

公平なネットワーク利用を実現するスケーラブルな パケットスケジューリング方式

Hierarchically Aggregated Fair Queuing (HAFQ) for Per-flow Fair Service in High-speed Networks

牧 一之進 † 下西 英之 ‡ 村瀬 勉 ‡ 村田 正幸 † 宮原 秀夫 †
Ichinoshin Maki Hideyuki Shimonishi Tutomu Murase Masayuki Murata Hideo Miyahara
† 大阪大学 大学院基礎工学研究科 ‡ NEC ネットワーキング研究所
Graduate School of Engineering Science, Networking Research Laboratories,
Osaka University NEC corporation

1 まえがき

Best effort 環境では特定のユーザのみが大きな帯域を占有し、その他のユーザとの間に不公平が生じる可能性がある。そのため各ユーザへの公平なサービスの実現は重要な課題であり、特に今後はアクセス帯域の増加によってさらにその重要度を増すと考えられる [1]。

我々は高速性と公平性をトレードオフとしてエッジルータからコアルータまでスケーラブルに実装可能なパケットスケジューリング方式を提案し [2]、本方式によってフロー間の公平性が向上することを示した。本方式では低速なルータではフロー毎に完全な公平性を保証でき、高速なルータに適用した場合でも公平性の劣化は少ない。従来、パケットスケジューリング方式の評価では単一ボトルネックのみに対する評価が多く、さまざまな処理速度を持つルータやボトルネックリンクがある場合の評価は数少ない。そこで本稿では低速なエッジルータと高速なコアルータからなるネットワーク環境において各パケットスケジューリング方式を比較し、フロー間の公平性について評価する。

2 HAFQ (Hierarchically Aggregated Fair Queuing)

2.1 提案方式の概要

提案方式 (HAFQ) [2] はエッジルータでは多くのキューを扱うことができるのでフロー毎にキューを割り当て、より高速なルータにおいては、扱うことのできるキュー数の減少にしたがって1つのキューに複数のフローを割り当てていく。このように少数のキューに集約されたフロー間の公平性を向上させるため、提案方式では以下で述べるように各キューに対してその収容フロー数に比例した帯域を動的に割り当て、また各キュー内では帯域使用量が多いフローからパケットを廃棄する。

2.2 ゾンビリスト

ルータにパケットが到着するとまず以下のようにゾンビリストの更新を行う。ゾンビリストはエントリとして {Flow ID, カウンタ} を持つ小規模なテーブルであり、各キュー毎に用意される。

- ゾンビリストの全エントリを検索する
 - 入力パケットの Flow ID がリスト内に存在すれば、その Flow ID を保持しているエントリのカウンタ値を1つ増やす。
 - 存在しなければ、リスト内からランダムに1つエントリを選択し、
 - * 確率 q で Flow ID を入力パケットの Flow ID で置き換え、カウンタ値を1に初期化する。
 - * 確率 $1 - q$ で何も行わない。

2.3 フロー数推定と帯域割当

次に更新されたゾンビリストが属するキューの収容フロー数を推定し、推定フロー数に比例した帯域をこのキューに割り当てる。本方式では到着パケットが属するフローのレートを推定し、これを平均して収容する全フローの平均レートを推定し、最後に平均レートを合計レートで割ったものを推定フロー数とする。すなわち、全フロー数を N 、フロー i のレートを λ_i 、全フローの平均レートを λ_{avg} とすると、 $\lambda_{avg} = \sum_{i=1}^N \lambda_i / N$ であるため、推定フロー数 \tilde{N} は以下の式で求められる。

$$\tilde{N} = \frac{\sum_{i=1}^N \lambda_i}{\lambda_{avg}} \quad (1)$$

各フローのレートは式 (2) のようにゾンビリストのカウンタ値 E_i と検索成功率 p を用いて推定することができる。 M はゾンビリストのエントリ数、 q は置き換え確率である。式 (2) では全フローの合計レートに対する各フローのレートの割合 R_i が求まり、 R_i の平均より全フローの平均レート λ_{avg} を求めることができる。

$$R_i = (1 - p) \frac{q}{M} (E_i - 1) \quad (2)$$

2.4 カウンタによるパケット廃棄

ゾンビリストのカウンタ値が大きいくほど、そのフローは他のフローよりも多くの帯域を使用している確率が高い。そこでカウンタ値の大きなフローから優先的にパケットを廃棄することにより、同一キューに収容されたフロー間の公平性を向上させる。

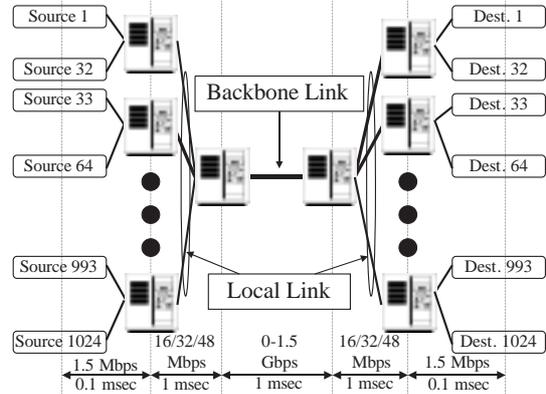


図 1: ネットワークモデル

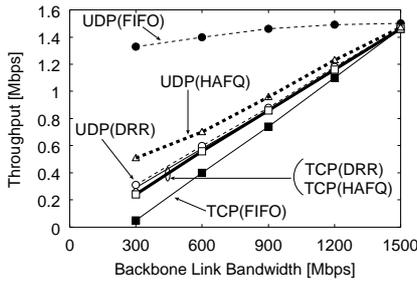


図 2: ローカルリンク 48 Mbps

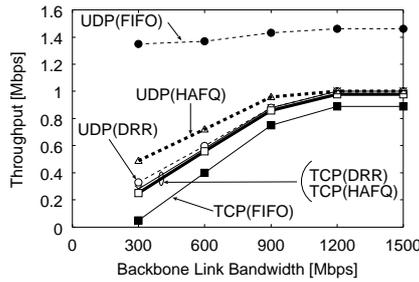


図 3: ローカルリンク 32 Mbps

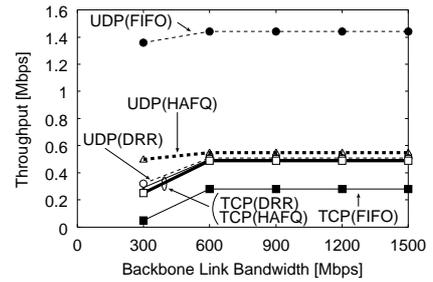


図 4: ローカルリンク 16 Mbps

3 性能評価

本稿で扱うネットワークモデルは図 1 に示すようにエッジルータとコアルータの 2 階層モデルである。コネクション数は全部で 1024 本とし、32 本のコネクションがそれぞれ 32 台のエッジルータに接続されている。この中で約 2 割 (192 本) のコネクションは、最大限に帯域を使用するヘビーユーザを想定して 1.5 [Mbps] 固定レートの UDP とし、残りのコネクションは一般ユーザを想定した TCP (Tahoe) とする。UDP コネクションは全エッジルータに均等に収容されているとし、すべてのコネクションは送信データを無限にもつものとする。エッジルータにおいては各フロー毎にキューを持ち、コアルータにおいては最大 64 のキューを持つとする。また、各キューのゾンビリストのエントリ数は 4 とする。比較のため FIFO キューのみを持つ方式とフロー毎にキューを持つ DRR (Deficit Round Robin) によってスケジューリングを行う方式も併せて評価する。

3.1 エッジルータがボトルネックになっている場合

図 2 ~ 4 ではそれぞれローカルリンクの帯域を 48、32、16 [Mbps] とし、全 TCP コネクションと全 UDP コネクションそれぞれの平均スループットを示す。エッジルータがボトルネックになっている場合、すなわち図 3、4 でバックボーンリンクの帯域がスループットに影響していない領域においては、FIFO 方式では UDP コネクションが多くの帯域を使用して TCP コネクションのスループットを低下させていることが分かる。これはローカルリンクの帯域が小さいほど顕著である。DRR 方式及び提案方式 (HAFQ) では、TCP と UDP の間の不公平性は解消され、TCP コネクションのスループットが向上する。

3.2 コアルータがボトルネックになっている場合

コアルータがボトルネックになっている場合、すなわち図 2 ~ 4 でスループットがバックボーンリンクの帯域に比例している領域においても、FIFO 方式ではコネクション間に不公平性があり、バックボーンリンクの帯域が 300 Mbps の場合には TCP コネクションはほとんど通信を行うことができないことが分かる。これに対して DRR 方式ではコネクション間の不公平性が改善されている。一方、提案方式ではコアルータでフローを集約してキューに収容しているため若干公平性の低下はあるが、フロー数推定とカウンタ値による廃棄によって DRR 方式に近い公平性が得られていることが分かる。

3.3 コアルータでフロー毎のキューイングが困難な場合
公平性の観点からは DRR 方式が最もすぐれているが、実際にはコアルータに DRR 方式を実装することは困難である。そこでエッジルータではフロー毎にキューを持つ

がコアルータでは FIFO キューのみの方式を考える。この場合図 3、5 より、バックボーンルータがボトルネックの場合には公平性を得ることができず、特に UDP コネクションが特定のエッジルータに偏って収容されている場合 (図中 hot spot) には、さらに公平性が低下することが分かる。一方、提案方式ではコアルータにおいても公平性制御が行われるため、コアルータがボトルネックになった場合の公平性が大きく向上する。また、提案方式ではバックボーンリンクの帯域が 600 Mbps 以上ある場合、UDP コネクションの偏り (図中 uniform) による公平性の低下がほとんどみられない。これはコアルータにおいて、輻輳の激しいエッジルータからのトラヒックと他のエッジルータからのトラヒックを公平にスケジューリングしているためである。

4 まとめ

本稿では、ルータの規模や速度に応じて実装可能なスケラブルなパケットスケジューリング方式を提案し、フロー毎の優れた公平性を実現できることを示した。本方式を用いることにより、エッジルータにボトルネックがある場合には DRR 方式とほぼ同等の性能を示し、コアルータにボトルネックがある場合にも TCP コネクションと UDP コネクションの間に生じる不公平性の増加を抑え、すべてのコネクションに対して公平なサービスを実現できることを示した。

参考文献

- [1] 下西他, “2.4 ブロードバンドインターネットアクセスに対応した Qos 制御技術 -公平なネットワーク利用の実現-,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2001.
- [2] 牧他, “高速バックボーンネットワークにおける公平性を考慮した階層化パケットスケジューリング方式,” 電子情報通信学会技術研究報告 (NS01-06), 2001.

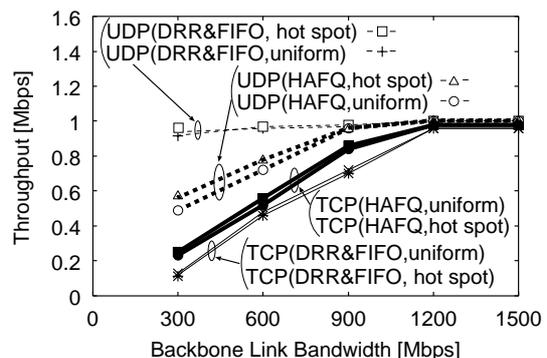


図 5: ローカルリンク 32 Mbps