については、Flow RED と同程度の性能を示したが、Easy RED より低い性能を示している。しかし、これについては、Flow RED 以上に高いスループットで公平性を保っているため、それほど大きな問題とはならないと考えられる。

6. おわりに

本論文では、RED のパラメータを削減し、確率的な廃棄を行わないパケット廃棄方式を提案し、その有効性について検討した。

本方式では、平均キュー長算出時の重み係数 w_q の値をやや小さく設定して、実キュー長と平均キュー長の間にずれを生じさせることで、平均キュー長を対象とする閾値 max_{th} による廃棄が擬似的なランダム廃棄となることを利用している。そして、本方式が用いている 2 つのパラメータ w_q と max_{th} が、スループットと公平性に及ぼす影響について考察した。その結果、 max_{th} よりも w_q の方が性能に大きな影響を与えることが示された。さらに、既存方式との性能比較を行った結果、本方式は最も高いスループットと Flow RED と同等の公平性を示した。

今後の課題として、短期の TCP フローや UDP フローが混在する環境下での有効性、TCP の様々なバージョンとの親和性などの検証が挙げられる。

(平成 22 年 2 月 26 日受付, 平成 22 年 7 月 5 日再受付)

文 献

- (1) R. K. Jain, D. M. W. Chiu, and W. R. Hawe: "A Quantitative Measure of Fairness and Discrimination for Resource Allocation in Shared System", DEC (Digital Equipment Corporation) Research Report, TR-301 (1984-9)
- (2) L. Zang and D. Clark: "Oscillating Behavior of Network Traffic: A Case Study Simulation", *Internetworking: Research and Experience*, Vol.1, No.2, pp.101-112, John Wiley & Sons (1990)
- (3) S. Floyd and V. Jacobson: "Random Early Detection Gateways for Congestion Avoidance", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol.1, No.4, pp.397-413 (1993-8)
- (4) D. Lin and R. Morris: "Dynamics of Random Early Detection", *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, Vol.27, No.4, pp.127-137 (1997-10)
- (5) F. M. Anjum and L. Tassiulas: "Balanced-RED: An Algorithm to Achieve Fairness in the Internet", Technical Research Report, CSHCN (the Center for Satellite and Hybrid Communication Networks) T.R. 99-9 (1999-3)
- (6) T. J. Ott, T. V. Lakshman, and L. Wong: "SRED: Stabilized RED", *Proceedings of IEEE INFOCOM '99*, pp.1346-1355 (1999-3)
- (7) S. Floyd, R. Gummadi, and S. Shenker: "Adaptive RED: An Algorithm for Increasing the Robustness of RED's Active Queue Management", available at <http://www.icir.org/floyd> (2001-8)
- (8) L. A. Grieco and S. Mascolo: "TCP Westwood and Easy RED to Improve Fairness in High-Speed Networks", *Protocols for High Speed Networks*, 7th IFIP/IEEE International Workshop, PfHNS 2002, Berlin, Germany, April 2002, *Proceedings, LNCS 2334*, pp.130-146, Springer (2002)
- (9) A. Fujii and H. Inai: "Performance Comparison of Packet Discarding Schemes in a Router", *IEICE Technical Report*, IN2008-124 (2009-2) (in Japanese)
藤井敦朗・稲井 寛:「ルータにおけるパケット廃棄方式の性能比較」, 信学会技報, IN2008-124 (2009-2)
- (10) M. Christiansen, K. Jeffay, D. Ott, and F. D. Smith: "Tuning RED for Web Traffic", *Proceedings of ACM SIGCOMM '00*, pp.139-150 (2000)
- (11) G. Iannaccone, M. May, and C. Diot: "Aggregated Traffic Performance with Active Queue Management and Drop from Tail", *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, Vol.31, No.3, pp.4-13 (2001-7)

藤 井 敦 朗 (非会員) 1986 年生。2008 年 3 月川崎医療福祉大学医療技術学部医療情報学科卒業。2010 年 3 月岡山県立大学大学院情報系工学研究科博士前期課程電子情報通信工学専攻修了。同年 4 月 NTT ソフトウェア (株) 入社。在学中、ルータにおけるパケット廃棄方式に関する研究に従事。

稲 井 寛 (正員) 1961 年生。1985 年大阪大学基礎工学部情報工学科卒業。1987 年同大学院博士前期課程修了。1988 年神戸大学総合情報処理センター助手。1993 年岡山県立大学情報工学部情報通信工学科助教授。2000 年同教授、現在に至る。主として計算機及び通信システムの性能評価、通信プロトコル、広帯域通信網に関する研究に従事。ACM, IEEE, 電子情報通信学会, 情報処理学会, システム制御情報学会の各会員。工学博士。