

特別研究報告

題目

エンド端末間パス上の複数箇所の利用可能帯域の
同時計測手法に関する一検討

指導教員

中野 博隆 教授

報告者

鯉谷 和正

平成 23 年 2 月 16 日

大阪大学 基礎工学部 情報科学科

エンド端末間パス上の複数箇所の利用可能帯域の
同時計測手法に関する一検討

鯉谷 和正

内容梗概

エンド端末間パスの利用可能帯域を指標として用いることで、輻輳の検知、通信レートの制御、オーバーレイネットワークにおけるトポロジ制御、経路制御やマルチパス転送などの様々なネットワーク制御が可能となる。そのため、エンド端末間パスの利用可能帯域を計測することは重要である。従来の端末間パスの利用可能帯域の計測技術は、ボトルネック区間の利用可能帯域の値のみを把握することができるが、一方、ボトルネック区間そのものの特定やエンド端末間パスの複数箇所の利用可能帯域の計測を行うことはできない。しかし、たとえば無線ネットワークと有線ネットワークなどネットワーク特性が異なる区間がエンド端末間パス上に混在している場合に、それぞれのネットワークの利用可能帯域の計測が可能となれば、無線ネットワークなどパケット誤りの多い環境に応じて通信レートを低く設定するなどの、ネットワーク環境に応じた制御を行うことができる。

そこで本報告では、エンド端末間のパス上における複数かつ任意の区間における利用可能帯域を同時に計測する手法について検討する。従来の利用可能帯域の計測手法は送信端末が受信端末に向けて計測用パケットを送る際に、パケットの送信間隔を様々に変化させ、受信端末における受信間隔を観察することで利用可能帯域を計測する。そこで、提案手法においては、パケットの送信間隔の制御方法を改善し、かつ、エンド端末間パス上のルータにおいて記録されるパケットの送受信時刻を利用することによって、端末間のパス上における任意の区間の利用可能帯域を計測する。

提案方式の性能評価は、簡易的なシミュレーションによって行った。その結果、送信端末に近いネットワーク区間より、受信端末に近いネットワーク区間の利用可能帯域が大きい場合においても、それぞれの区間の利用可能帯域を計測することが可能であることを確認した。

主な用語

利用可能帯域，物理帯域，ネットワーク計測，同時複数箇所計測

目次

1	はじめに	4
2	既存の利用可能帯域の計測手法	6
2.1	ネットワークモデル	6
2.2	利用可能帯域の計測原理	7
2.3	Pathload のアルゴリズム	10
3	複数箇所の利用可能帯域の同時計測手法の提案	12
3.1	提案手法	12
3.2	提案手法の特性	15
4	性能評価	18
4.1	評価環境	18
4.2	評価結果	20
5	まとめと今後の課題	25
	謝辞	26
	参考文献	27

目 次

1	ネットワークモデル	9
2	Pathload における計測帯域幅の決定方法	11
3	複数箇所の利用可能帯域計測モデル	14
4	複数箇所の利用可能帯域計測手法	16
5	提案手法における計測原理	17
6	シミュレーションモデル	19
7	提案方式の性能評価結果	24

1 はじめに

情報通信機能を含む家電の出現や iPhone [1] などのスマートフォンや PSP [2], NINTENDO DS [3] などのゲーム機を代表とする携帯端末の発達など, ネットワークを構成する端末や端末間の通信を要するアプリケーションが増加している. そのため, インターネットを代表とする様々なネットワークの通信量が近年急激に増加しており [4], その傾向は今後も続くと考えられる. 一方, ネットワークが大規模化かつ多様化することによってその性質はますます複雑なものになり, エンド端末間パスの物理的な最大通信レートである物理帯域 [5-7] や, 背景トラヒックの影響を考慮した利用可能帯域 [8, 9] は様々な値となり, さらに, 時間とともに大きく変動することが考えられる. 一方, インターネットにおいては, ネットワークの利用可能な資源量に関する情報をネットワーク側から端末に通知されることはない. このような環境において, ネットワークアプリケーションがその性質を発揮するためには, エンド端末間パスの帯域に関する情報を計測によって得ることが重要となる.

エンド端末間パスの利用可能帯域は, 利用可能帯域が最も小さい区間であるボトルネック区間における利用可能帯域により決定される. ボトルネックとなっている区間の利用可能帯域を把握することで, 通信レートを調節することにより遅延時間の増加やパケットの損失を防ぐことができる [10]. しかし, ボトルネックとなっている区間の影響自体を回避することはできない. また, データ転送中の経路以外の他の経路を利用するための情報が得られないため, 輻輳時に利用可能帯域が大きい, あるいは, 遅延時間の小さい経路を効率的に選択することができない. また, 無線ネットワークと有線ネットワークなどパケット誤り率や伝播遅延時間などのネットワーク特性が異なる区間が混在している場合, 無線ネットワークなどパケット誤りが多い環境では, 有線ネットワークの通信レートを考慮せずにビットレートを選択することにより, 実効帯域が大きく低下する場合がある. それに対し, パケット誤り率が大きくなるようにビットレートの低い通信方式を選択するなど環境に応じた対応が求められるが, ボトルネックリンクの帯域値のみが得られる状況においては, そのような制御を行うことができない. また, オーバレイネットワーク [11] のような仮想的なネットワークにおいて, 利用可能帯域を評価基準として用いて輻輳が発生している箇所を特定し, その結果に応じて新規オーバレイノードの設置場所を検討するといった場合において, 既存の帯域計測手法を用いると, ボトルネック区間の帯域を推定できるが, その区間の場所が特定できないため, 効率的なオーバレイネットワークを構築することができない. これは, エンド端末間のボトルネック区間における利用可能帯域の値のみでは, ネットワーク性能を評価するための指標としては, 不十分であることを意味する.

このような問題を解決するための1つの方法として, エンド端末間パスにおいて, ボトルネック以外の区間の利用可能帯域を把握することが挙げられる. このようなことが可能にな

ると、エンド端末間パス上の一部の区間において輻輳が発生する場合において、輻輳が発生している区間を特定できるため、輻輳が発生している経路を変更するなどの経路制御を行うことができる。また、経由するネットワークの性質が異なる場合において、ボトルネック区間を特定した結果、ボトルネック区間が無線ネットワークなどのパケット誤りが高い環境であれば、通信レートを下げることによりパケット損失を防ぐことができる。しかし、エンド端末間の複数箇所の利用可能帯域を計測する手法はこれまで提案されていない。

そこで本報告においては、エンド端末間のパスが複数のネットワークを経由する場合において、エンド端末間パス上の任意かつ複数のネットワーク区間の利用可能帯域を同時に計測する手法を提案する。最初に、エンド端末間パスの利用可能帯域の計測を行うための基本的な原理について、既存の利用可能帯域の計測アルゴリズムを用いて説明する。エンド端末間パスの利用可能帯域を計測する既存手法としては Pathload [12, 13], TOPP [14], pathChirp [15], Delphi [16], ImTCP [17, 18] などが挙げられる。これらの手法は、計測用パケットをあるレートで複数個送り、それらがボトルネックリンクに他の背景トラヒックと混ざることを利用している。すなわち、計測用パケットと背景トラヒックの合計速度が物理帯域を超える場合には、計測用パケットの間隔が大きくなり、そうでない場合にはパケット間隔が変化しない、という性質を利用して利用可能帯域を推定する。手法による違いは、計測用パケットを送るタイミングや計測用パケット送出レートの決定方法にある。本報告では、そのうち、Pathload [12] の手法を用いて基本的な原理を説明する。次に、エンド端末間パスが複数のネットワークを通過する状況において、複数箇所の利用可能帯域を同時に計測する手法を提案する。提案手法は、上述の既存手法を拡張し、パス上のルータにおいてパケットの受信及び送信時刻の記録が行える環境を前提とし、計測パケットの送信レートの設定、および受信間隔の観察をより詳細に行うことによって実現する。提案手法の性能評価を行うために、簡易シミュレーションを行い、利用可能帯域の計測結果と実際の利用可能帯域を比較することにより計測精度を評価する。また、提案方式によって同時計測が可能となるネットワーク状況を明らかにすることで、提案方式の実ネットワーク環境における適用性を評価する。

本報告の構成は次のとおりである。2章では既存の計測手法を用いて利用可能帯域の計測原理を説明する。3章では複数箇所の利用可能帯域を同時に計測するための手法を提案する。4章では提案手法の性能評価を行う。最後に5章で本報告のまとめを行い、今後の課題について述べる。

2 既存の利用可能帯域の計測手法

本章では，エンド端末間パスの利用可能帯域を計測する手法における基本的な計測原理について説明する．既存の帯域計測手法は，最初に送信端末において計測用パケットを生成し，指定したレートで送信する．その後，受信端末において受信間隔を観察することにより計測用パケットの送信レートと受信レートの大小関係を判断する．その判断結果に基づき，送信レートを決定する．この操作を繰り返すことによりエンド端末間パスの利用可能帯域を推定する．最初に，ネットワークモデルを定義する．次に，Pathload の計測アルゴリズムを用いることでエンド端末間パスの利用可能帯域が計測される原理について説明する．

2.1 ネットワークモデル

2つのエンド端末に対して，計測を行うパスの経路が決定しているものとする．エンド端末間の経路は図1のように表され， H 個のリンクで構成され，計測中には変化しないものとする．計測用パケットを送る端末を送信端末，受信する端末を受信端末とする．送信端末から受信端末に向けて通信を行うとき，送信端末から受信端末までの経路中に経由したリンクをリンク1，リンク2， \dots ，リンク H とする．各リンク $i(i \in \{1 \dots H\})$ の物理帯域を C_i ，利用可能帯域を A_i ，エンド端末間パスの物理帯域を C ，エンド端末間パスの利用可能帯域を A とする．このとき，エンド端末間パスの物理帯域 C はボトルネックリンクの物理帯域に等しいため，

$$C \equiv \min_{i=1 \dots H} C_i \quad (1)$$

と表現される．エンド端末間パスの利用可能帯域は，そのリンクを流れるトラヒック量により変化するため，瞬時の利用可能帯域を把握することには意味がない．そのため，利用可能帯域としては，ある一定時間 τ における平均値を用いる．このとき，時間区間 $(t_0, t_0 + \tau)$ におけるリンク i の平均リンク利用率を $u_i^\tau(t_0)$ とすると，リンク i の利用可能帯域を $A_i^\tau(t_0)$ は，

$$A_i^\tau(t_0) \equiv C_i(1 - u_i^\tau(t_0)) \quad (2)$$

と表現できる．エンド端末間パスの利用可能帯域はボトルネックリンクの利用可能帯域と等しいため，

$$A^\tau(t_0) \equiv \min_{i=1 \dots H} C_i(1 - u_i^\tau(t_0)) \quad (3)$$

と表現できる．

2.2 利用可能帯域の計測原理

次に，エンド端末間パスの利用可能帯域の計測原理について説明する．経路上のルータのバッファサイズは十分に大きいものとし，パケットが送信端末から受信端末まで送られる間にパケット損失は発生せず，パケットの誤りや訂正は起こらないものとする．最初に，エンド端末間における片道遅延時間を導出し，エンド端末間の片道遅延時間を用いてエンド端末間パスの利用可能帯域を求める方法について説明する．次に，エンド端末間の片道遅延時間をパケットの送信間隔および受信間隔で表現することにより，パケットの送信間隔と受信間隔を使ってエンド端末間パスの利用可能帯域を求める方法を説明する．

送信端末か受信端末に向けて順番に計測用パケット 1，計測用パケット 2，…，計測用パケット K を送るものとする．このとき，計測用パケット $k(\in \{1\dots K\})$ のエンド端末間における片道遅延時間は，エンド端末間パスを構成するリンクに対する片道遅延時間の和に等しい．リンク i に対する片道遅延時間はリンク i に到着する前のルータまたはエンド端末にパケットがバッファに蓄積されてから，リンク i によって結ばれた先のルータまたはエンド端末にパケットが到着完了までの時間であるとする．すべての計測用パケットのパケットサイズを L とすると，リンク i に対する片道遅延時間は，リンク i に到着する前のルータで送信が開始されるまでの時間と，送信が開始されてリンク i の先のルータにパケットが到着するまでの時間の和となる．すなわち，計測用パケット k に関して，リンク i に到着前のバッファに蓄積されているデータ量 q_i^k を用いて，

$$D_i^k = \frac{L}{C_i} + \frac{q_i^k}{C_i} \quad (4)$$

と表すことができる．したがって，計測用パケット k のエンド端末間の片道遅延時間は

$$D^k = \sum_{i=1}^H \left(\frac{L}{C_i} + \frac{q_i^k}{C_i} \right) \quad (5)$$

となる．さらに，計測用パケット $(k-1)$ と計測用パケット k との間の，エンド端末間の片道遅延時間の変化量 ΔD^k は，

$$\Delta D^k = D^{k+1} - D^k = \sum_{i=1}^H \frac{q_i^{k+1} - q_i^k}{C_i} = \sum_{i=1}^H \frac{\Delta q_i^k}{C_i} \quad (6)$$

となる．この式から，計測用パケットの送信レート R_0 がエンド端末間パスの利用可能帯域 A より大きいと，エンド端末間パス上におけるルータバッファに蓄積されるため，式 (6) で表される片道遅延時間の変化量が大きくなることが分かる．一方， R_0 が A と等しいまたは小さい場合には，エンド端末間パス上のルータにはパケットが蓄積されないため，式 (6) から求められる片道遅延時間の変化量は 0 にほぼ等しくなる．

ここで，エンド端末間の片道遅延時間の変化量を送信端末における計測用パケットの送信間隔および受信端末における計測用パケットの受信間隔を使って表現する．計測用パケット k の送信端末における送信時刻を t_k ，受信端末での受信時刻を t'_k とする．計測用パケット k のエンド端末間の片道遅延時間は， $D^k = t'_k - t_k$ と表現され，エンド端末間の片道遅延時間の変化量は次のようになる．

$$\begin{aligned}\Delta D^k &= D^{k+1} - D^k \\ &= (t'_{k+1} - t_{k+1}) - (t'_k - t_k) \\ &= (t'_{k+1} - t'_k) - (t_{k+1} - t_k)\end{aligned}\tag{7}$$

式 (7) の 1 つ目の括弧内は受信端末での受信間隔を示し，2 つ目の括弧内は送信端末での送信間隔を示す．式 (7) は，エンド端末間の片道遅延時間の変化量は送信間隔と受信間隔の差であることを表している．すなわち，送信レート R_0 が利用可能帯域 A より大きいならば，受信間隔は送信間隔より大きくなり，式 (7) は正の値をもつ．一方，送信レート R_0 が利用可能帯域 A と等しい，あるいは小さいならば，受信間隔は送信間隔とほぼ等しくなるため，式 (7) は 0 に近い値となる．

したがって，計測用パケットをある送信レートで送り，送信端末における送信間隔と受信端末における受信間隔を観測することで，利用可能帯域と計測用パケットの送信レートの関係が分かる．この操作を繰り返すことにより，エンド端末間パスの利用可能帯域を推定することが可能となる．

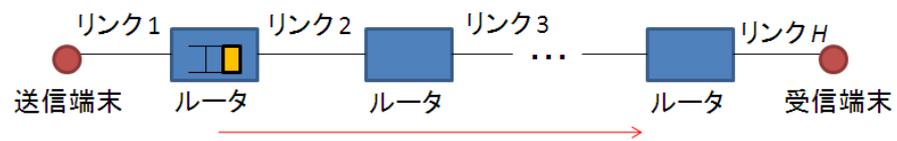


図 1: ネットワークモデル

2.3 Pathload のアルゴリズム

前節で説明した原理を利用して、エンド端末間パスの利用可能帯域を推定する手法の1つである、Pathload [12] について説明する。Pathload は、利用可能帯域の計測のために、利用可能帯域が存在すると推定される帯域の上限値および下限値を管理し、その幅を計測と共に徐々に小さくすることによって、計測結果を図2のように導出する。ここで、推定範囲の上限値を R^{max} 、推定範囲の下限値を R^{min} とする。初期値として R^{max} を十分大きな値、 R^{min} を0とする。送信端末においては、 n 回目の計測パケットの送出レートを $R(n)$ として計測用パケットを複数個送出する。その後、送信端末における送信間隔と受信端末における受信間隔を観測・比較することで、計測用パケットの通信レートと利用可能帯域の関係を推測し、以下のように $(n+1)$ 回目の計測における送信レートを決定する。

$$\begin{aligned} R(n) > A \text{ ならば } , R^{max} &= R(n); \\ R(n) \leq A \text{ ならば } , R^{min} &= R(n); \\ R(n+1) &= (R^{max} + R^{min})/2; \end{aligned} \tag{8}$$

推定精度 ω とすると、 n 回目の計測後に、 $R^{max} - R^{min} \leq \omega$ となれば、計測を終了する。このとき、 R^{max} が利用可能帯域の推定範囲の上限値を表し、 R^{min} が推定範囲の下限値を表す。

この計測原理を用いるにあたっては、下記のような点に注意する必要がある。計測用パケットの送信レートが利用可能帯域と近い場合には、パケットの送信間隔と受信間隔の比較結果があいまいとなることがあり、式(8)に示すような判断が行えない場合がある。そのため、計測用パケット数は、その判断を十分正確に行えるように設定すべきである。また、エンド端末間パスの利用可能帯域が計測時間中に変化することがあるため、計測開始直後に利用可能帯域に大きな変化が生じると、推定結果の精度が大きく低下することが考えられる。Pathload においては、このような状況に対応するために、式(8)に示すような判断を確実に行えない場合における、計測帯域幅の設定方法を提案している。詳細については [12] を参照されたい。

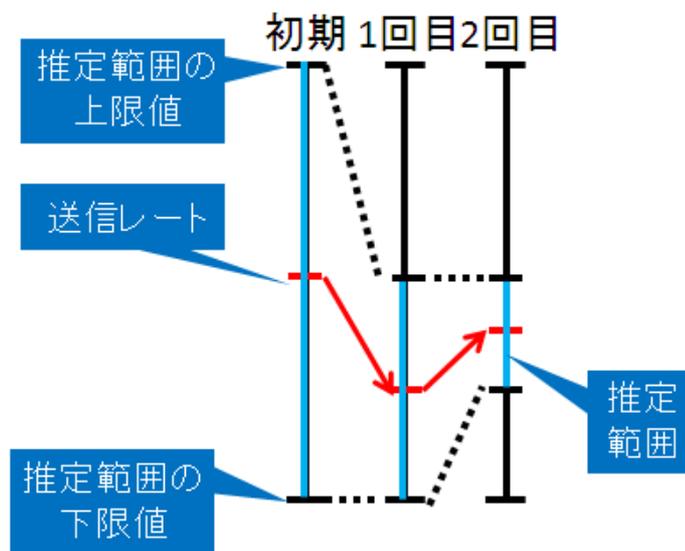


図 2: Pathload における計測帯域幅の決定方法

3 複数箇所の利用可能帯域の同時計測手法の提案

本章では図3のようにエンド端末間パスが複数のネットワークを経由する場合に，エンド端末間パスの構成される任意かつ複数のネットワークに対して利用可能帯域を同時に計測する手法を提案する．

3.1 提案手法

エンド端末間パス上に存在するネットワークを，送信端末から受信端末に向けて順にネットワーク区間1，ネットワーク区間2，…，ネットワーク区間 N とする．ネットワーク区間 $i(i \in \{1, \dots, N\})$ に属するエンド端末間パスのキャパシティを C_i ，利用可能帯域を A_i とする．送信端末から計測用パケットを送り，エンド端末間パス上の任意のネットワーク区間 i に対して，以下に示す手法によって，利用可能帯域の計測を行う．

まず最初に，各ネットワーク区間に対する複数個の計測用パケットから構成される計測ストリームを生成し，受信端末に向けて送出する．各ネットワーク区間の境界となるルータにおいて，計測パケットの到着時刻と送出時刻を記録されるものとする．その記録結果を用いて，ネットワーク区間 i に到着したパケットの流入レートとネットワーク区間 i における利用可能帯域の関係を Pathload と同様のアルゴリズムを用いて判断する．最後に，判断結果に基づいて，次回の計測における計測ストリームを構成するための，計測パケットの送信レートを決定する．以上の動作を繰り返すことによりエンド端末間パス上の任意のネットワーク区間 i における利用可能帯域 A_j を推定する．図4に計測手法の概要を示す．詳細なアルゴリズムは次のとおりである．

1. $(i-1)$ 回目にネットワーク区間 $j(j \in \{1, \dots, N\})$ において決定した利用可能帯域の推定範囲の上限値を $R_{max}(i, j)$ ，下限値を $R_{min}(i, j)$ とする．ただし，1回目の計測においては， $R_{max}(i, j)$ は送信端末のネットワークインタフェース速度に等しい値， $R_{min}(i, j)$ は0とする．
2. 区間 j に対する送信端末の送信レートを $R(i, j) = (R_{max}(i, j) + R_{min}(i, j))/2$ として，受信端末に向けて計測ストリームを送信する．このときの計測ストリームは各区間 j のための複数個の計測用パケットから構成され，送信する総計測パケット数を M とすると，1つの区間のためのパケット数を M/N に設定する．
3. 区間 j に流入する計測パケットをパケット $1, 2, \dots, M$ とする．全ての計測パケットについて，パケット k とパケット $k+1$ 間の流入レートおよび流出レートを $R_{in}(i, j, k)$ ， $R_{out}(i, j, k)$ とする．このとき，区間 j に対する計測用パケットの流入レートと流出

レートの関係から以下の操作を行う。

$$\begin{aligned} R_{in}(i, j, k) > R_{out}(i, j, k) \text{ なら } R_{NG}(j) &= \min\{R_{in}(i, j, k), R_{NG}(j)\} \\ R_{in}(i, j, k) = R_{out}(i, j, k) \text{ なら } R_{OK}(j) &= \max\{R_{in}(i, j, k), R_{OK}(j)\} \end{aligned} \quad (9)$$

その後， $R_{OK}(i, j) - R_{NG}(i, j)$ が十分小さければ区間 j に対する計測を終了する．すべての区間に対する計測が終了とすると，計測を終了する．

4. $R_{OK}(i, j) - R_{NG}(i, j)$ が推定精度 ω より大きければ， R_{max} ， R_{min} の値を以下のように更新し， i を 1 だけ増加し，1. へ戻る．

$$\begin{aligned} R_{max}(i + 1, j) &= R_{NG}(i, j); \\ R_{min}(i + 1, j) &= R_{OK}(i, j); \end{aligned} \quad (10)$$

図 4 に示すように，提案手法は，エンド端末間パス上の各ネットワーク区間に対して，Pathload と同様の利用可能帯域の推定幅を持ち，計測ストリームのパケットの各区間における送信間隔と受信間隔の観測結果を用いて，推定幅を更新することによって，各区間の利用可能帯域を計測するものである．

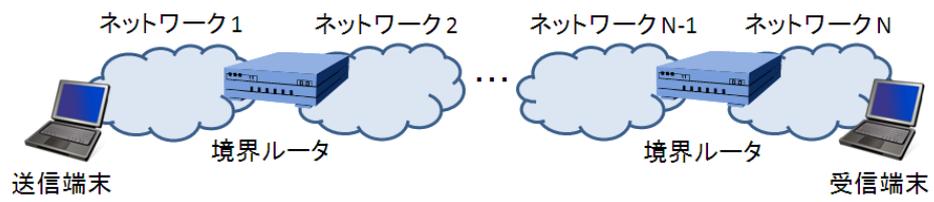


図 3: 複数箇所の利用可能帯域計測モデル

3.2 提案手法の特性

エンド端末間パス上のネットワーク区間 i に対して利用可能帯域を計測するためには、区間 i における計測用パケットの流入レートが、区間の利用可能帯域より大きい場合と小さい場合の両方が存在する必要がある。ネットワーク区間 i に計測用パケットが到着するとき、計測用パケットが到着する前のネットワーク区間の物理帯域や利用可能帯域によって計測用パケットの通信レートが低下する。そのため、計測用パケットの通信レートが利用可能帯域より大きくなならない場合が起こる。計測用パケットの最大通信速度はネットワーク i に到着するまでの区間のうち、ボトルネック区間の利用可能帯域に等しいので、エンド端末間パス上のネットワーク区間 i の利用可能帯域を計測するためには以下の式を満たす必要がある。

$$\min_{1 \leq j < i} A_j > A_i \quad (11)$$

一方、計測用パケットを高い通信レートで送ることにより利用可能帯域より大きい通信速度で送ることができるため、式 (11) を満たさなくても利用可能帯域を計測できる場合がある。図 5 のように左上に位置する送信端末から右の受信端末に向けて計測用パケットを送るとき、左上に位置する送信端末から受信端末に向かって 3 番目のリンクの利用可能帯域を計測することを考える。図 5 の左上の送信端末から計測用パケットを受信端末へ非常に高い通信速度で送り、最初のルータにおいてバッファを占有する。左上に位置する送信端末から受信端末に向かって 2 番目のリンクを計測用パケットが通過する通信速度は 2 番目に通過するリンクの物理帯域に相当する。そのため、左上に位置する送信端末から受信端末に向かって 2 番目のリンクの物理帯域より 3 番目のリンクの利用可能帯域が小さいならば 3 番目のリンクの利用可能帯域を計測することができる。しかし、利用可能帯域を計測する区間が、計測用パケットが到着するまでに経由するリンクが多い場合、背景トラヒックと混ざることにより通信速度が低下するため、計測精度が悪化することがある。

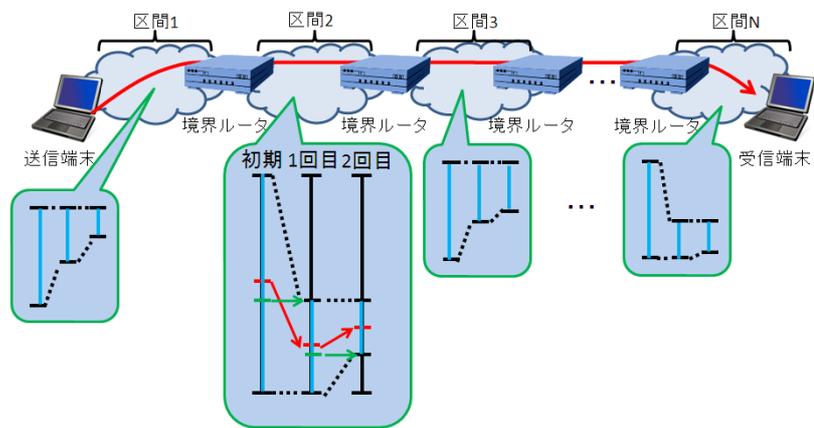


図 4: 複数箇所の利用可能帯域計測手法

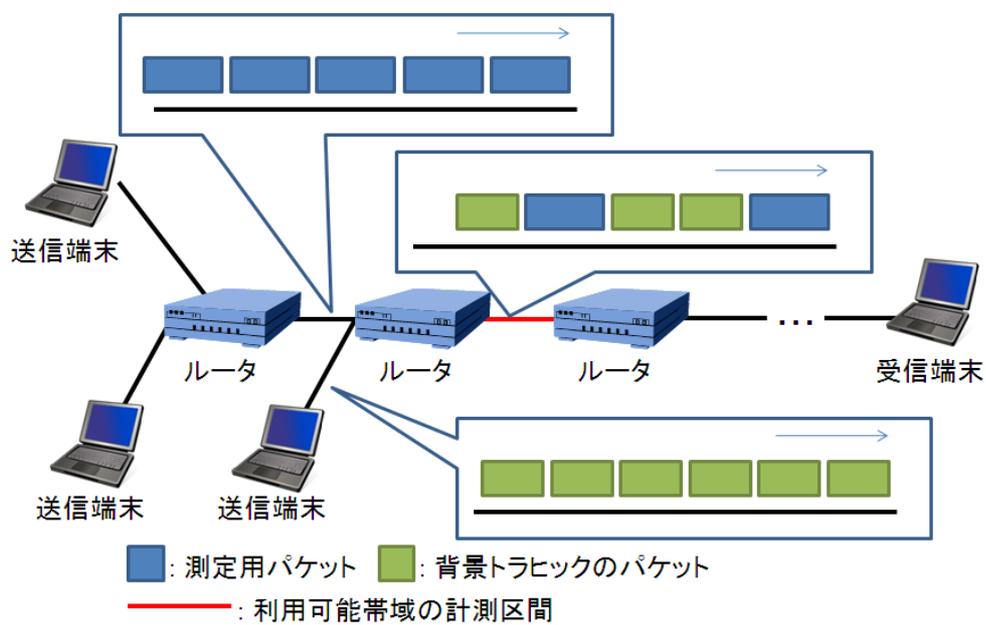


図 5: 提案手法における計測原理

4 性能評価

本章では，3章で提案した，エンド端末間パスの複数ネットワーク区間の利用可能帯域の同時計測手法の性能評価を，簡易的なシミュレーションによって行う．

4.1 評価環境

ネットワークモデルを図6に示す．ネットワークは，計測を実行する送信端末 (s0) 及び受信端末 (s2)，3台のルータ (s4, s5, s6)，背景トラフィックを送受信する端末 (s1, s7, s8, s3)，およびそれらを接続するリンクから構成される．ネットワークリンクの物理帯域は全て 100Mbps とする．背景トラフィックは s1-s8 間，および s7-s3 間を流れるものとする．この環境において，s0-s2 間の計測により，s4-s5 間及び s5-s6 間の帯域を同時に計測するシミュレーションを行う．以降，s4-s5 間をネットワーク区間 1，s5-s6 間をネットワーク区間 2 とそれぞれ呼ぶ．

シミュレーションは，簡易的な流体モデルを用いた数値計算手法によって行う．図6に，シミュレーションにおける輻輳発生時のトラフィックレートの決定方法を示す．出力リンクの帯域が C [Mbps] のリンクに対し，背景トラフィックが N [Mbps]，および計測トラフィックが M [Mbps] 流入する際に，出力リンクをに出力される背景トラフィック N' [Mbps]，および計測トラフィックのレート M' [Mbps] は，以下のように決定されるとする．

$$N' = \begin{cases} N & (M + N \leq C) \\ \frac{C \cdot N}{M + N} & (C < M + N) \end{cases} \quad (12)$$

$$M' = \begin{cases} M & (M + N \leq C) \\ \frac{C \cdot M}{M + N} & (C < M + N) \end{cases} \quad (13)$$

また，背景トラフィックが時間と共に変動している状況を想定するため，計測トラフィックが通過する際の背景トラフィック量は，平均 N [Mbps]，標準偏差 $e \cdot N$ [Mbps] の正規分布に従うとする． e は背景トラフィックの変動幅を決定するためのパラメータである．計測手法の性能は，計測対象である各リンクにおける利用可能帯域である $(100 - N)$ [Mbps] を，どの程度の精度で計測できるかによって評価する．

性能評価に際しては，ネットワーク区間 1 及び 2 の背景トラフィック量の平均値を，(90, 10), (80, 20), ... (20, 80), (10, 90) [Mbps] と変化させる．これは，計測手法が計測すべきネットワーク区間 1 及び 2 における利用可能帯域が，(10, 90), (20, 80), ... (80, 20), (90, 10) [Mbps] であることを意味する．なお，提案方式は PathLoad と同様，計測結果を，利用可能帯域が含まれる区間を表す，上限帯域と下限帯域を用いて出力する．したがって，その中央値を最終的な計測結果と扱うものとする．

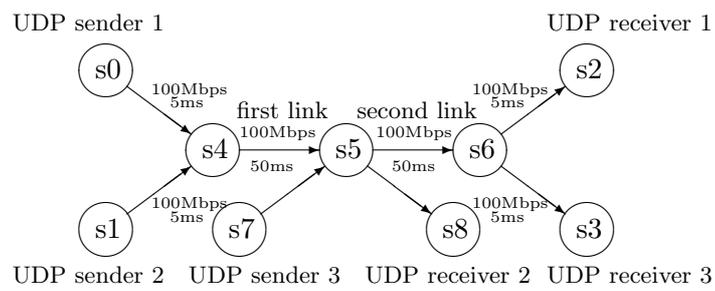


図 6: シミュレーションモデル

4.2 評価結果

図7に、 $e=0.1, 0.3, 0.5$ のときの、提案方式の計測精度を評価したシミュレーション結果を示す。これらの結果は、それぞれの設定において、100回のシミュレーションを行い、得られた計測結果の平均値、および上限帯域と下限帯域の幅の平均値を表している。横軸はネットワーク区間1における真の利用可能帯域値であり、その際の、ネットワーク区間1及び2における利用可能帯域の計測値をプロットしている。図中の2本の直線は、それぞれネットワーク区間1及び2において、真の利用可能帯域値と計測値が等しい時を表す。したがって、計測結果がこの線上に近いと、計測精度が高いと言える。

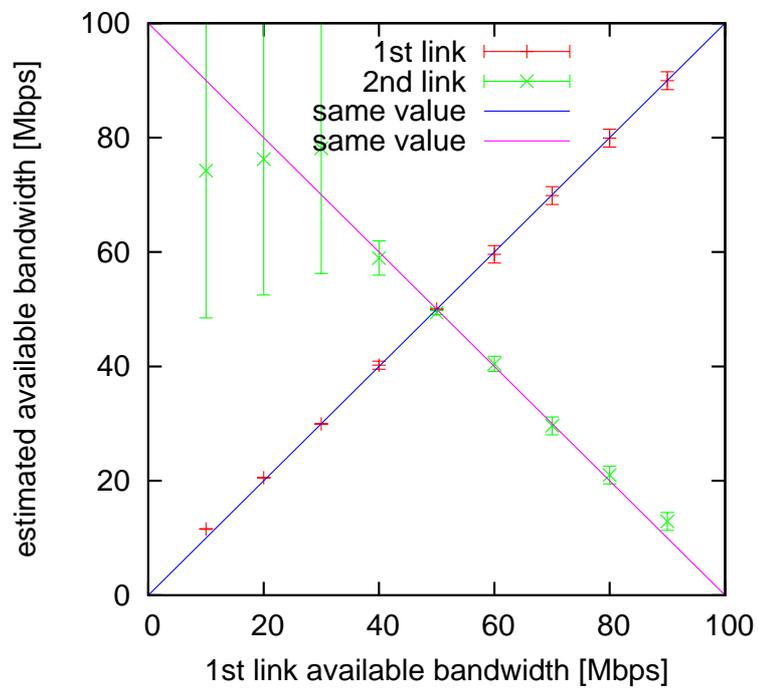
図7より、ネットワーク区間1の真の利用可能帯域値より、ネットワーク区間2の真の利用可能帯域値が小さい場合(図中、横軸の50 [Mbps]を超える範囲を意味する)には、両区間の計測精度は $e=0.1$ の時が最も高く、 e が大きくなるにつれ、その精度が低下することがわかる。これは、ネットワーク区間2の利用可能帯域がネットワーク区間1よりも小さい場合には、ネットワーク区間1を通過した計測パケットの送出レートが、ネットワーク区間2の利用可能帯域よりも大きくなるが多いため、精度の高い計測が行えるためである。また、 e が大きくなると、計測パケットがネットワーク区間を通過する際のレート変動が大きくなるため、誤差が大きくなる。

一方、ネットワーク区間1の真の利用可能帯域値より、ネットワーク区間2の真の利用可能帯域値が大きい場合(図中、横軸の50 [Mbps]より小さい範囲を意味する)には、特にネットワーク区間2の計測精度が低いことがわかる。これは、ネットワーク区間2の利用可能帯域がネットワーク区間1よりも大きい場合には、ネットワーク区間1を通過した計測パケットの送出レートが、ネットワーク区間2の利用可能帯域よりも大きくなることがほとんどないため、ネットワーク区間2において計測ストリームのパケット間隔が大きくなることが稀となり、計測精度が低下するためであると考えられる。一方、 e が大きくなると、ネットワーク区間2の計測精度が若干向上している。これは、 e が大きくなると、背景トラフィックの変動が大きくなるため、ネットワーク区間1を通過した計測ストリームの送出レートが、ネットワーク区間2の利用可能帯域よりも大きくなる割合が増加するためであると考えられる。

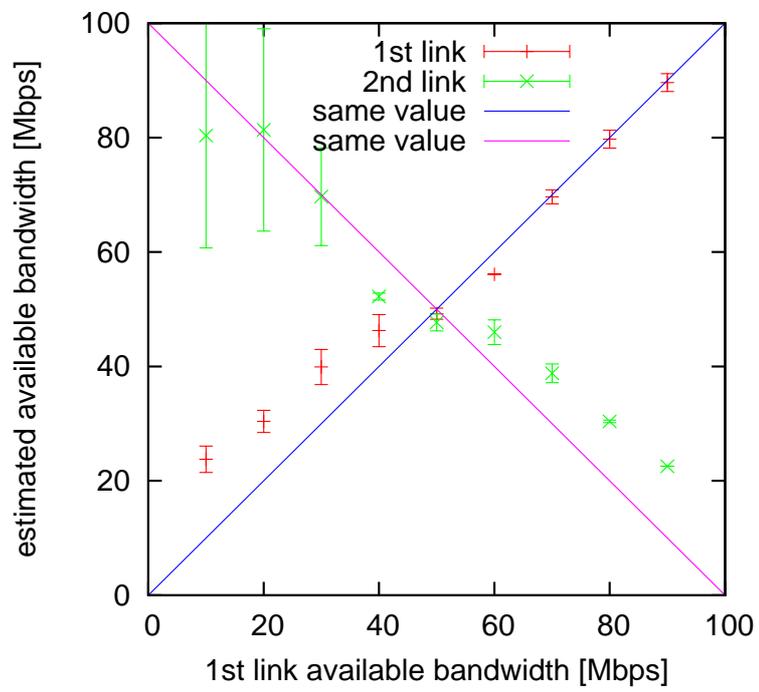
また、図7(c)より、背景トラフィックの変動幅が非常に大きい場合には、真の利用可能帯域の値に関係なく、計測精度が大幅に悪化していることが分かる。このことから、提案方式を用いて計測する場合においては、ある程度背景トラフィックが安定していることが求められることが分かる。このような変動に対しては、利用可能帯域を継続的に計測し、統計処理を行うことによって精度を向上させることができると考えられる。統計処理による計測精度の向上に関しては今後の課題としたい。

以上の結果から、提案手法は、エンド端末間の複数ネットワーク区間の利用可能帯域を同

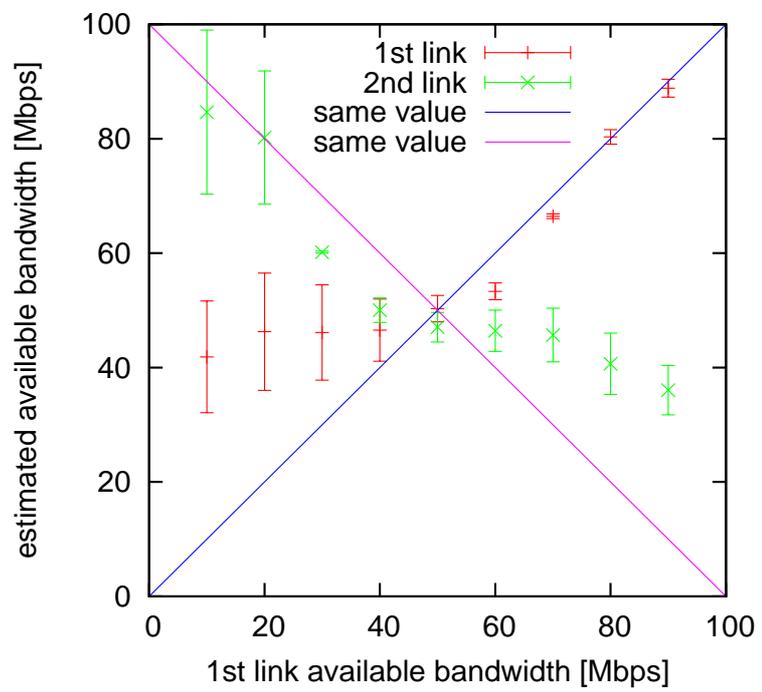
時に計測することができる手法であることが確かめられた。また、ネットワーク区間 1 とネットワーク区間 2 の真の利用可能帯域値の大小関係によって、計測精度が大きく変化すること、また、背景トラフィックの変動の大きさによって、計測精度が様々に変化することが明らかとなった。



(a) $e=0.1$



(b) $e=0.3$



(c) $e=0.5$

図 7: 提案方式の性能評価結果

5 まとめと今後の課題

本報告では、エンド端末間パス上の複数ネットワーク区間の利用可能帯域を、同時に計測する手法を提案した。提案手法は、エンド端末間パスの利用可能帯域のみを計測する既存手法である PathLoad を基本とし、その計測手法を、複数区間の同時計測を行うために拡張したものである。簡易的なシミュレーション評価の結果、提案手法は、エンド端末間の複数ネットワーク区間の利用可能帯域を同時に計測することができる手法であることが確かめられた。また、各ネットワーク区間の利用可能帯域の大小関係によって、提案方式の計測精度が様々な影響を受けることがわかった。

今後の課題としては、より詳細なパケットレベルのシミュレーションによる、提案方式の性能評価が上げられる。特に、より受信端末に近いネットワーク区間の利用可能帯域が、送信端末に近いネットワーク区間の利用可能帯域よりも大きい場合には、送信端末に近いネットワーク区間を通過した計測ストリームの送出レートがどのようになるかが、受信端末に近いネットワーク区間の利用可能帯域の計測精度に大きな影響を与える。このような観点からの性能評価は、パケットレベルのシミュレーションを行うことによって可能である。さらに、それらのシミュレーション結果を踏まえた、より良い計測ストリームの構成方法を検討したい。また、3 箇所以上の同時計測の性能評価や、実装実験なども重要な課題であると考えられる。

謝辞

本報告を終えるにあたり，ご指導を頂きました大阪大学大学院情報科学研究科 中野博隆教授に心から感謝申し上げます。

本報告を進めるにあたり，ご指導ならびにご助言を頂きました大阪大学大学院情報科学研究科 村田正幸教授に心から感謝致します。

平素から熱いご指導，本報告を進めるにあたるご相談，本報告の作成にあたりご指導を頂きました大阪大学大学院情報科学研究科 長谷川剛准教授に深く心から感謝致します。

本報告を進めるにあたりプログラムの作成に多大なご助言頂いた松田一仁氏，本報告を進めるにあたりご相談頂いた橋本匡史氏を代表とする中野研究室の皆様にご深く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] “アップル - iPhone - 携帯電話, iPod, インターネットデバイスがひとつに . . .” available at <http://www.apple.com/jp/iphone/>.
- [2] “PSP® 「プレステーションポータブル」| プレステーションオフィシャルサイト.” available at <http://www.jp.playstation.com/psp/>.
- [3] “ニンテンドー DS.” available at <http://www.nintendo.co.jp/ds/>.
- [4] “Hobbes’ Internet Timeline.” available at <http://www.zakon.org/robert/internet/timeline/>.
- [5] A. B. Downey, “Using pathchar to estimate Internet link characteristics,” in *Proceedings of ACM SIGCOMM 1999*, Aug 1999.
- [6] B. A. Mah, “pchar : A Tool for Measuring Internet Path Characteristics..” available at <http://www.kitchenlab.org/www/bmah/Software/pchar/>.
- [7] “Pathchar.” available at <http://www.caida.org/tools/utilities/others/pathchar/>.
- [8] M. Jain and C. Dovrolis, “Pathload: A Measurement Tool for End-to-End Available Bandwidth,” in *Proceedings of PAM 2002*, Mar 2002.
- [9] “Tobi Oetiker’s MRTG - The Multi Router Traffic Grapher.” available at <http://oss.oetiker.ch/mrtg/>.
- [10] R. Wang, G. Pau, K. Yamada, M. Y. Sanadidi, and M. Gerla, “TCP Startup Performance in Large Bandwidth Networks,” in *Proceedings of INFOCOM 2004*, Mar 2004.
- [11] N. J. A. Harvey, M. B. Jones, S. Saroiu, M. Theimer, and A. Wolman, “SkipNet: A Scalable Overlay Network with Practical Locality Properties,” tech. rep., USITS, Mar 2003.
- [12] M. Jain and C. Dovrolis, “End-to-End Available Bandwidth: Measurement Methodology, Dynamics, and Relation with TCP Throughput,” in *Proceedings of ACM SIGCOMM 2002*, Aug 2002.

- [13] “Pathload: Available Bandwidth Measurement Tool.” available at <http://www.cc.gatech.edu/fac/Constantinos.Dovrolis/bw-est/pathload.html>.
- [14] B. Melander, M. Bjorkman, and P. Gunningberg, “A New End-to-End Probing and Analysis Method for Estimating Bandwidth Bottlenecks,” in *Proceedings of GLOBE-COM 2000*, Nov 2000.
- [15] V. J. Ribeiro, R. H. Riedi, R. G. Baraniuk, J. Navratil, and L. Cottrell, “pathChirp: Efficient Available Bandwidth Estimation for Network Paths,” in *Proceedings of PAM 2003*, Apr 2003.
- [16] V. J. Ribeiro, M. Coates, R. H. Riedi, S. Sarvotham, B. Hendricks, and R. Baraniuk, “Multifractal Cross-Traffic Estimation,” in *Proceeding of ITC-SS 13*, Sept 2000.
- [17] C. L. T. Man., *Inline Network Measurement: TCP Built-in Techniques for Inferring End-to-end Bandwidth*. PhD thesis, Osaka University, Jan 2007.
- [18] “ImTCP Web Page.” available at <http://anarg.jp/intcp/>.