

プローブトレインペアを用いた可用帯域測定方式の改良

Improvement of Available Bandwidth measurement method Using a Probe Train Pair

西沢 英朗 (秋田大), 加藤 陽介 (秋田大), 小原 仁 (秋田大)

Hideaki Nishizawa, Yosuke Kato, Hitoshi Obara

キーワード: アクティブ測定(active measurement), 可用帯域(available bandwidth),
線形回帰更新(recursive linear regression)

〒010-8502 秋田市手形学園町 1 - 1 秋田大学大学院工学資源学研究所 電気電子工学専攻
Tel. 018-889-2488, Email: m9015143@wm.akita-u.ac.jp

1. まえがき

近年, インターネットで提供されるサービスは多様化しており, 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いる. それに伴い, 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¹⁾. SLA 制度の回線品質の保証を行う重要な指標の 1 つに可用帯域がある. 可用帯域とは End-to-End 通信路のうち最小の空帯域を表す指標である.

可用帯域を推定する方法は, 大きく分けて, アクティブ測定とパッシブ測定がある^{2,3)}. 特に, アクティブ測定は, プローブと呼ばれる試験用パケットを送信し, 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. この方法は可用帯域の情報取得にかかるコストが少なく, リアルタイムな推定が可能という点からエンドユーザー向けの方法であると言える. アクティブ測定の研究は現在までに様々な研究が行われてきた⁴⁾. Pathload⁵⁾に代表される初期の技術はプローブ量が多くなりネットワークに過剰な負荷をかける欠点があった. 3 章で述べるように最近では少ないプローブ量で精度よく可用帯域を推定する方式が目ざされている.

本報告では複数のデータ点に線形回帰を行うことで可用帯域を推定する方法^{7,8,9)}に注目する. 従来方式では送信速度と送受信間隔比に関する線形回帰を行うことで可用帯域を推定していたが, これらの方式は使用プローブ量が少ないという利点がある一方で, 推定値のばらつきが大きいという問題があった. そこで本報告では, 従来方式では利用されていなかった測定データを使用することにより, 同じプローブ量で推定精度を改善する方法を提案する. さらに 2hop の実験ネットワークで実際に動作させて性能評価を行い, 今後の課題を明らかにする.

2. 帯域幅と可用帯域の定義

帯域幅とは, 通信路を構成する各リンク容量の最小値であ

る⁶⁾. リンク数 N から成る通信路において, リンク i における帯域幅を C_i としたとき ($1 \leq i \leq N$), 帯域幅 C_b は

$$C_b = \min_{i=1,2,\dots,N} C_i \quad (1)$$

となり, この帯域幅 C_b が通信路の最大伝送速度となる. 一般的に最小の帯域を持つリンクをナローリンクと呼ぶ⁴⁾. 次に, 可用帯域とは, 各リンクにおける利用可能な帯域幅の最小値のことである. リンク i において, 使用率 U_i のクロストラフィックが流れている時の可用帯域 A_i は

$$A_i = C_i(1 - U_i) \quad (2)$$

と表される. なお, クロストラフィックとは他のユーザが使用中の帯域を表す. この通信路における可用帯域は

$$A = \min_{i=1,2,\dots,N} A_i \quad (3)$$

となる. 最小の可用帯域を持つリンクをタイトリンクと呼ぶ⁴⁾. 送信速度が A 以下の場合, 送信に対する受信のプローブ間隔の比は平均的に 1 に等しい. しかし, 送信速度が A を超える場合はキューイング遅延が発生するため, その比は 1 を超えるという性質がある. この性質は可用帯域を同定する際に重要な役割を果たす. 時間間隔 T の領域において, プローブ数を M 個, 1 つのプローブのデータ量を D [bits] とすると, そのプローブの速度 v は $v = M D / T$ [bps] となる. なお, ネットワークにおいて, プローブが通過するノード数をホップ数と呼ぶ.

3. 従来のアクティブ推定方式

以下に, 提案方式と関連が深い 3 つの代表的な可用帯域推定技術を紹介する.

3.1 TOPP

TOPP⁷⁾は複数のプローブトレインペアを送信し, 線形回帰

より可用帯域とリンク容量を推定する．具体的には最小速度 v_{\min} と最大速度 v_{\max} を設定し，その範囲内で速度を N 個の均等な区間に分け，各速度においてサイズ L Bytes で k 個のプロープペアを徐々に速度を減らして送信する．このように送信側のパケットの間隔と，受信側のパケットの間隔が等しくなる速度を見つける．

3.2 DietTopp

DietTopp⁸⁾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 でプロープを送信し受信速度 $v\phi$ を算出した後， $[a \times v\phi, b \times v\phi]$ の範囲 (a, b は定数) で速度を均等分割した複数のプロープを送信する．その後，送信したプロープの送信速度と送受信間隔比から線形回帰を用いて推定を行う．送信するプロープ数により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場合がある．

3.3 ReADR

ReADR⁹⁾は初めにプロープ送信速度を最大で送信し，受信した時の速度を次のプロープ送信速度として送信する．このように速度更新を繰り返し行い，プロープ受信速度が収束した時の値を可用帯域として推定する方式である．本報告ではこの方式を用いた速度更新を採用しており，その詳細は次章で述べる．

4. 提案方式

4.1 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．そこへプロープサイズ L [byte] のプロープを送信した場合の受信速度を $v\phi$ ，受信間隔 $t\phi$ とすると，受信速度 $v\phi$ は次式で表される．

$$v\phi = \frac{L \times 8}{t\phi} \quad (4)$$

式(4)よりプロープの速度とプロープの間隔は反比例する．従って，プロープの送受信速度比と送受信間隔比の関係はプロープ送信速度 v ，送信間隔 t とすると，次式で表される．

$$\frac{t\phi}{t} = \frac{v}{v\phi} \quad (5)$$

ここで，送信速度 v に対する理論的な $v\phi$ の推移は

$$v\phi = \begin{cases} v & (v \leq A) \\ \frac{C}{v + v_{ct}} & (v > A) \end{cases} \quad (6)$$

となる． $v \leq A$ の場合，ノードでキューイング遅延が生じないため，送受信間で速度は変化しない．しかし， $v > A$ の場合，遅延が生じ受信速度は減少する．ここで， $C/(v + v_{ct})$ はリンクの混雑度合いを表す．この値が小さいほど，リンクは

混雑していることを示している．

$v > A$ のとき，式(5)の $v\phi$ に式(6)を代入すると， $t\phi/t$ は

$$\frac{t\phi}{t} = \frac{v}{\frac{C}{v + v_{ct}}} = \frac{1}{C} v + \frac{v_{ct}}{C} \quad (7)$$

となり， $t\phi/t$ は v の比例直線になる．さらに，式(5)に v について式(6)を代入すると

$$\frac{t\phi}{t} = \frac{v\phi \times v_{ct}}{C - v\phi} = \frac{v_{ct}}{C - v\phi} \quad (8)$$

となり， $t\phi/t$ は $v\phi$ の反比例曲線になる．ここで a_1, a_2, b_1, b_2 を定数として式(7)と式(8)の $1/C$ をそれぞれ a_1, a_2 ， C/v_{ct} をそれぞれ b_1, b_2 と置くと， $t\phi/t$ は

$$\frac{t\phi}{t} = a_1 v + b_1 \quad (9)$$

$$\frac{t\phi}{t} = \frac{b_2}{1 - a_2 \times v\phi} \quad (10)$$

の 2 式で表すことができる．

可用帯域はプロープ送信間隔とプロープ受信間隔が等しくなる時のプロープ速度として定義できる．すなわち $t\phi/t = 1$ となる時の速度を求めればよい．従って，式(9)，式(10)より

$$v = \frac{1 - b_1}{a_1} \quad (11)$$

$$v\phi = \frac{1 - b_2}{a_2} \quad (12)$$

となる v および $v\phi$ が可用帯域となる．さらに式(9)，式(10)において $v = v\phi$ となる点ではプロープ送信間隔とプロープ受信間隔が等しくなる．よって $v = v\phi = v_x$ とおくと v_x は

$$v_x = \frac{a_1 - a_2 b_1 \pm \sqrt{(-a_1 + a_2 b_1)^2 - 4a_1 a_2 (-b_1 + b_2)}}{2a_1 a_2} \quad (13)$$

となる．ここで $a_1 = a_2 = a$ ， $b_1 = b_2 = b$ とおくと $\sqrt{(-a_1 + a_2 b_1)^2 - 4a_1 a_2 (-b_1 + b_2)} > 0$ のとき

$$v_x = \frac{1 - b}{a}$$

$\sqrt{(-a_1 + a_2 b_1)^2 - 4a_1 a_2 (-b_1 + b_2)} \leq 0$ のとき

$$v_x = 0$$

であるため v_x は

$$v_x = \frac{a_1 - a_2 b_1 + \sqrt{(-a_1 + a_2 b_1)^2 - 4a_1 a_2 (-b_1 + b_2)}}{2a_1 a_2} \quad (14)$$

となる。以上より式(11)の v を ABW_1 、式(12)の $v\phi$ を ABW_2 、式(14)の v_x を ABW_3 と定義する。

式(9)、式(10)におけるプローブ速度-送受信間隔比の推移の例を図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。一方、プローブ速度が A より大きくなった場合、プローブ送信速度と送受信間隔比は直線的に増加する。従って、2点以上プローブの座標をプロットすると、傾き a_1 と切片 b_1 が分かるため式(9)の比例直線が求められる。

一方、プローブ受信速度と送受信間隔比は反比例的に増加する。ここで、式(10)の逆数を考えると

$$\frac{1}{t} = \frac{-a_2}{b_2} v\phi + \frac{1}{b_2} \quad (15)$$

となり、傾き $-a_2/b_2$ と切片 $1/b_2$ の比例直線が求められる。よって、式(15)より a_2 、 b_2 が分かるため式(10)の反比例曲線が求められる

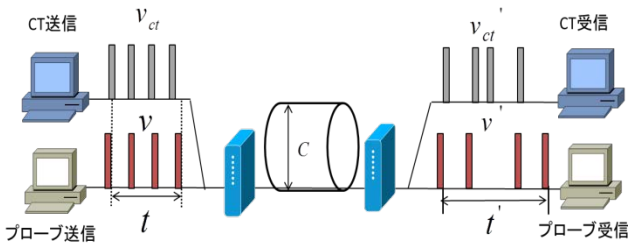


図1. 2hopのネットワーク

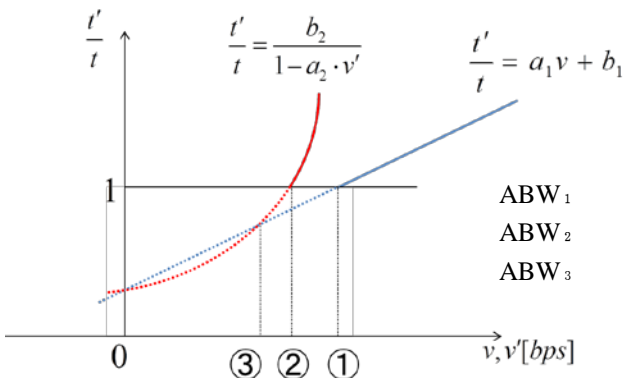


図2. プローブ送受信速度-送受信間隔比の推移

4.2 速度更新

提案方式では各速度におけるデータ点の線形回帰を行うことで可用帯域を推定する。ただし、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問題がある。従って、従来の推定方式3.3のReADR方式により送信速度の更新を行い、なるべく広い範囲でデータを取り、推定点の線形回帰により式(9)式(10)を算出する。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、受信速度は可用帯域付近で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。

$$\frac{v'_{i-1} - v'_i}{v'_i} \leq d \quad (16)$$

一般に、 d は0.1以下の微小な値に設定する。

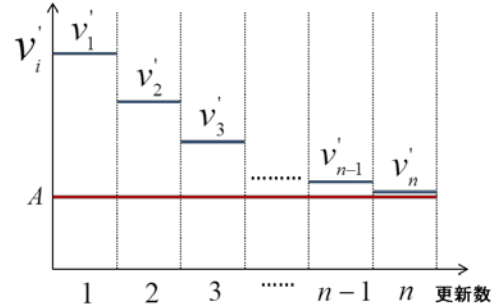


図3. 速度更新による受信速度の推移

5. 実験による性能評価

5.1 実験条件

図4に示す2ホップの実験ネットワークを用い、可用帯域を20Mbpsと想定した実験を行う。実験条件を表1に示す。なおクロス Traffickの送受信はトラフィックジェネレータソフトのD-ITG (ver. 2.8.1-r1023)¹⁰⁾を使用する。

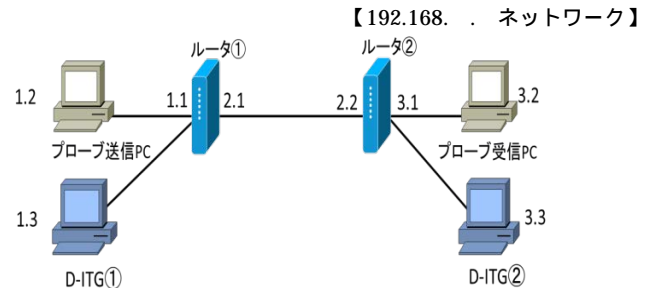


図4. 実験ネットワークの構成

表1. 実験条件

プローブ長[bytes]	1500
プローブ数[個]	50
クロス Traffick	発生分布：指数分布
CT パケット長[bytes]	1000
可用帯域[Mbps]	20
リンク容量[Mbps]	100
推定回数[回]	30

5.2 実験結果

可用帯域の推定結果を図5に示す。また、その場合の可用帯域 ABW_1 , ABW_2 , ABW_3 とその平均値について標準偏差と推定誤差を表2に示す。図5より可用帯域の推定値は理論値の上下に分布しており、過小評価、過大評価といった傾向は見られなかった。また、 ABW_1 と ABW_2 と ABW_3 に極端な差は現れなかった。 ABW_1 と3つの平均を比較すると、標準偏差が3.01Mbpsから2.86Mbpsに減少し、誤差が9.86%から8.90%に減少した。従って、受信速度-送受信間隔比の回帰曲線を加えることで、推定値のばらつき、誤差を低減できることが分かった。また、本実験で ABW_3 が測定不能となる場合が30回の実験の内9回発生した。これは送信速度-送受信間隔比の回帰直線と受信速度-送受信間隔比の回帰曲線に交点が発生しないことに起因している。 ABW_3 の測定不能時を除外した場合の ABW_1 , ABW_2 , ABW_3 の標準偏差と推定誤差を表3に示す。表2と比較して、平均が標準偏差2.86Mbpsから2.70Mbpsに減少し、誤差が8.90%から7.92%に減少した。

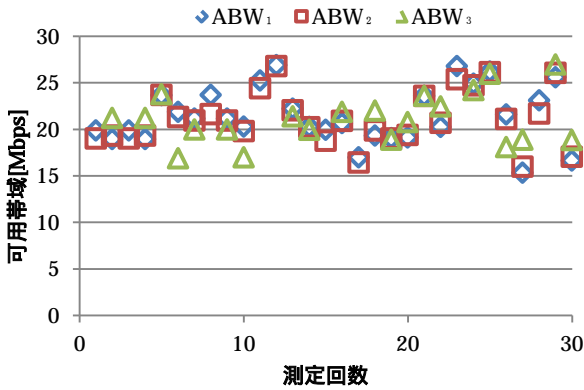


図5. 可用帯域の推定結果

表2. 可用帯域の標準偏差と推定誤差

	標準偏差[Mbps]	誤差[%]
ABW_1	3.01	9.86
ABW_2	2.85	8.53
ABW_3	2.72	8.31
平均	2.86	8.90

表3. 可用帯域の標準偏差と推定誤差（異常値除外）

	標準偏差[Mbps]	誤差[%]
ABW_1	2.75	7.55
ABW_2	2.62	7.91
ABW_3	2.72	8.31
平均	2.70	7.92

6. まとめ

本報告ではEnd-to-End通信路における受信速度-送受信間隔比の回帰曲線による可用帯域推定法を提案した。また、2hop

の実験ネットワークで性能評価を行った。送信速度-送受信間隔比の回帰直線に受信速度-送受信間隔比の回帰曲線を加えて、3点による可用帯域推定を行った結果、標準偏差が3.01Mbpsから2.72Mbpsに減少し、誤差が9.86%から8.31%に減少した。しかし、測定不能となる場合が存在し、回帰直線および回帰曲線が理論値から外れていることが分かった。

今後の課題として、理論値に近い線形回帰方法の検討が必要で、さらに、可用帯域を変化させた場合やhop数を増やした場合など、条件を変化させて実験を行い、本提案方式の実用性を評価する必要がある。

参考文献

- 1) R.Prasad, C.Dovrolis, M.Murray, and K.Claffy " Bandwidth Estimation: Metrics, Measurement Techniques, and Tools ", IEEE Network17.6, pp.27-35, 2003
- 2) 川原亮一, 森達哉, 上山憲昭 " IP フロー計測技術の応用 ", 電気電子情報通信学会誌 Vol.93, No.4, pp.287-292, 2010
- 3) 大下裕一, 荒川伸一, 村田正幸, " 交流トラヒック行列推定手法とネットワーク制御への応用 ", 電気電子情報通信学会誌, Vol.93, No.4, pp.293-297, 2010
- 4) J.Strauss, D.Katabi, and F.Kaashoek, " A measurement study of available bandwidth estimation tools ", Proc. of ACM SIGCOMM Conference on Internet Measurement, pp.39-44, 2003
- 5) Jain, Manish, and Constantinos Dovrolis. "Pathload: A measurement tool for end-to-end available bandwidth" Proc. of Passive and Active Measurements (PAM) Workshop, 2002
- 6) M.Jain and C.Dovrolis, " End-to-End Available Bandwidth: Measurement Methodology, Dynamics, and Relation with TCP Throughput " IEEE/ACM Transactions on Networking, vol. 11, no. 4, pp. 537-549, 2003
- 7) Bob Melander, Mats Bjorkman, Per Gunningberg " Regression-Based Available Bandwidth Measurements ", Proc. of International Symposium on Performance Evaluation of Computer and Telecommunications Systems, pp.14-19, 2002
- 8) A.Johnsson, B.Melander and M.Bjorkman " DietTopp: A first implementation and evaluation a simplified bandwidth measurement method ", Proc. of Swedish National Computer Networking Workshop, Vol. 5, 2004
- 9) 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周年学術講演会, B-202, 2014
- 10) A.Botta, W.D.Donato, A.Dainotti, " D-ITG 2.8.1 Manual ", <http://traffic.comics.unina.it/software/ITG/manual/D-ITG-2.8.1-manual.pdf>