

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 12 月 16 日現在

機関番号：11401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560439

研究課題名(和文) 複数の回線品質の同時推定を可能とするアクティブ測定方式の研究

研究課題名(英文) Study on active measurement technique of available bandwidth and link capacity at one time

研究代表者

小原 仁 (Obara, Hitoshi)

秋田大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：50344768

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：インターネットにおける通信品質と最も深く関係するend-to-end回線の可用帯域とリンク容量を推定する従来技術はそれぞれ独立に多数回の測定を要し、試験パケット量が増えるとともに測定誤差が大きい問題があった。本研究は、速度の異なる2つの試験パケットを送信し、受信点での試験パケットの時間分散を直線近似することで可用帯域とリンク容量の同時推定を可能とする。提案方式をCプログラムで記述してPCに実装し、最大10リンクの実験ネットワークを構築して性能を実測した。従来の代表的な測定技術であるDietToppと比較し、測定誤差は最大で50分の1以下、試験パケット量は最大で4分の1以下となることを確認した。

研究成果の概要(英文)：Available bandwidth, which is defined as the minimum unused bandwidth between a pair of end-to-end users, deeply relates to the quality of the Internet. A number of estimation techniques of available bandwidth have been developed and evaluated through simulation and experiment. However, most of them need a number of probing packets for estimating available bandwidth. We proposed a new technique, named packet train pair (PTP), which uses only a pair of probe trains with different rate. PTP not only requires less amount of probing packets, but can estimate link capacity simultaneously. It also keeps estimation error small. Our experimental results over a multi hop network implemented in our laboratory showed that the amount of probing packets and estimation error were reduced to about one quarter and one fiftieth, respectively.

研究分野：通信ネットワーク

キーワード：インターネット 可用帯域 アクティブ測定

1. 研究開始当初の背景

現在、インターネットでは IP 電話や動画配信などのリアルタイム通信が広く普及してきており、遅延時間や通信速度などの点で高い回線品質が求められている。この現状を踏まえ、ISP は一部のユーザに対し、通信速度などのいくつかの項目に関して品質保証型サービス(Service Level Agreement, SLA)を提供している。ユーザの通信速度は通信プロトコルや Round Trip Time (RTT) などに大きく依存する。RTT は距離と回線容量に依存しており、本稿では下位レイヤの特性であるリンク容量と実際に使用可能な空き容量(以下、可用帯域と呼ぶ)に注目する。

可用帯域を推定する方法は、アクティブ測定とパッシブ測定に大別される。アクティブ測定は、試験用パケット(以下、「プローブ」と呼ぶ)を送信し、キューイング遅延による送受信間のプローブ間隔の変化から可用帯域を推定する。アクティブ測定による可用帯域推定方式は従来、多くの方式が提案されてきた。一方、可用帯域の上限となるリンク容量を測定したいというニーズもあり、いくつかの測定方式が可用帯域推定技術とは独立に提案されてきた。しかし、プローブによるネットワーク負荷の上昇を最小とするため、可用帯域とリンク容量を同時に推定できる方式が望まれる。

従来、一回の測定で可用帯域とリンク容量を同時に推定可能な方式は、筆者らの知る限りにおいて DietTopp 方式のみである。DietTopp は線形回帰を用いて、可用帯域とリンク容量を推定する。初めに、最大速度 v_1 でプローブを送信し受信速度 v'_1 を算出した後、 $(v'_1, 1.5 \cdot v'_1)$ の範囲で速度を均等分割した複数のプローブを送信する。その後、送信したプローブの送信速度と送受信速度の比から線形回帰を用いて推定を行う。送信するプローブ数に依存して精度は変わってくるが、通信路の状況により大きな誤差を生じる問題があった。

2. 研究の目的

本稿では、1 回のプローブ送信で可用帯域とリンク容量を同時に推定可能な方式を提案する。その方式を PC のアプリケーションソフトとして実装する。このように実装した提案方式の性能を研究室内に構築したマルチホップネットワークにおいて実験的に評価する。その実験結果を従来の DietTopp 方式と比較し、今後の課題を明らかにする。

3. 研究の方法

3.1 提案方式の原理

図 1 に示すリンク容量 C 、クロストラヒック v_{ct} が流れる可用帯域 A の 2 ホップのネットワークを考える。そこへ速度 $v \geq A$ のプローブを送信した場合の受信速度を v' 、同様にクロストラヒックの受信速度を v'_{ct} とした場合、流体近似を適用すると流量保存則から次式が得られる。

$$(v + v_{ct}) \cdot t = (v' + v'_{ct}) \cdot t' \quad (4)$$

これを、2 つのプローブの送信速度 $v_1 > v_2 \geq A$ に適用する。キューイング遅延が発生する状況では $v' + v'_{ct} = C$ となるため、

$$(v_1 + v_{ct}) \cdot t_1 = C \cdot t'_1 \quad (5)$$

$$(v_2 + v_{ct}) \cdot t_2 = C \cdot t'_2 \quad (6)$$

が成立する。これらを C について解くと次式が得られる。

$$C = \frac{v_1 - v_2}{\frac{t'_1}{t_1} - \frac{t'_2}{t_2}} \quad (7)$$

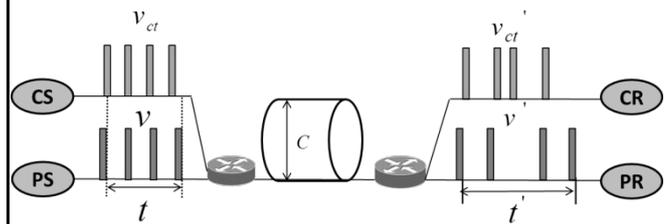


図 1. 2 ホップのネットワーク

図 1 における送信プローブの間隔に対する受信プローブの間隔の比を図 2 に示す。プローブ速度が A 以下の場合、送受信間隔の比は平均的に 1 となる。しかし、プローブ速度が A より大きくなった場合、送受信のプローブ間隔の比は線形的に増加し始める。そこに、前述の 2 つのプローブの座標をプロットした場合、 C はその 2 点の傾き a の逆数と一致する。

すなわち、

$$C = \frac{1}{a} \quad (8)$$

と表される。 A は、切片 b を算出した後、次式より得られる。

$$A = \frac{b-1}{a} \quad (9)$$

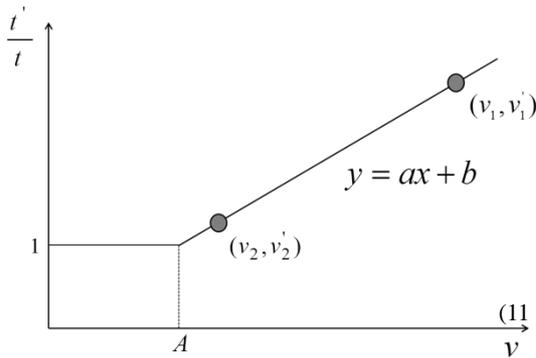


図 2. 送信速度と送受信比の線形区分曲線

3.2 速度更新

速度が異なる2つのプローブを用いて直線の傾きを算出する場合、次に述べる2つの条件に注意する必要がある。第一の条件は、2つのプローブ速度が可用帯域以上でなければならないことである。この条件が満たされない場合 ($v_2 < A$)、図2より直線の傾きを過小評価してしまうためである。第二の条件は、プローブの速度差が大きいことである。速度差が小さい場合、直線区間が短くなり推定精度が劣化する。

これら2つの条件をふまえ、最適なプローブ速度を選択するため、本方式では受信したプローブ速度を参照して送信プローブ速度を更新する方法(図3)を提案する。すなわち、最初に最大速度でプローブを送信する。次に、その受信速度を算出し、その値を送信速度に設定したプローブを再び送信する。図3に示すように、受信速度の減少率は可用帯域付近で大きく低下する(緩やかになる)性質がある。よって、プローブを送信する度に*i*段階とその直前の*i-1*段階の受信速度の相対的な差を計算し、下記の収束条件を満たした時に測定を終了する。一般に、 δ は0.1以下の微小な値に設定する。

$$\frac{v'_{i-1} - v'_i}{v'_i} \leq \delta \quad (10)$$

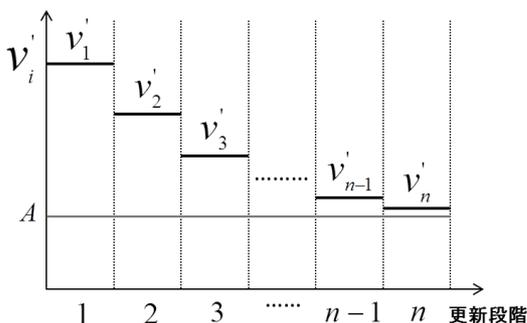


図 3. 速度更新による受信速度の推移

最後に推定に用いたプローブの内、3番目と収束時 (n 番目) の送受信プローブ間隔の比を用いて、(10)式より C を算出する。

$$C = \frac{v_3 - v_n}{\frac{t'_3}{t_3} - \frac{t'_n}{t_n}} \quad (11)$$

式(11)の C の算出において、1番目ではなく3番目のプローブを用いる理由は次の通りである。図4のように、タイトリンクである link2 の先導に link1 が存在する3ホップネットワークを考える。図2と同様に、送信プローブ間隔と受信プローブ間隔の比の軌跡を示すと、送信速度が A_1 以上で link2 とともに link1 でも遅延が発生するため、図5のように直線区間が2つに増える。そのため、1番目のプローブを用いた場合、傾きが過大に評価される。また、速度更新を行った2番目のプローブでも、同様の問題が発生する可能性があることが実験より判明した。以上の理由から、3番目のプローブを採用した。

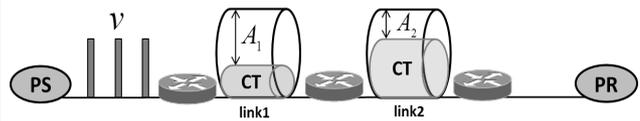


図 4. 3ホップネットワーク

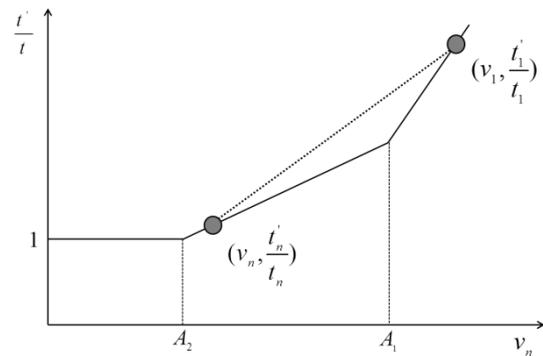


図 5. 送信速度と送受信比の線形区分曲線(2)

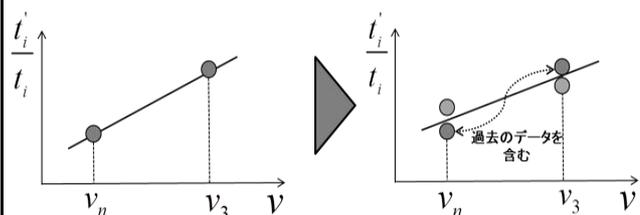


図 6. 過去のデータを含む回帰更

3.3 回帰更新

式(11)によってリンク容量が推定可能であるが、単純に2点のみを用いて直線の傾きを算出すると推定誤差が大きくなる。そこで、プロット数を増やせば推定誤差を小さくできると考えられる。前項の速度更新が収束した後、図6のように送信速度を v_3 および v_n とした一対のプロブを再び送信する。2回の測定から得られる計4点のプロット数から、最小二乗法によって傾きと切片を算出する。そして、再び一対のプロブを送信し、過去の全てのデータ(計6点)を用いて傾きと切片を算出する。これを5回繰り返した後、全ての測定データをリセットして、あらためて測定を繰り返す。

3.4 実験条件

図7に示す4ホップの実験ネットワークを用い、タイトリンクが先頭または末尾に位置する場合の2パターンについて実験を行った。実験条件を表1に示す。クロストラフィックの各パケット長は、インターネット上で多数を占める二種類のパケット長を用いた。

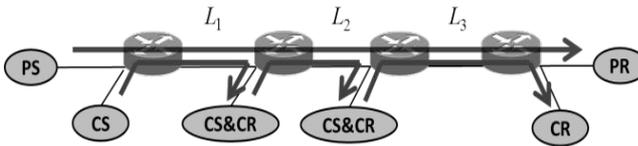


図7. 実験ネットワークの構成

表1. 実験条件

プロブ長[bytes]	1500
プロブ数[個]	50
CTパケット長[bytes]	576, 1500[bytes]
可用帯域[Mbps]	20,80,50(exp.1) 50,80,20(exp.2)
リンク容量[Mbps]	全て 100
推定回数[回]	50

3.5 実験結果

可用帯域とリンク容量の推定結果の一例を図8と図9に示す。また、その場合の両者の推定誤差と標準偏差を表2に示す。タイトリンク位置が末尾の場合、先頭時と比べて可用帯域とリンク容量の双方の推定精度が劣化する。これは、3番目のプロブ間隔の送受信比がばらついているためである。図10と図11にタイトリンク位置別に v_3 および v_n と送受信プロブ間隔の比を示す。先頭時と比べ、末尾時は送信速度に対して送受信間隔の

比が大きくばらついている。また、それらの値は過小評価傾向であるため、式(11)の分母が小さくなり推定値を過大評価している。さらに、式(9)と式(10)より可用帯域とリンク容量の推定値は互いに反比例するため、可用帯域は過小評価される。なお、詳細は割愛するが、プロブ数を30個に設定して実験を行った結果、タイトリンク末尾でリンク容量の推定値が過小評価されるという逆の結果が得られた。このため、最適な測定条件については今後も検討が必要である。

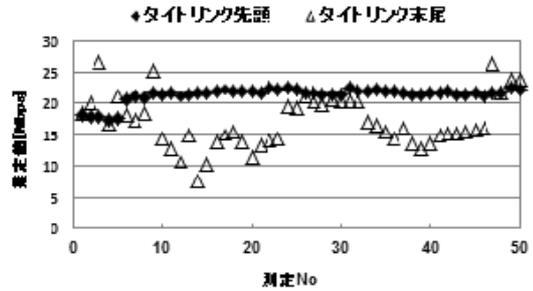


図8. 可用帯域の推定値

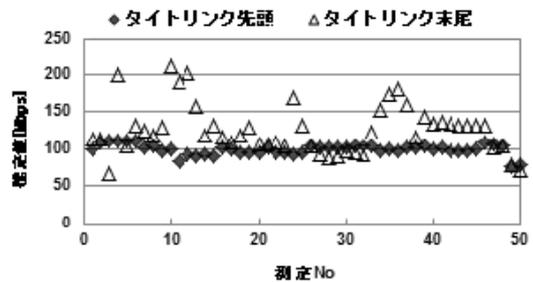


図9. リンク容量の推定値

表2. 可用帯域とリンク容量の推定誤差と標準偏差

実験 No.		Exp.1	Exp.2
ABW	推定誤差[%]	9.68	12.2
	標準偏差[Mbps]	1.26	4.13
Cap	推定誤差[%]	0.951	26.2
	標準偏差[Mbps]	7.56	33.1

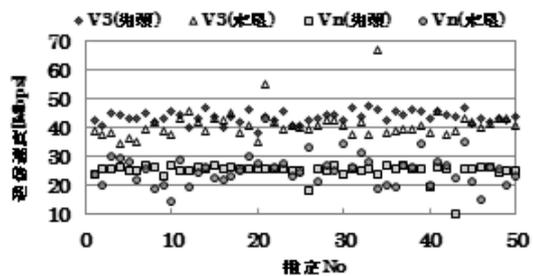


図10. タイトリンク位置の違いによる v_3 と v_n

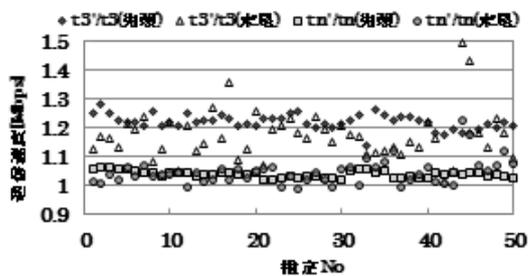


図 11. タイmlink位置の違いによる $\frac{t_3}{t_3}$ と $\frac{t_n}{t_n}$

4. 研究成果

本研究では、可用帯域とリンク容量を、1回の測定で同時に推定可能な方式を提案した。線形回帰による推定は、従来方式のDietToppでも用いられているが、それは適切な回帰直線となることが保証されていない。それに対し、提案方式は受信速度の更新処理を行うことによって、理想に近い区間で回帰直線が分布されることを保証する。受信速度更新処理は、1番目のトレインの受信速度を算出後、その値を次のトレインの送信速度に設定し、再び送信する。この処理を繰り返した場合、速度推移が可用帯域付近で滑らかになるため、そこへ終了条件を組み込むことにより、可用帯域付近で送信を終了させる。この処理によって、区間も理想で長さも大きい回帰直線を算出することができる。また、DietToppは1回の測定あたりに用いる送信プローブ量が多い。そこで、提案方式では受信速度更新の処理により得られた速度で、2つのトレインを1組、送信することを繰り返す回帰更新の処理を行う。この処理によって、過去のデータを有効活用することにより、推定値のばらつきを削減することができる。さらに、受信速度更新処理で得られた速度を用いるため、送信プローブ量を大幅に削減することができる。

リンク数と可用帯域の様々な条件下で、提案方式と従来方式のDietToppの性能を比較した。その結果、リンク数が増加するにつれ、提案方式はDietToppに比べ推定精度が向上した。1リンクの場合は、DietToppの方が精度は優れていたが、実際のインターネットにおいて、エンドユーザとの通信は必ずマルチリンクとなる。提案方式の回帰直線は、2つの速度を用いて算出する。DietToppのように、その区間を増やすべきではないかと考えられるが、その場合、速度の大きいトレインがタイmlink以外のリンクでもキューイング遅延を受けやすくなるため、傾きが過大評

価される危険性がある。速度の小さいトレインが適切に分布していれば、可用帯域の推定値は過小(過大)評価の影響を受けにくい。以上より、回帰直線による算出は、提案方式のように2点の速度による算出が最も理想である。リンク容量の推定値はばらつきが大きくなったが、リンク容量は一般に10Mbps, 100Mbps, 1Gbpsと離散的な値である。そのため、推定値が非常に大きくばらついていない限りは、リンク容量の予測は可能である。以上より、リンク容量の推定値に関しては、今後は推定値のばらつきを削減することより、異常値を算出させないことに重点を置くべきである。ただし、現在の光ファイバネットワークで主流のSDH多重伝送システムにおいて、リンク容量は論理的に分割して利用される場合もあり、この点に関しては今後の検討課題である。

線形回帰より推定する両方式において、推定精度が低下する通信路の最悪条件として、タイmlinkが複数、もしくはそれに近い容量のリンクが存在する場合である。これは、理想ともいえる1リンクに比べキューイング遅延を非常に受けやすく、トレイン長比が大きくなってしまいうためである。この条件のもとに、実際のインターネットでは、通信路の両端であるエンドユーザが属する2つのリンクの状態に、推定精度はほぼ依存すると考えられる。また、タイmlink位置が末尾の方が、先頭時よりリンク容量の推定値(傾き)がばらつく傾向がある。先頭の場合、回帰直線は可用帯域のみで立ち上がる。しかし末尾の場合、先導のリンクによって、さらに区間が増加する。したがって、回帰直線の長さが短くなり傾きがばらつきやすくなるためである。

全ての測定で共通して言えることは、従来方式に比べ、提案方式の方が推定値のばらつきは大きいだが、送信プローブ量が削減された点である。これはトレードオフの関係である。今回の実験では、トレイン内のプローブ数を全て50個に設定したが、これを変更することにより結果が大きく変化する可能性もある。また、提案方式は回帰更新の処理を5回繰り返すことにより、プローブ量を削減することができたが、今後は実際のインターネットによるクロストラヒックの時間的な変動を考慮して、適切な回数を検討すべきである。

以上より、従来方式と比べ、提案方式は推定精度と送信プローブ量のトレードオフの問題を解決することができた。しかし、推定

値のばらつきや、最悪条件下での推定精度の低下が課題として残る。そのため今後の対応策として、適切な回帰直線を算出するためにトレインパラメータのフィルタリングが考えられる。今回は用いなかったが、ロバスト推定などのフィルタをかけて異常値を取り除くことができれば、さらなる精度向上が期待される。また、前述したように、回帰更新回数や速度更新の閾値といった、各パラメータの最適化の検討も重要である。そのためにも、実際のインターネットに近い環境による測定が必要と考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 1 件)

(1) H. Obara, S. Koseki, P. Selin, "Packet train pair: A fast and efficient technique for measuring available bandwidth in the Internet," Proc. of SICE Annual Conference, pp. 1833-1836, Akita, Japan, August 2012

〔学会発表〕(計 6 件)

(1) Elmad・ヒジル, 加藤陽介, 小原仁, " 一対のペアを用いた可用測定方式の基本検討 ", 平成 24 年度電気関係学会東北支部連合大会, 2F12, 秋田県立大学, 2012 年 8 月 30 日

(2) 西森大貴, 加藤陽介, 小原仁, " PTP を用いたマルチホップパスの可用帯域の測定技術の検討 ", 平成 24 年度電気関係学会東北支部連合大会, 2F14, 秋田県立大学, 2012 年 8 月 30 日

(3) Mohd Hizir, 加藤陽介, 小原仁; " Basic study of available bandwidth measurement principle by using pair of packet pair ", 平成 25 年度電気関係学会東北支部連合大会, 会津大学, 2013 年 8 月 22 日

(4) 作山貴洋, 加藤陽介, 小原仁, " PTP 方式による可用帯域とキャパシティの同時推定法の提案 ", 平成 25 年度電気関係学会東北支部連合大会, 1F12, 会津大学, 2013 年 8 月 22 日

(5) 作山貴洋, 加藤陽介, 小原仁, " アクティブプロービングによる可用帯域・回線容量同時推定方式の提案 ", 平成 26 年度電気関係学会東北支部連合大会, 1F03, 山形大学, 2014 年 8 月 21 日

(6) 作山貴洋, 加藤陽介, 小原仁, " インターネットにおける可用帯域とリンク容量の線

形回帰更新による同時推定方式の提案 ", 計測自動制御学会東北支部 50 周年記念学術講演会, B202, 東北大学, 2014 年 12 月 11 日

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

国内外の別:

取得状況 (計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

取得年月日:

国内外の別:

〔その他〕

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小原 仁 (Obara Hitoshi)

秋田大学・工学資源学研究所・教授

研究者番号: 50344768

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし