

RTT を用いたエンドーエンド可用帯域推定法の提案と実験的評価
 A Proposed Estimation Method for End-to-End Available Bandwidth by Using RTT
 and Its Experimental Evaluation

今井雅晴[†] 杉崎義雄[‡] 水野修^{†‡} 浅谷耕一^{†‡}
 Masaharu Imai Yoshio Sugizaki Osamu Mizuno Koichi Asatani

1. はじめに

インターネットにおいてリアルタイム性を必要とするアプリケーションが増加し、これらのサービス品質保証が求められている。そのためにはエンドツーエンドのリンクのなかで可用帯域が最小であるリンク(以下ボトルネックリンク)の可用帯域を指標とする制御が有効である。エンドホストによる可用帯域推定法は、プローブパケットの遅延時間を利用して可用帯域を推定する Pathload[1] や pathChirp[2]などが提案されている。これらの手法はプローブパケットを何度も送信するため、一時的に可用帯域を超えて通信を行う場合もあり、ネットワークに大きな負荷を与えるという問題がある。また、送信プローブ量が少なくネットワークに与える負荷が小さくなるが推定精度が低くなる。

筆者らは、プローブ負荷が小さく、精度の高い可用帯域推定方式の実現を目的に、RTT(Round Trip Time)最小値の出現頻度を用いた可用帯域推定法を提案した[4]。

本論文では提案手法の推定精度、推定時にかかる負荷等を実験により評価をした結果について報告する。

2. 既存可用帯域推定手法

2.1 Pathload

Pathload では、パケットトレインと呼ばれるプローブをストリームレート R_i で注入する。まず、プローブ送信レートの初期値 R_1 はボトルネックリンクの容量に設定される。この時、1 ストリーム中のプローブの片方向転送遅延時間(One-Way-Delay)を観測し、ストリーム中のプローブ片方向転送遅延時間が増加傾向にあれば、対象パスの可用帯域(Available-bandwidth) A は、 $A < R_1$ と判断する。遅延に大きな変化がなければ、 $A \geq R_1$ と判断する。対象パスを通過しているクロストラフィックの変動を考慮して、同一転送レートの K 個のストリームをフリート(集団)単位で時間をおいて間欠的に注入する。上記の判断を行ない前者であれば $R_2 (< R_1)$ 、後者であれば $R_2 (> R_1)$ とプローブ転送レートを再設定する。その設定条件で次のフリートを転送、最終的に $R_N \rightarrow A$ に漸近するまで逐次 N 個のフリートを注入して可用帯域を推定する。従って、Pathload では、プローブ転送レートの増減幅で推定精度が限定される。また、フリートのプローブ転送レートを変えて複数のフリートを注入するため、対象パスへ送信するプローブ量と推定時間が問題である。

[†] 工学院大学大学院工学研究科電気・電子専攻
 Graduate School of Electrical and Electronics
 Engineering, Kogakuin University

[‡] 工学院大学情報通信工学科 Department of Information
 of Communications Engineering, Kogakuin University

2.2 pathChirp

pathChirp では Pathload と同じくパケットトレインを利用するが、トレイン内のパケット転送間隔を指数関数的に減少させる点で異なる。トレイン内の隣り合うパケットでパケットペアを構成し、各パケットの片道遅延の増加特性を利用して可用帯域を推定する。ペアを構成するパケットの転送間隔は徐々に減少するため、あるペアから片道遅延時間が増加する。この片道遅延時間が増加する臨界点におけるパケットの送信間隔から転送レートを算出し、可用帯域を推定する。Pathload では 1 回の推定につきストリームを繰り返し送出する必要があるが、pathChirp は原理的には 1 回のストリームの送出で推定が可能である。しかし、クロストラヒックの影響により、可用帯域推定に用いる遅延が増加する臨界点の判定精度が課題である。

3. RTT の出現頻度を用いたボトルネックリンク可用帯域推定手法

3.1 ボトルネックリンクの帯域使用率推定法

RTT を用いたボトルネックリンクの帯域使用率推定法を説明する。この推定法では通信経路の RTT を測定し、ボトルネックリンクの帯域使用率を推定する。ここでのネットワークモデルを図 1 に示し RTT を式(1)に示す。

$$RTT = T_{trs} + T_{fw} + T_{prop} + T_{que} \quad (1)$$

ここで、 T_{trs} はルータがパケットを処理するのにかかる処理遅延時間、 T_{fw} はパケットの送信開始から終了までにかかる転送遅延時間、 T_{prop} はパケットがリンクを通過してルータ到着までにかかる伝搬遅延時間、 T_{que} はキューイング遅延時間である。処理遅延時間、転送遅延時間、伝搬遅延時間は、通信経路固有の値であるため一定である。RTT の変動はすべてキューイング遅延による。したがって、RTT の変動を観測することにより、ボトルネックリンクの負荷状況を推定することができる。通信経路の RTT の変動は主にボトルネックリンクで発生するため、通信経路にキューが一つであると簡略化し、モデル化することができる(図1)。

このモデル上で RTT を測定した場合、RTT 最小値(RTT_{min})はキューにパケットが無いときに測定されるため、この瞬間における帯域使用率は 0 である。また、 RTT_{min} 以外の RTT 測定値(RTT_{other})はキューにパケットが存在しているときに測定されるため、この瞬間における帯域使用率は 1 である。以上より、ある期間における帯域使用率は RTT_{min} と RTT_{other} の測定された回数の割合から求めることができる(式(2))。

$$U = \frac{N_{other}}{N_{min} + N_{other}} \quad (2)$$

ここで、 U は帯域使用率、 N_{other} は RTT_{other} の測定された回数、 N_{min} は RTT_{min} の測定された回数を示す。

3.2 ボトルネックリンクの可用帯域推定法

可用帯域を A 、物理帯域を C 、帯域使用率を U とするとこれらの関係は式(3)で表される。

$$A = C(1 - U) \quad (3)$$

式(3)より、ボトルネックリンクの物理帯域と帯域使用率を求めることによりボトルネックリンクの可用帯域が求まる。しかし、物理帯域最小のリンクと可用帯域最小のリンクは必ずしも一致しない。そのため、物理帯域は送信レート X でプローブ負荷を与え、帯域使用率の変化を観測することにより、可用帯域最小のボトルネックリンクの物理帯域を推定する。

プローブ負荷を与えずに推定した帯域使用率を U_a とする。送信レート X でプローブ負荷を与えたときの帯域使用率を U_b とすると、その際の背景トラフィックを一定としたとき、ボトルネックリンクの物理帯域 C は式(4)によって求められる。

$$C = \frac{X}{U_b - U_a} \quad (4)$$

式(4)より求まる物理帯域 C と、式(2)より求まる帯域使用率 U を、式(3)に代入することにより可用帯域 A が求まる。

4. マルチホップリンクへの適用

第 3 章で述べた RTT 最小値の出現頻度を用いた可用帯域推定法はシングルホップのネットワークを対象としていたため、これをマルチホップに拡張する。

4.1 マルチホップ上のボトルネックリンクの帯域使用率推定法

提案手法ではボトルネックリンクまでの RTT を測定し、帯域使用率を推定する。測定するネットワーク構成を図 2 に示す。例えば、図 2 のネットワーク構成においてリンク 2 をボトルネックリンクとする。そのとき測定端末で観測されるリンク 2 の帯域使用率は式(5)で表される。

$$U_2 = a_1 + (1 - a_1) \cdot a_2 \quad (5)$$

ここでリンク 1, 2 の帯域使用率をそれぞれ a_1, a_2 である。リンク 1 のみでキューにパケットがないときに測定される RTT_{min} が出現する確率は $(1 - a_1)$ であり、測定端末より観測されるリンク 2 の帯域使用率 U_2 は式(5)で与えられる。式(5)の第一項は測定端末より送信したプローブパケットがリンク 1 において RTT_{min} 以外となる確率を表している。第二項は送信したプローブパケットがリンク 1 では RTT_{min} となる確率とリンク 2 では RTT_{min} とならない確率の積である。すなわちパケットがリンク 1 通過時には RTT_{min} となる可能性はあるが、リンク 2 通過時には RTT_{min} とならなかったことを意味している。よってリンク n をボトルネックリンクとしたとき、観測されるリンク n の帯域使用率はリンク n までの各リンクで RTT_{min} 以外となる確率の和で表すことができ、式(6)で与えられる。

$$U_n = \sum_{i=1}^n a_i \prod_{j=1}^{i-1} (1 - a_j) \quad (6)$$

本提案では式(6)を帯域使用率の推定式として、測定端末で観測されるリンク n の帯域使用率 U_n とその時のリンク $n-1$ の帯域使用率 U_{n-1} よりリンク n の帯域使用率を推定する。

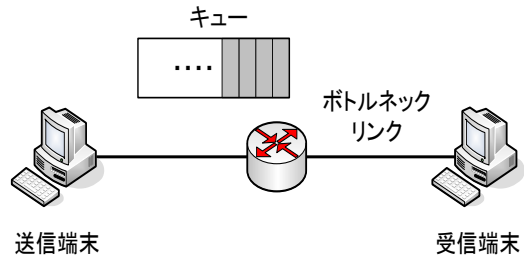


図 1 ネットワークモデル

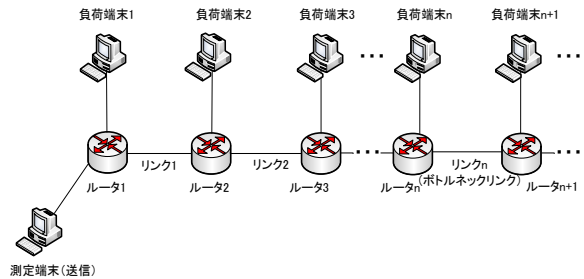


図 2 ネットワーク構成

4.2 マルチホップ上のボトルネックリンクの可用帯域推定法

ボトルネックリンクの可用帯域の推定式を式(7)に示し、物理帯域の推定式を式(8)に示す。図 2 のネットワーク構成においてリンク 2 をボトルネックリンクとしたとき測定端末で観測されるリンク 2 の可用帯域を式(9)に示し、測定端末で観測されるリンク n の可用帯域を式(10)に示す。

$$y = C(1 - U) \quad (7)$$

$$C = \frac{P_b - P_a}{U_b - U_a} \quad (8)$$

$$y_2 = C(1 - a_1)(1 - a_2) \quad (9)$$

$$y_n = C \prod_{i=1}^n (1 - a_i) \quad (10)$$

ボトルネックリンクの可用帯域を y 、物理帯域を C 、帯域使用率を U としたときボトルネックリンクの可用帯域は式(7)で表すことができる。物理帯域は送信プローブレートを変化させて帯域使用率の変化を観測することにより、ボトルネックリンクの物理帯域を推定する。二つの異なる送信レートでプローブを行い帯域使用率の差を求め、プローブ負荷と帯域使用率の各値の差から、可用帯域を推定する。二つの異なる送信レートのプローブパケットによる負荷を $P_a, P_b (P_a < P_b)$ としたときの帯域使用率をそれぞれ U_a, U_b とすると、背景トラフィックが一定のとき、ボトルネックリンクの物理帯域 C は式(8)に

よって求められる。

式(9)は測定端末で観測されるリンク 2 の可用帯域 y_2 であり、式(5)の帯域使用率 U_2 を式(7)に代入して求めることができる。同様に式(10)は測定端末で観測されるリンク n の可用帯域 y_n であり式(6)の帯域使用率 U_n を式(7)に代入して求めることができる。本方式では式(10)を可用帯域の推定式として、測定端末で観測されるリンク n の可用帯域 y_n とその時々のリンク $n-1$ の帯域使用率 U_{n-1} よりリンク n の可用帯域を推定する。

4.3 ボトルネックリンク位置特定法

マルチホップ上でボトルネックリンクの可用帯域を推定するためには、ボトルネックリンクの位置特定が必要となる。

エンドエンド間の可用帯域が最小のリンクがボトルネックリンクであるため、本論文ではエンドエンド間の RTT における各リンクの RTT が占める割合より位置を特定する。ボトルネックリンクであるかを判断するための式を式(11)に示す。

$$1 - \left(\sum_{i=1}^n \frac{RTT_{link_i}}{RTT_{all}} \right) \leq \frac{\max\{RTT_{link_i}\}}{RTT_{all}} \quad (11)$$

式(11)の RTT_{link_i} は各リンクの RTT を示している。例えばリンク 2 の RTT_{link_2} であれば図 2 のネットワーク構成において、ルータ 3 までの RTT からルータ 2 までの RTT を差し引くことで求めることができる。また、 RTT_{all} はエンドエンド間の RTT である。式(11)はエンドエンド間の RTT における各リンクの RTT が占める割合を算出し、ボトルネックリンクの位置を特定するものである。そのため、すべてのリンクの RTT を測定する必要はない。

5. 可用帯域推定法の推定精度の評価

第 4 章で示した可用帯域推定法について図 3 の実験ネットワークで可用帯域を推定し、推定精度を評価する。

5.1 実験条件

実験ネットワークを図 3 に示す。ルータ-ルータ間のリンクは 10Mbps である。ルータは Cisco 1841 を使用した。インターネットの最大ホップ数はおおむね 14, 15 ホップと言われている。エンド-エンド間の両端末で本手法の測定が可能な場合、ボトルネックリンクはエンド-エンド間の中央に位置したときに一番遠くなる。そのため本実験ではリンク 7 をボトルネックリンクと設定した。リンク 7 がボトルネックリンクとなるようにそれぞれの負荷端末からそれぞれのリンクに通信負荷を与え、測定端末からボトルネックリンクの可用帯域を推定する。実験条件を表 1、計測に使用した機器を表 2 に示す。また、提案手法の評価と同時に既存手法の Pathload, pathChirp の評価を行った。物理帯域推定のためのプローブは 500kbps に設定した。推定値の誤差率を(12)式で定義する。

$$\text{誤差率} \Delta = \frac{\text{可用帯域推定値} - \text{可用帯域設定値}}{\text{物理帯域}} \quad (12)$$

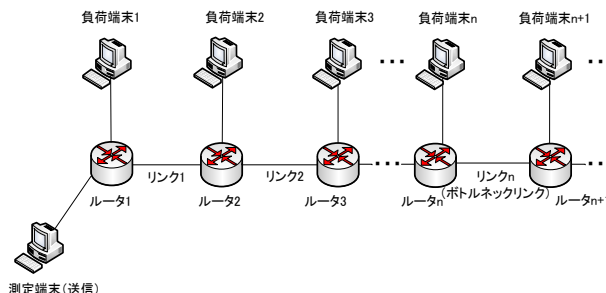


図3 実験ネットワーク

表1 実験条件

RTT測定間隔	10[msec]
RTT測定パケットサイズ	60[byte]
背景負荷トラヒック	UDP
背景負荷パケットサイズ	1500[byte]

表2 計測に使用した機器

PC	OS	ubuntu 10.04 LTS
	CPU	core2 Duo T8100 2.10GHz
	Memory	1GB
ルーター	Cisco1841	

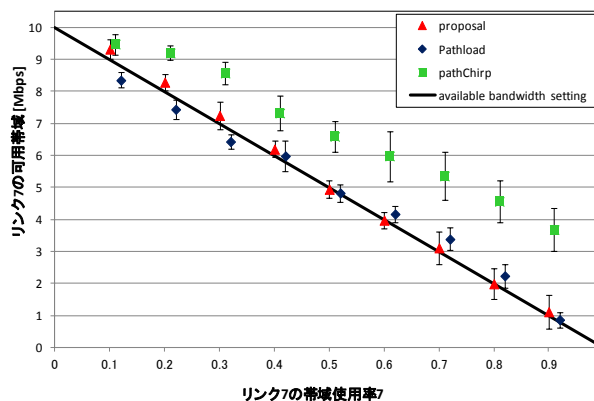


図4 各可用帯域推定法の推定結果

5.2 実験結果

各可用帯域推定法の推定結果を図4に示し、可用帯域推定の平均誤差率を図5に示す。図4の直線は各可用帯域の設定値を示しており、測定結果が直線に近いほど推定精度が良いことを意味する。図中のプロットは各可用帯域における20回の推定結果の平均とその標準偏差である。各可用帯域推定法の推定に必要なプローブパケット量をまとめたものを図6に示し、推定時間をまとめたものを図7に示す。また、各手法の推定時間と推定時の誤差についてまとめたものを表3に示す。提案手法の推定時間は26秒に設定した。Pathloadは一度の起動で1回の推定を行うため、各推定時間の平均をとった。pathChirpは一度の起動で1回の推定を行うのではなく一定時間起動し続けるため、起動時間を26秒に設定した。

実験の結果、pathChirp は設定した可用帯域を大きく上回って推定している。提案手法と Pathload に関して、提案手法の推定値の平均誤差率は 0.044 であり、

Pathload は 0.074 であった。各手法が推定時にネットワークに与える負荷については設定した可用帯域が 4Mbps 以上のときに提案手法は Pathload より小さい負荷で推定できることを確認した。

推定時間に関しては、Pathload は提案手法で設定した 26 秒と比べ約 3 倍の時間がかかっていることが確認できる。

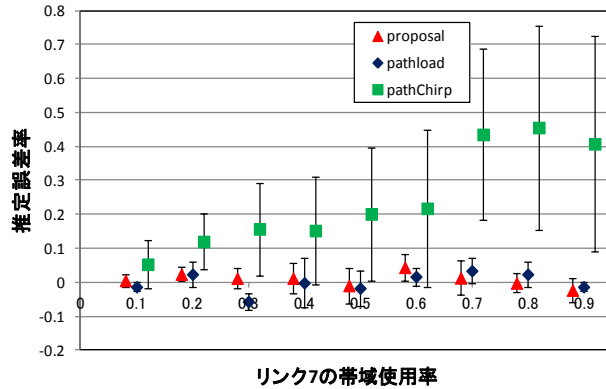


図5 可用帯域推定の平均誤差率

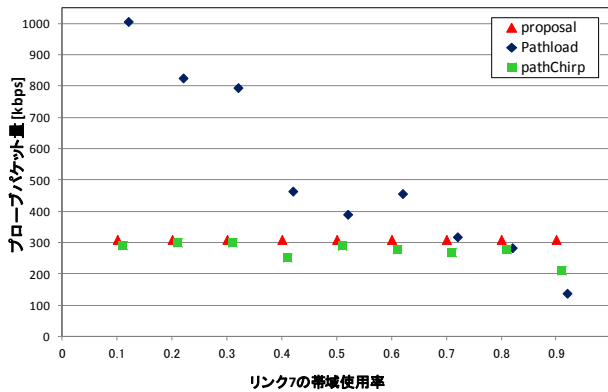


図6 各可用帯域推定法の推定に必要なプローブパケット量

6. おわりに

本報告では、3章で述べた RTT 最小値の出現頻度を用いたボトルネックリンクの可用帯域推定法のマルチホップリンクに対する拡張を行った。そして、推定精度を実験により評価した。

評価の結果、提案した可用帯域推定法は 7 ホップの実験条件において、可用帯域が極端に小さい場合を除いて既存手法より少ないプローブパケット量で同等の誤差率で推定ができることを確認した。また、同等以上の誤差率の推定時間については提案手法は既存手法より小さいことを示した。

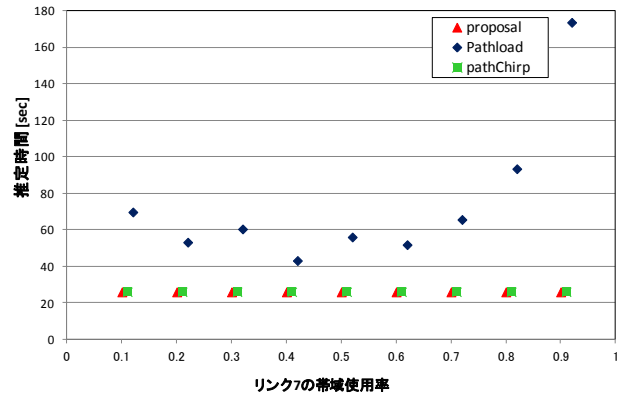


図7 各可用帯域推定法の推定時間

表3 各手法の推定時間と誤差

	提案手法	Pathload	pathChirp
平均誤差率	0.044	0.074	0.62
標準偏差	0.099	0.084	0.11
平均プローブパケット量[kbps]	310	520	275
平均推定時間[sec]	26	77	26

参考文献

- [1] Manish Jain, Constantinos Dovrolis, "End-to-End Available Bandwidth: Measurement Methodology, Dynamics, and Relation with TCP Throughput," SIGCOMM, Aug.2002.
- [2] Vinay Ribeiro, Rudolf Riedi, Richard Baraniuk, Jiri Navratil, and Les Cottrell "pathChirp: Efficient Available Bandwidth Estimation for Network Paths," Passive and Active Measurement Workshop, Apr.2003.
- [3] Ningning Hu, Peter Steenkiste, "Evaluation and Characterization of Available Bandwidth Probing Techniques," IEEE JSAC Special Issue in Internet and WWW Measurement, Mapping, and Modeling, Vol.21, Aug.2003.
- [4] 今井雅晴, 増井大, 水野修, 杉崎義雄, 浅谷耕一, "マルチホップ上のボトルネックリンク可用帯域のRTTを用いた推定法の提案と評価" 信学技報, CQ2010-82, Mar.2011.
- [5] C. Dovrolis, D. Moore, and P. Ramanathan, "What Do Packet Dispersion Techniques Measure," In Proc. of IEEE INFOCOM, Apr.2001.
- [6] R. L. Carter and M. E. Crovella, "Measuring Bottleneck Link Speed in Packet-Switched Networks," Performance Evaluation, 27-28, Mar.1996.
- [7] 佐藤正樹, 堀内晋也, 相田知子, 浅谷耕一, "RTTによるネットワーク性能測定法に関する検討," 信学技報, CQ2001-29, Apr.2001.
- [8] 池上大介, 中里秀則, 富永英義, "ネットワーク遅延時間の相関を用いた可用帯域推定方式," 信学技報, NS2006-242, pp.443-448, Mar.2007.
- [9] 浜崇之, 藤田範人, 地引昌弘, "トラヒック短期変動の影響を考慮した利用可能帯域測定方式," 信学技報, CQ2007-26, Jul.2007.
- [10] 宇津江康太, 和泉勇治, 太田耕平, 加藤寧, 根元義章 "RTTを利用したボトルネック検出とサーバ選択への応用," 信学技報, NS2002-142, Sep.2002.
- [11] 石井友規, 吉田篤, 山口孝雄 "メッシュネットワークのためのボトルネック検出型伝送レート制御方式の提案," 信学技報, IN2009-490, Dec.2009.