

PathRefiner: 大サイズ仮想パケットを用いた 高速回線対応かつ高精度な可用帯域推定手法

黄 靖誠[†] 伊藤 尚幸[†] 大芝 崇[‡] 里田 浩三[‡] 村瀬 勉[†]

[†]名古屋大学 〒464-8601 愛知県名古屋市千種区不老町

[‡]NEC システムプラットフォーム研究所 〒211-8666 神奈川県川崎市中原区下沼部 1753

E-mail: [†]{huang.jingcheng.p4, ito.naoyuki.w5@s.mail, tom@itc}.nagoya-u.ac.jp, [‡]{oshiba, satoda}@nec.com

あらまし 高速回線の可用帯域を高精度に推定するために、(1)パケット連結法と(2)反復的分解能細粒度化法という2つの機能を持つ可用帯域推定手法PathRefinerを提案する。PathRefinerは、複数の推定パケットを送信することで可用帯域を推定する、いわゆるパケットトレイン手法の1つである。(1)パケット連結法は、MTUサイズ以下の複数パケットを連結することで、高速回線での可用帯域の推定に必要な大きなサイズのパケットを仮想的に生成する機能を持つ。(2)反復的分解能細粒度化法は、大サイズ仮想パケットの最適連結数 C を求めることで、推定にかかる通信負荷を小さく抑えつつ、推定の分解能を向上し、可用帯域を高精度に推定可能にする機能を持つ。PathRefinerを実機実装し、1 Gbpsの高速回線で可用帯域の真値を変動させて推定精度を評価した結果、真値と推定値の相対誤差の平均値が16.8%という比較的小さな値となり、高速回線の可用帯域を高精度に推定できることが確認できた。

キーワード 可用帯域推定、パケットトレイン、高速回線、高精度

PathRefiner: Accurate Available Bandwidth Estimation for High-Speed Networks Using Large-Size Virtual Packets

Jingcheng HUANG[†], Naoyuki ITO[†], Takashi OSHIBA[‡], Kozo SATODA[‡], and
Tutomu MURASE[†]

[†]Nagoya University Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-city, Aichi, 464-8601 Japan

[‡]System Platform Research Laboratories, NEC Corporation

1753 Shimonumabe, Nakahara-ku, Kawasaki, Kanagawa, 211-8666 Japan

E-mail: [†]{huang.jingcheng.p4, ito.naoyuki.w5@s.mail, tom@itc}.nagoya-u.ac.jp, [‡]{oshiba, satoda}@nec.com

Abstract To estimate available bandwidth of high-speed lines with high accuracy, we propose PathRefiner, a bandwidth estimation method with two functions: (1) packet concatenation and (2) iterative resolution refinement. It is one of the so-called packet train methods that estimate usable bandwidth by transmitting multiple estimated packets. (1) The packet concatenation method can virtually generate large packets necessary for estimating available bandwidth on high-speed lines by concatenating multiple packets of MTU size or smaller. (2) The iterative resolution refinement method improves the resolution of estimation and enables highly accurate estimation of available bandwidth while minimizing the communication load for estimation by finding the optimal number C of large-sized virtual packets to be concatenated. As a result, the average value of the relative error between the true value and the estimated value was relatively small (16.8%), confirming that PathRefiner can accurately estimate the available bandwidth of 1 Gbps high-speed lines.

Keywords Available Bandwidth Estimation, Packet Train, High-Speed Networks, High-Accuracy

1. 背景

多種多様なアプリケーションやサービスが日々出現する現在のインターネットにおいて、ネットワークの負荷やボトルネック帯域の低下は、予想がつかない。

どの程度の帯域を使うことができるのか(可用帯域[1])を使用前に知ることができれば、可用帯域に応じたサービスやアプリケーションパラメータ調整などが可能となり、さらに、優れたストリーミングアプリケーション

ョンやクラウドアプリケーションなど、便利なインターネットアプリケーションを多く導入できる。既に、可用帯域を簡単かつネットワークに負荷をかけずに調査するために、パケットトレイン[2]を用いた[3][4][5][6][7]などの可用帯域推定手法が提案されている。

しかし、これらの手法は、近年一般化している 1 Gbps クラスの高速回線対応が難しい。その理由は、高速回線では、回線速度に応じた大きなサイズの packets を短い間隔で送信する必要である。送信間隔は、端末の処理性能に依存するため、パケットサイズを大きくすべきであるが、MTU の制約があり、パケットサイズを大きくすることは難しい。また、高速回線では推定すべき可用帯域幅も大きくなることから、相対的に分解能が低くなり、つまり粗い推定になり、結果的に誤差が大きくなってしまう。ここで、分解能とは、計測器の目盛りの単位に相当し、推定の細かさの限界を表す。

そこで、本研究では、高速回線対応で、なおかつ精度良く可用帯域を推定するための手法として、(1)パケット連結法と(2)反復的分解能細粒度化法という2つの機能を持つ PathRefiner 手法を提案する。PathRefiner では、パケットトレイン方式の可用帯域推定手法である PathQuick3 [3]の推定手法を踏襲している。(1)パケット連結法は、MTU 以下の複数パケットを連結することで、高速回線の推定に必要な大きなサイズの packets を仮想的に生成する機能を持つ。(2)反復的分解能細粒度化法は、推定精度向上のために、大サイズ仮想パケットの最適連結数 C を求めることにより、推定にかかる通信負荷は小さいままで、分解能を向上する機能を持つ。

以降、2 章で、従来技術とその課題を述べる。3 章で、提案手法を説明する。4 章で、実機実験により提案手法の有効性を評価し、5 章でまとめを述べる。

2. 従来技術とその課題

本章では、まず、可用帯域を測定・推定する一般的な技術について述べる。次に、従来のパケットトレイン手法による可用帯域の推定原理と具体例を説明する。最後に、従来技術の課題を述べる。

2.1. 可用帯域を測定・推定する一般的な技術

可用帯域とは、回線容量から、実際に使用されている帯域を差し引いた残りの、使われていない帯域である[1]。可用帯域は理論的に使われていない帯域であるので、実際に使うことができる帯域とは異なるが、実際に使うことができる帯域は、トランスポートプロトコルやアプリケーションのデータ送出パターンなどによるため、一意に算出することが難しい。ここでは、アプリケーションが使える帯域の一つの指標として、可用帯域を用いるものとする。

可用帯域を測定または推定する技術として、MRTG

[8]などのルータやスイッチを通過するパケットから可用帯域を測定する手法や、検査パケットを送信して遅延などから可用帯域を推定するアクティブ推定と呼ばれる手法がある。MRTG などの測定手法は、エンドエンドにおけるボトルネック地点が不明な場合など、経路上のボトルネックが予め分からない場合には、有用ではない。また、MRTG は、ネットワーク管理者だけが利用権限を持つ場合が多く、一般ユーザが利用することは難しい。アクティブ推定としては、iperf [9]を用いた手法や、UDP パケットで構成された 3 個以上のパケット列であるパケットトレインを用いた技術 PathQuick3 [3][4]、pathChirp[5]、Pathload[6] [7]などが多数提案されている。ただし、iperf は大量のネットワークリソースを占有するため、他のユーザの通信に悪影響を与えてしまう。以下では、ネットワークを瞬時的に輻輳させることで、可用帯域を推定するパケットトレイン方式の可用帯域推定技術に限って議論する。

2.2. パケットトレイン方式の可用帯域の推定原理

パケットトレイン方式の可用帯域の推定原理は、以下の通りである。

ある間隔でパケットを送信し、それを受信したときの受信間隔が、送信間隔と同じであれば、ネットワーク内部で、パケットトレインに属するすべてのパケットが、キューイング遅延無しに到着したことを意味する。一方、間隔が送受信で異なっていれば、瞬時的な輻輳によりパケットがキューイング遅延を被ったことを意味する。パケットごとの送信レートを適宜増加させて、前述の調査を行う。瞬時的な輻輳が起こった時のパケットサイズを送信間隔で割ることで得られる送信レートが、可用帯域の推定値となる。

2.3. PathQuick3 における可用帯域推定の仕組み

PathQuick3 は、高精度・短時間・低負荷で可用帯域を推定できるパケットトレイン手法である。既に、可用帯域が 100 Mbps 以下の場合に、高精度に推定できることが示されている[4]。PathQuick3 では、最初に前節のように遅延の検出を行い、次にフィッティングを行い、推測値を算出する。

PathQuick3 では、図 1 に示すように、パケットトレイン内で各パケットのサイズを線形に増加させることで、パケットごとの送信レートを線形に増加させていく。キューイング遅延が発生し始める送信レートを可用帯域の推定値とする。例えば、図 2 に示すように、パケットサイズを g Byte ずつ増加させたとき、4 番目のパケットで初めてパケットごとの送信レートが可用帯域を超えたとする。3 番目のパケットまではキューイング遅延が発生しないため、受信間隔と送信間隔が同じ。一方、4 番目以降のパケットごとの送信レートは可用帯域を超えているため、通信経路上のボトルネ

ック箇所のルータやスイッチにおいて瞬時的に輻輳が発生し、パケットはキューイング遅延を被る。その結果、3 番目のパケットまでの受信間隔より長い受信間隔が観測される。受信間隔が広がり始める直前の 3 番目のパケットの送信レートを可用帯域の推定値とする。

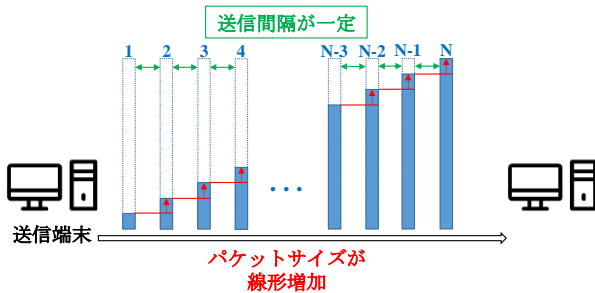


図 1. PathQuick3 でのパケット送出

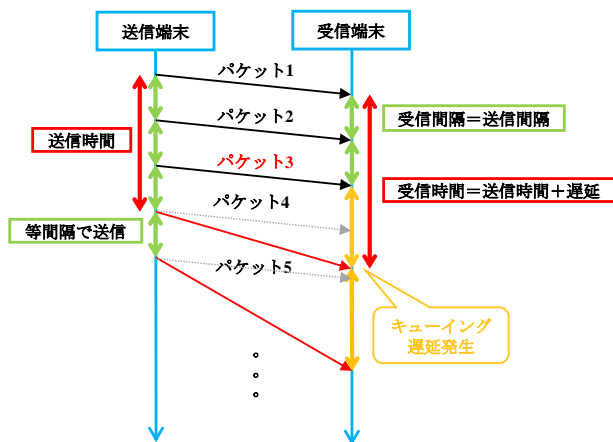


図 2. PathQuick3 によるキューイング遅延の発生

ここで、キューイング遅延は、背景トラフィックの変動やスイッチなどでのバッファ制御などの影響で、上記推定原理にとってノイズとなる遅延も含んでしまっているため、これを補正する必要がある。そこで、ノイズのない理想的な状態で理論的に導出される遅延の系列[3]のグラフを予め用意しておき、観測された遅延と最小 2 乗法でフィッティングすることでノイズの影響を緩和する。図 3 では、 i 番目のパケットまでは遅延が観測されず、 i 番目のパケットからキューイング遅延が観測されたと仮定した場合の論理的な遅延(遅延点)を各 i について描いている。 i 毎に計算された点をつないだ点線(図 3 の点線)を遅延点線と呼ぶ。論理的な遅延は、計算によって算出される[3]。この遅延点線上の j 番目のパケットの遅延点と j 番目のパケットで実際に観測された遅延(図③の×印)の各点との 2 乗誤差がもっとも小さい点線を選ぶ。例えば図 3 は、可用帯域が 46 Mbps の場合のフィッティング推定を説明している。 $i=6$ の場合に他のパケット点線より、推定したパケットと $i=6$ の点線の 2 乗誤差がもっとも小さいので、46 Mbps の空き帯域に対応する推定値は 48 Mbps

という結果になる。この例のように 46 Mbps という推定値が得られない。このとき、誤差は、2 Mbps(= 48 - 46 Mbps)となる。同様に、可用帯域が 52 Mbps の場合にも推定値は 48Mbps となってしまう。この例では、用いたパケットサイズの増分で決まる分解能が、4Mbps(= 52 - 48 Mbps)となる。分解能が 4Mbps の場合、分解能に起因する誤差の最大値も 4Mbps となる。

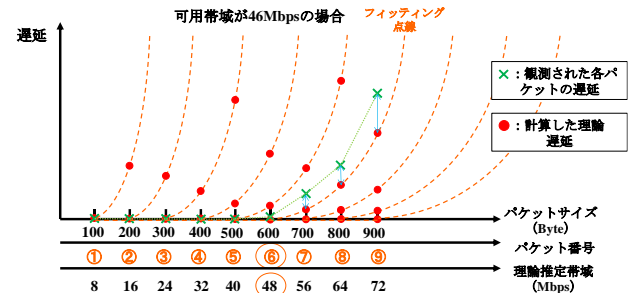


図 3. PathQuick3 によるフィッティング

2.4. 従来手法の課題

PathQuick3 を含む従来のパケットトレイン手法には、1 Gbps クラスの高速回線で可用帯域を推定するに当たって、2 つの課題がある。1 つ目は「高速回線対応の課題」であり、推定上限を 1 Gbps など高い値に設定できないことである。2 つ目は「高精度な推定の課題」であり、100 Mbps クラスの回線に比べて、1 Gbps クラスの高速回線では、推定の分解能が低下するため、推定誤差が大きくなることである。以下で、説明する。

2.4.1. 高速回線対応の課題

推定上限を高い値に設定するには、パケットの送信間隔を短くするか、パケットサイズを大きくする必要がある。しかし、パケットの送信間隔は、端末の処理性能に依存するため、端末ごとに短くできる限界値が存在する。一方、MTU の制限があるため、パケットサイズも大きくするのは困難である。例えば、現在のネットワークの MTU は 1,500 Byte の場合が多い。したがって、従来のパケットトレイン手法には、推定上限を十分高い値にできないという課題がある。なお、現在、回線はどんどん高速になってきているが、上記 MTU(1,500 Byte)は、この先も変わらなさそうで、送信間隔の制約もそれほど緩和されそうにない。

そこで、大きなパケットを送る方法が 2 つあるが、2 つとも推定には向かないと思われる。1 つは、MTU よりも大きなパケットを送信して、MTU 制限にひっかかるところで、フラグメンテーションする方法である。フラグメンテーションは、ホスト、ルータがソフトウェア処理することが多いため、正確な受信時刻が得られない可能性がある。また、ジャンボフレーム[10]を実装している機器もある。ジャンボフレームでは、MTU = 9,000 Byte という大きなパケットの通信が可能とな

る。しかし、IEEE802 では標準化されておらず、実際に利用されていない場合もある。このように、1500 Byte よりも大きいパケットを使うのは難しいのが現状である。

2.4.2. 高精度な推定の課題

推定の分解能による推定誤差も考慮されなければならない。PathQuick3 の場合、分解能はパケットサイズの増分に依存する。図 2 の例では、ネットワークを飽和させたパケットサイズは「3 番目のパケットのサイズ」+1 Byte の可能性もあるし、「3 番目のパケットのサイズ」+g Byte の可能性もある。すなわち g Byte に相当する送信レートの差分が分解能となる。具体的には、図 3 では、パケットサイズの増分 g は 100 Byte なので、分解能は 8 Mbps となる（算出手法は文献[3]を参照）。もし g が 1,000 Byte であれば、分解能は 80 Mbps となり、分解能は 10 倍に低くなる。このことより、高速回線では、低速回線と同数のパケットを用いるとすると、より高い送信レートを送出すべきである。送信されるパケット数が一定である場合、推定上限を高めるためには、パケットサイズの増分 g を大きくする必要がある。一方、増分 g Byte を大きくすればするほど分解能は低下してしまう。ネットワークへの負荷を考慮すると、パケット数を増やすことは難しいため、分解能と推定上限はトレードオフの関係になる。また、2.3 章で述べたように、推定誤差には、最大で分解能の大きさが入り込む恐れがある。

3. 高速回線対応かつ高精度な可用帯域推定手法 PathRefiner の提案

本稿では、従来手法が抱える(1)高速回線対応の課題と(2)高精度な推定の課題を同時に解決する可用帯域推定手法 PathRefiner を提案する。PathRefiner は 2 つの手法で構成されている。高速回線対応の課題を解決する(1)パケット連結法と、高精度な推定の課題を解決する(2)反復的分解能細粒度化法である。以下、それぞれを説明する。

3.1. 高速回線対応：(1)パケット連結法

パケット連結法では、複数のパケットを連結することで、仮想的に大きなパケット（仮想的パケット）を作ること、MTU よりも大きなサイズのパケットで、高速回線の推定を可能とする手法である。1 つの大きな仮想的パケットを形成する実際のパケット群をパケットグループと呼び、パケットグループ内のパケットを「パケットグループ番号」-「パケットグループ内パケット番号」と表記する。送信間隔は各パケットグループの先頭のパケットの送信時刻の差とする。受信間隔は、各パケットグループの最後のパケットの受信時刻の差とする。具体的には、図 4 に示すように仮想パ

ケット間、つまりパケットグループ間の送信間隔を一定に保ち、パケットグループ内では同じ連結数 C のパケットを連続で送信しながら、各パケットグループのパケットサイズを線形に増加させる。パケットグループ内の複数パケットのパケットサイズはすべて同じとする。図 5 に示すように、パケットグループ 4 のパケット 4-3 で初めてパケットごとの送信レートが可用帯域を超えた場合、パケットグループ 3 まではキューイング遅延が発生しないため、受信間隔は送信間隔と等しくなる。一方、パケットグループ 4 の送信レートは可用帯域を超えているため、通信経路上のボトルネック箇所のルータやスイッチにおいてキューイング遅延が発生する。その結果、受信間隔が送信間隔よりも広がる。受信端末において、受信間隔が広がり始めたパケットグループがパケットグループ 4 であるので、その直前のパケットグループ 3 の送信レートを可用帯域の推定値とする。連結数 C を増やすことで、論理的には、いかなる高速回線にも対応できる。しかし、現実的には、後述する精度の問題があるため、ボトルネックとなるである回線容量を上限として、連結数 C を設定することになる。

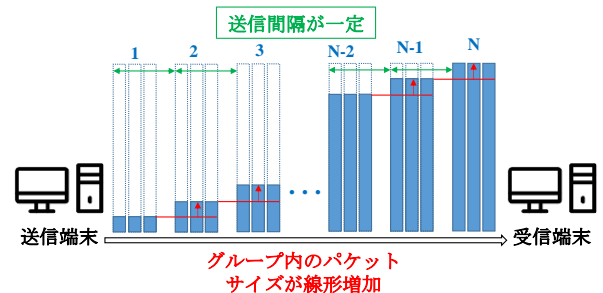


図 4. PathRefiner における(1)パケット連結法でのパケットトレインの構造($C = 3$ の場合)

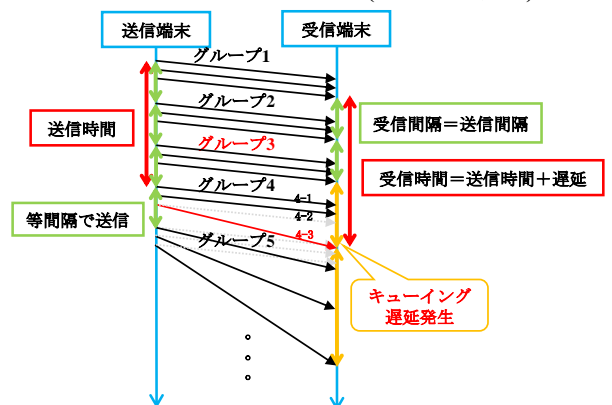


図 5. PathRefiner における(1)パケット連結法でのパケット送受信のシーケンス図($C = 3$ の場合)

3.2. 高精度推定：(2)反復的分解能細粒度化法

反復的分解能細粒度化法では、最適な連結数 C を試行錯誤で絞り込んで、高速回線対応機能を維持しつつ、

分解能に起因する推定誤差を低減する。以下では、まず連結数 C と分解能の関係について述べ、その後、最適な C を求めるための反復的分解能細粒度化法について説明する。

まず、図 6 を用いて、連結数 C を絞り込んで最適化する必要性を示す。連結数 C が異なれば分解能が異なり、推定誤差も異なるためである。例を挙げて説明する。回線容量は 300 Mbps、可用帯域は 54 Mbps とする。このとき、 $C=1$ の場合と $C=3$ の場合とで分解能の起因する誤差を比較する。キューイング遅延が発生し始める送信レートは、54 Mbps であるが、遅延が観測されるのは、 $C=3$ ではパケットグループ 2 で、 $C=1$ ではパケットグループ 7 である。その結果、フィッティングを行うと、推定結果がそれぞれ 48 Mbps、56 Mbps という解が得られ、真値との誤差は、6 Mbps と 2 Mbps になる。これより、連結数 $C=1$ はより良いフィッティング結果を得ることができている。

このように、 C を小さくするほど、分解能を高くできる。しかしながら、高速回線対応のためには、 C を大きくする必要がある。そこで、最適な C を求めるために、反復的分解能細粒度化法で C の選択範囲を絞り込んで、最適値を求める必要がある。

反復的分解能細粒度化法は、推定値に応じて C の値を減少させて、パケットトレインを何度か送信して推定を反復して行うことで、最適な C を求める。推定の都度、推定された可用帯域をぎりぎり含むような新しい C 値を設定して、この推定を繰り返す。終了条件は、同じ C 値が連続して出ている場合であり、その C を最適分割数 C_{opt} に決めて終了する。ただし、推定遅延の統計的なばらつきを考慮して、本手法にロバスト性を持たせるため、マージンを取り、 C の値は 1 つ大きめに設定する。図 7 の例で、連結数 C の絞り込む手順を示す。まず、一回目に C は 9 を設定して、推定する。二回目に前回の $C=6$ より 1 つ大きい 7 を設定して推定する。三回目に前回の $C=3$ より 1 つ大きい 4 を設定して推定する。四回目に前回の $C=4$ より 1 つ大きい 5 を設定して推定して、得られた $C=4$ は前回と同じなので、その C を最適分割数 C_{opt} に決めて終了する。

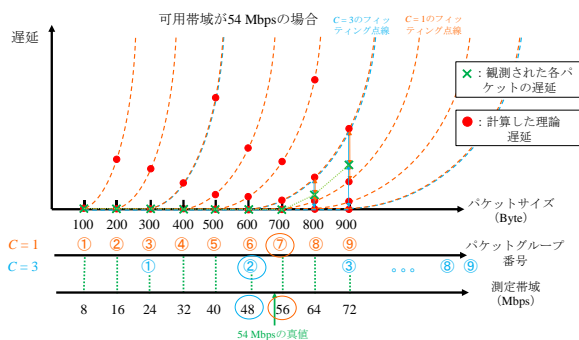


図 6. 連結数 C の違いに起因する推定誤差の違い

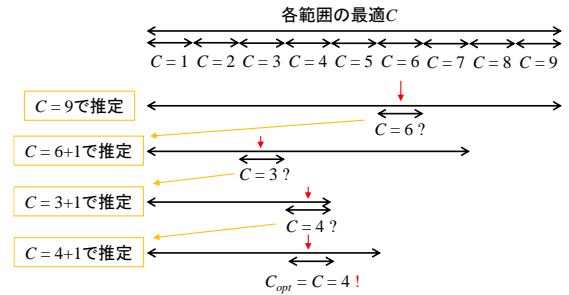


図 7. PathRefiner における (2) 反復的分解能細粒度化法

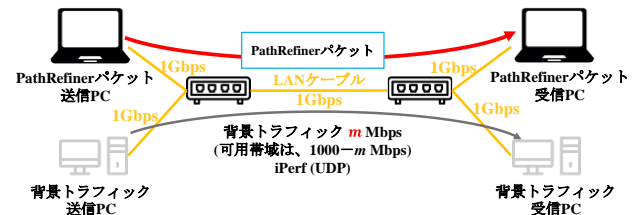


図 8. 可用帯域推定の評価モデルとパラメータ

4. 高速回線での実機を用いた評価実験

4.1. 評価モデルと実験構成

実機を用いて、提案する可用帯域推定法が、高速回線対応可能で、精度が高いことを実証する実験を行う。図 8 に評価実験の機材と接続構成を示す。他のユーザが通信をしている最中に、PathRefiner の送信 PC から PathRefiner の受信 PC へパケットトレインを送信して可用帯域を推定した。背景トラヒックは、背景トラヒック送信 PC から背景トラヒック受信 PC へ iperf を用いて、指定した送信レートの UDP ストリームを送信する。ギガイーサ回線とギガイーサスイッチなどを用いて、1 Gbps の回線容量に様々な可用帯域を作り出す試験ネットワークを構成した。実験機材の都合で、可用帯域の範囲として高速な通信速度である 500～1000 Mbps を設定し、推定を行った。そのために、背景トラヒック m の通信速度を 0 Mbps から 500 Mbps まで 50 Mbps 刻みで変化させた。この 11 パターンで、PathRefiner のパケットトレインを送信して推定値を記録した。可用帯域の真値は、式(1)で表される。

$$\text{真値} = \text{回線容量} - \text{背景トラヒック } m \quad (1)$$

また、推定誤差は式(2)、相対誤差は式(3)、標準偏差は式(4)で定義する。式(4)の n は推定回数である。

$$\text{推定誤差} = |\text{推定値} - \text{真値}| \quad (2)$$

$$\text{相対誤差} = \frac{\text{推定誤差}}{\text{真値}} \quad (3)$$

$$\text{標準偏差} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\text{推定誤差}_i - \overline{\text{推定誤差}})^2} \quad (4)$$

また、今回推定に使用したパラメータは以下の通りである。パケット送信間隔は 0.1 ms、パケットグループ内の先頭パケットのサイズは 32 Byte、パケットグループ内のパケットサイズの増分は 12 Byte、パケットパケットグループ数は 120 個、連結数 C の初期値は 9 である。これらのパラメータを用いた理由は下記の通りである。利用した PC で正確に送信可能な時刻、推定可能な時刻が 0.1 ms 単位であり、通常の PC を用いる場合の限界とした。0.1 ms 間隔で送信するため、1 Gbps を推定するには、仮想パケットサイズは 12500 Byte 以上が必要になる。一つのパケットを MTU 以下にするために、連結数 C を 9 とした。120 個のパケットグループを使ったため、開始時のグループ 1 のパケットサイズを 32 Byte、増分 12 Byte とし、最終グループ内のパケットサイズが MTU くらいとなるように設定した。これらの値から計算される推定下限および上限は、2.6 Mbps、1044 Mbps である（算出手法は文献[3]を参照）。

4.2. 評価結果

4.2.1. 高速回線対応

実験の結果、後述するように、1 Gbps の回線容量を持つ高速回線であっても可用帯域を対応することができた。従来手法の PathQuick3 では、同じ送信間隔では 120 Mbps までの可用帯域しか推定できないことも確認した。実装した PathRefiner を用いれば、理論上は、MTU サイズに関わらず、任意の高速回線の可用帯域が推定できる。

4.2.2. 推定精度

図 9 は PathRefiner の推定結果である。図中の各点は、背景トラフィックを変化させた各パターンにおける平均推定値である。各点の上下の線の長さは、各パターンにおける推定値のばらつきを±1 標準偏差で表している。平均推定値が真値に完全に一致する場合には、斜め 45° の直線上に点がプロットされる。11 パターンの背景トラフィックの通信速度に 100 回ずつ、すなわち計 1,100 回の推定を行った。全 11 パターンを総合すると、推定誤差の平均値は 121.5 Mbps、相対誤差の平均値は 16.8%、標準偏差の平均値は 136.7 Mbps であった。

5. まとめ

本稿では、高速回線対応かつ高精度な可用帯域推定手法 PathRefiner を提案した。PathRefiner では、MTU サイズ以下の複数パケットを連結して、高速回線の推定に必要な大きなサイズの packets を仮想的に生成す

ることで、高速回線に対応できる。また送信する大サイズ仮想パケットの最適連結数 C を求める手法を用いて分解能を向上することで、高精度に推定できる。

PathRefiner が高速回線で高精度に推定できることを実証するために、実機により 1 Gbps 回線で推定誤差の評価を行った。評価の結果、相対誤差の平均値が 16.8% という比較的小さな値となり、高速回線で高精度に推定できることが確認できた。

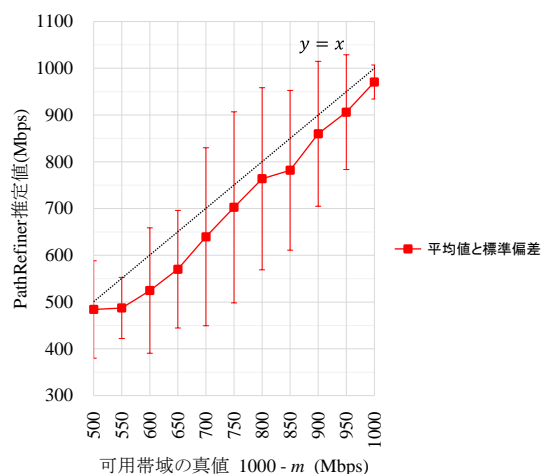


図 9. PathRefiner での推定結果

文 献

- [1] R. Prasad, C. Dovrolis, M. Murray, et al., "Bandwidth estimation: metrics, measurement techniques and tools," IEEE network, 17(6): pp. 27-35, 2003.
- [2] R. Jain, S. Routhier, "Packet trains--measurements and a new model for computer network traffic," IEEE journal on selected areas in Communications, 4(6): 986-995, 1986.
- [3] T. Oshiba, K. Nogami, et al., "Robust available bandwidth estimation against dynamic behavior of packet scheduler in operational LTE networks," IEEE Symposium on Computers and Communication (ISCC), pp. 1276-1283, Italy, August 2016.
- [4] N. Ito, T. Oshiba, et al., "PathRakeTCP, Available Bandwidth Estimation Using Many TCP Connections for Passing through Firewalls," IEICE Technical Report; IEICE Tech. Rep., 122(146): 21-26, 2022.
- [5] V. J. Ribeiro, R. H. Riedi, R.G. Baraniuk, J. Navratil, and L. Cottrell, "pathChirp: Efficient Available Bandwidth Estimation for Network Paths," Passive and active measurement workshop, USA, April 2003.
- [6] C.L.T. Man, G. Hasegawa, et al., "An inline network measurement mechanism for highspeed networks," IEEE/IFIP Workshop on End-to-End Monitoring Techniques and Services. IEEE, pp. 66-73, 2006.
- [7] M. Jain and C. Dovrolis, "End-to-end available bandwidth: measurement methodology, dynamics, and relation with TCP throughput," ACM SIGCOMM, pp. 295-308, USA, October 2002.
- [8] T. Oetiker, D. Rand, "MRTG: The Multi Router Traffic Grapher," LISA., 98: 141-148, 1998.
- [9] A. Tirumala, et al., "Iperf: The TCP/UDP bandwidth measurement tool," <http://dast.nlanr.net/Projects/Iperf/>, 1999.
- [10] R. Winter, et al., "Ethernet jumbo frames," Ethernet Alliance, 2009.