

エンド端末間パスにおける複数区間の利用可能帯域計測手法

鯉谷 和正[†] 長谷川 剛^{††} 村田 正幸[†]

[†] 大阪大学 大学院情報科学研究科 〒 565-0871 大阪府吹田市山田丘 1-5

^{††} 大阪大学 サイバーメディアセンター 〒 560-0043 大阪府豊中市待兼山町 1-32

E-mail: [†]{k-koitani,murata}@ist.osaka-u.ac.jp, ^{††}hasegawa@cmc.osaka-u.ac.jp

あらまし ネットワーク輻輳の検知，通信レートの制御，オーバレイネットワークにおける経路制御やトポロジ制御などの様々なネットワーク制御を行う際に，エンド端末間パスの利用可能帯域は重要な指標となる．既存のエンド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を目的としており，ボトルネック区間そのものの特定やパス上の複数区間の利用可能帯域の計測を行うことはできない．そこで本稿では，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を提案する．提案手法は，経路上のルータにおいてパケットの到着時間が記録できることを前提とし，各ネットワーク区間におけるパケット到着間隔の変化を利用し，利用可能帯域を推定する．性能評価の結果，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高い精度で計測することが可能であることを示す．

キーワード 利用可能帯域，ネットワーク計測，複数区間，SLoPS

Measuring available bandwidth of multiple parts on end-to-end network path

Kazumasa KOITANI[†], Go HASEGAWA^{††}, and Masayuki MURATA[†]

[†] Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University 1-5, Yamadaoka, Suita, Osaka, 565-0871 Japan

^{††} Cybermedia Center, Osaka University 1-32, Machikaneyama-cho, Toyonaka, Osaka, 560-0043 Japan

E-mail: [†]{k-koitani,murata}@ist.osaka-u.ac.jp, ^{††}hasegawa@cmc.osaka-u.ac.jp

Abstract The available bandwidth on an end-to-end network path is an important performance metric for detecting network congestion, adapting transmission rate, configuring path and topology on overlay networks, and so on. The existing available bandwidth measurement techniques aimed only at knowing available bandwidth of the bottleneck part on the path and they do not specify where is the bottleneck. Also, they can not measure available bandwidth of multiple parts on the path. In this report, we propose a simultaneous measurement method of available bandwidth of multiple parts on an end-to-end network path. The proposed method estimates the available bandwidth based on changes in packet arrival intervals under the situation where intermediate routers can make timestamps of incoming packets. We present extensive simulation results of the proposed method and confirm that it can accurately measure available bandwidth of each part on the path even when the available bandwidth of the sender side network is smaller than that of the receiver side network.

Key words available bandwidth, network measurement, multiple part, SLoPS

1. はじめに

情報通信機能を含む家電の出現や携帯電話の発達などに伴い，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 [1]，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複雑なものになり，その結果，エンド端末間パスの物理的な最大レートである物理帯域や，背景トラフィックの影響を考慮した利用

可能帯域は様々な値となり、さらに、時間とともに大きく変動する [2] 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能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 [3] 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って決定される。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、例えば、通信レートを調整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。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搬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 [4]、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。それに対し、パケット誤り率が大きくならない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はできない。さらに、オーバーレイネットワーク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ーレイノードの設置場所を検討するといった場合 [5] 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、効率的なオーバーレイネットワークを構築できない。これらの問題は、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、それ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区間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。

そこで本稿では、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

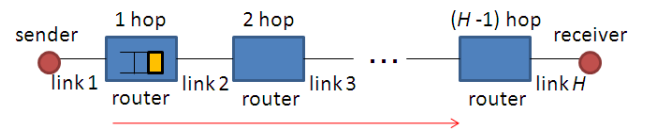


図 1 ネットワークモデル

案する。提案手法は、パス上のルータにおいてパケットの到着時刻の記録が行える状況を前提とし、計測対象区間における計測パケットの到着間隔の変化を利用することにより、各区間における利用可能帯域を推定する。

提案手法の性能評価を行うために、ns-2 [6] を用いた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。

本稿の構成は次のとおりである。2. 章では既存の計測方法を用いて利用可能帯域の計測原理を説明する。3. 章では複数区間の利用可能帯域を同時に計測するための提案手法を示す。4. 章では提案手法の性能評価を行う。最後に 5. 章で本稿のまとめと今後の課題について述べる。

2. エンド端末間パスの利用可能帯域計測手法

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、Cprobe [7]、Pathload [8]、pathChirp [9] などが挙げられる。これらの手法は、送信端末において計測パケットを生成し、指定したレートで送信する。次に、受信端末において受信間隔を観測することにより計測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。最後に、その判断結果に基づき、エンド端末間パスの利用可能帯域を推定する。以降ではまず、ネットワークモデルを定義し、エンド端末間パスの利用可能帯域計測のための基本的な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、計測中は変化しないものとする。計測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フィ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 $u_i(t_0)$ とすると、リンク i の利用可能帯域 $A_i(t_0)$ は、

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

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，

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

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．具体的には，エンド端末間の片道遅延時間の変化量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示す．

送信端末が受信端末に向けて順番に計測パケット 1，計測パケット 2，...，計測パケット K を送るものとする．計測パケット 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．

$$\begin{aligned} \Delta D^k &= D^{k+1} - D^k \\ &= (t'_{k+1} - t_{k+1}) - (t'_k - t_k) \\ &= (t'_{k+1} - t'_k) - (t_{k+1} - t_k) \\ &= \Delta t'_k - \Delta t_k \end{aligned} \quad (4)$$

式 (4) の $\Delta t'_k$ は受信端末での受信間隔を示し， Δt_k は送信端末での送信間隔を示す．式 (4) 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との差に等しいことを表している．すなわち，計測パケットの送信レートが利用可能帯域より大きいならば，パス上のルータにおいて背景トラフィックの影響を受け，受信間隔は送信間隔より大きくなるため，式 (4) は正の値をもつ．一方，送信レートが利用可能帯域と等しい，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り，式 (4) は 0 に近い値となる．また，式 (4) の計算に際しては，送信端末と受信端末の時計の同期を必要としない．

したがって，計測パケットを利用可能帯域よりも高いレート，および，利用可能帯域よりも低いレートを含む様々なレートで送り，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パケットの送信レートの大小関係が分かる．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．

3. 複数区間の利用可能帯域同時計測手法

前章では計測パケットを送り，送信端末および受信端末におけるパケット間隔の変化を観測することで，エンド端末間パスの利用可能帯域を計測できることを説明した．本章では，その原理を応用し，エンド端末間パスにおける複数区間の利用可能帯域を同時に計測する手法を提案する．まず，計測パケットが複数のネットワークを経由する場合にみられる性質について述べ，その性質に基づいて計測手法を提案する．

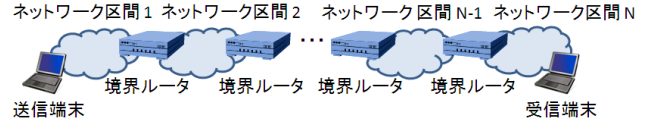


図 2 複数区間の利用可能帯域計測モデル

3.1 提案手法の基本方針

エンド端末間パス上に存在するネットワークを，図 2 のように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 $j(j \in \{1, \dots, N\})$ に属するエンド端末間パスの物理帯域を $C(j)$ ，利用可能帯域を $A(j)$ とする．送信端末から計測パケットを送り，エンド端末間パス上の任意のネットワーク区間 j に対して，利用可能帯域の計測を行う．

利用可能帯域の計測は，計測パケットが計測区間に入る際のパケット間隔と，計測区間から出る際のパケット間隔を観測することによって行う．その際，2 つの計測パケットの間隔を観測すると，背景トラフィックの変動やパケットサイズの影響により，計測誤差が大きくなる．そこで，複数個の計測パケットの平均的な送受信レートを観測することにより計測を行う．以下，計測パケットが計測区間に入る際のレートを流入レート，計測区間の出口で観測される計測パケットのレートを流出レートと定義する．

3.2 複数区間の同時計測の可能性

2.2 節で示したように，エンド端末間パス上のネットワーク区間の利用可能帯域を計測するためには，区間における計測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．ネットワーク区間に到着する計測パケットの流入レートは，その区間より手前のネットワークの物理帯域や利用可能帯域の影響を受ける．区間への流入レートがその区間の利用可能帯域より常に小さい場合や常に大きい場合には，利用可能帯域の正確な計測を行うことができない．このことから，一般的に，区間 j における利用可能帯域 $A(j)$ を計測するためには，以下の式が満たされる必要があると考えられる．

$$\min_{1 \leq k < j} A(k) > A(j) \quad (5)$$

上式は，区間 j よりも手前のネットワーク区間に，利用可能帯域が区間 j よりも小さな区間が存在する場合には，区間 j の利用可能帯域を計測することができないことを意味している．しかし，実際には，式 (5) 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．これは，利用可能帯域は時間とともに変動することが一般的であることに加えて，計測パケットを高いレートで送信することによって，区間 j への計測パケットの流入レートを式 (5) の左辺よりも大きくすることができるためである [10]．以下では，このことを ns-2 を用いたシミュレーションによって確認する．

図 3 にシミュレーションに用いるネットワークモデルを示す．リンクの物理帯域はすべて 100 [Mbps] とする．背景トラフィックはノード n1 からノード n4, n5 を経由してノード n8 へ

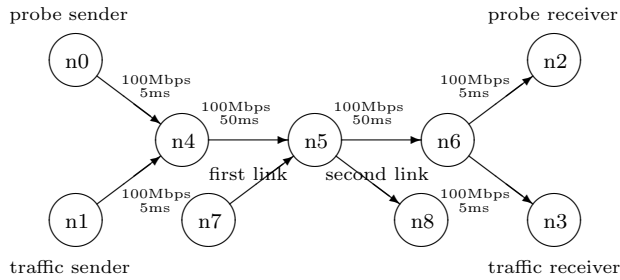


図3 シミュレーションモデル

X_1 [Mbps] の通信レートで送り、ノード n7 からノード n5, n6 を経由してノード n3 へ X_2 [Mbps] の通信レートで送る．計測パケットはノード n0 からノード n4, n5, n6 を経由してノード n2 へ送る．送信する計測パケットの間隔は、0.0001 [s] から 0.002 [s] まで 0.00001 [s] 刻みで変動させる．背景トラヒックのパケットサイズは 1000 [Bytes]，計測パケットのパケットサイズは 1500 [Bytes] とする．このとき、計測パケットが通過するパスの 2 段目のリンクであるノード n5-n6 間の区間において、計測パケットの流入レートと流出レートを観測する．ここで用いる流入レートおよび流出レートは、連続する K_0 個の計測パケットの平均レートを用いる．すなわち、連続する K_0 個の計測パケットのパケット送出時刻、またはパケット到着時刻を t_1, t_2, \dots, t_{K_0} [s] とし、パケットサイズを L [Bytes] としたとき、流入レートまたは流出レートを、

$$R_{ave} = \frac{8(K_0 - 1)L}{t_{K_0} - t_1} \quad (6)$$

とする．

図 4 は、 $K_0 = 2, 6, 10$ とし、1 段目のリンクの背景トラヒックを $X_1 = 50$ [Mbps]，2 段目のリンクの背景トラヒックを $X_2 = 40$ [Mbps] とした場合の、2 段目のリンクである n5-n6 間のリンクに対する計測パケットの流入レートと流出レートの関係を示している．計測区間の物理帯域は 100 [Mbps]，背景トラヒックは 40 [Mbps] であることから、真の利用可能帯域は 60 [Mbps] である．一方、1 段目のリンクである n4-n5 のリンクにおける利用可能帯域は 50 [Mbps] である．図から、 K_0 の値にかかわらず、1 段目のリンクにおける利用可能帯域である 50 [Mbps] を上回るレートで 2 段目のリンクへの計測パケットが流入していることが分かる．また、特に K_0 が大きい場合には、2 段目への流入レートが 40 [Mbps] を超えた場合に、流出レートが流入レートより小さくなることが分かる．これは、2.2 節に示した利用可能帯域の計測原理が適用可能であることを示している．一方、 K_0 が小さい場合には、流入レートと流出レートの関係が一定でなく、計測原理の適用が困難であるといえる．これは、計測に用いるパケット数が少ない場合には、通過するネットワークにおける様々な影響を受けることが原因であると考えられる．

これらの結果から、 K_0 をある程度大きくすることで、複数ネットワーク区間の利用可能帯域の計測が可能であるといえる．一方で、 K_0 が大きくなることで、計測パケットの送受信間隔に関する情報が丸められるため、計測原理の適用が困難になる

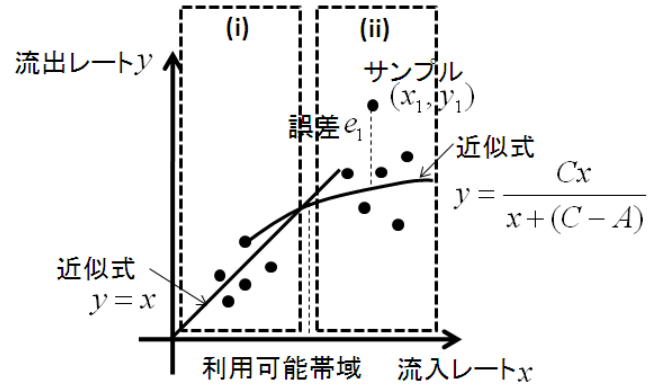


図5 提案手法の利用可能帯域計算方法

場合がある．このことは、図 4(b) に比べて、図 4(c) における計測結果が、より $y = x$ に近い箇所に集まっていることからいえる．また、計測に用いたパケット数に対して得られるレートに関するデータが少なくなる．そのため、計測精度と得られるデータの数を考慮し、 K_0 を決定する必要がある．

3.3 提案手法

従来のエンド端末間パスにおける利用可能帯域を計測する手法は、パス上のボトルネックリンクの利用可能帯域値のみを計測することが目的であるため、送信端末における計測パケットの送信レート、及び受信端末での受信レートを基に利用可能帯域の算出を行うことができる．しかし、エンド間パス上の複数区間を同時に計測するためには、それぞれの計測区間における計測パケットの流入レートを知ることが必要となる．そのため、提案方式においては、送信端末から様々なレートで計測パケットを送出し、計測区間の境界ルータにおいてパケットの到着時刻を記録する．これにより、各計測区間における計測パケットの流入レートと流出レートを把握し、利用可能帯域の計測を行う．

提案手法における利用可能帯域の算出方法を図 5 に示す．この図は、図 4 に示したシミュレーション結果をモデル化したものである．モデルは、計測区間への流入レートと利用可能帯域の大小関係によって 2 つの部分に分けられる．背景トラヒックのレートと計測パケットの流入レートの和が物理帯域を超えない場合には、それぞれのトラヒックが計測区間への流入レートのままで流出する (図 5 の (i) の部分に相当)．一方、背景トラヒックと計測パケットの流入レートの和が物理帯域を超える場合には、それぞれの流入レートの比で物理帯域を分配したレートで流出するものとする (図 5 の (ii) の部分に相当)．このモデルは、計測区間における計測パケットの流入レートを x [Mbps]，流入レートが x [Mbps] のときの流出レートを $y(x)$ [Mbps]，物理帯域を C [Mbps]，利用可能帯域を A [Mbps] とし、次式で表すことができる．

$$y(x) = \begin{cases} x & x \leq A \\ \frac{Cx}{x+(C-A)} & x > A \end{cases} \quad (7)$$

提案手法においては、観測した流出レートと流入レートのサンプル値に対して、式 (7) に対するフィッティングを行い、2 乗誤差の総和が最小となるときの A の値を、区間の利用可能帯域と

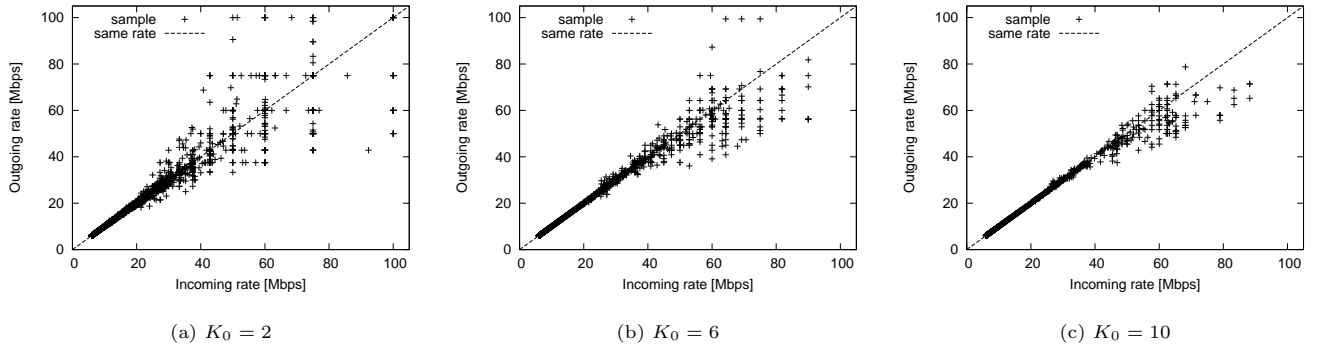


図 4 計測区間における流入レートと流出レートの関係

する．具体的な計測手法を以下に示す．

送信端末からある一定の通信レートで計測パケットを K 個送り、それぞれの計測パケットを $P_i (i \in \{1, \dots, K\})$ とする．そのうち、 K_0 個の計測パケット $P_i, P_{i+1}, \dots, P_{i+K_0-1} (i \in \{1, \dots, K - K_0 + 1\})$ の平均流入レートを x_i [Mbps]、流出レートを y_i [Mbps] とし、式 (7) との誤差を $e_i = y_i - y(x_i)$ とする．送信端末から様々な送信レートで計測パケットを送信し、合計で N_{all} 個のサンプルデータ $(x_i, y_i) (i \in \{1, \dots, N_{all}\})$ を取得したものとする．ここで、サンプルデータを流入レートによって分割する．分割のための流入レートの粒度を R_0 [Mbps] とすると、サンプルデータはその流入レートが 0 [Mbps] から $C(j)$ [Mbps] まで $\lceil C(j)/R_0 \rceil$ 個に分割される．さらに、分割されたそれぞれのサンプルデータに対して、流入レートと流出レートをそれぞれ平均をとることで、1 つのサンプルデータとする．この操作により生成されたサンプルを $(\hat{x}_i, \hat{y}_i) (i \in \{1, \dots, \lceil C(j)/R_0 \rceil\})$ とする．計測区間 j に対して物理帯域 $C(j)$ [Mbps] は既知とし、利用可能帯域を $A(j)$ [Mbps] と仮定すると、2 乗誤差の総和は、

$$e(A(j)) = \sum_{\hat{x}_i \leq A(j)} (\hat{y}_i - \hat{x}_i)^2 + \sum_{\hat{x}_i > A(j)} \left(\hat{y}_i - \frac{C(j) \cdot \hat{x}_i}{\hat{x}_i + (C(j) - A(j))} \right)^2 \quad (8)$$

となる．計測区間 j の利用可能帯域の推定値 \bar{A}_j は次式で与えられる．

$$\bar{A}(j) = \underset{A(j)}{\operatorname{argmin}} e(A(j)) \quad (9)$$

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、ns-2 によるシミュレーションによって行う．

4.1 評価環境

シミュレーションに用いるネットワークモデルは、3.2 節で用いた、図 3 のモデルとする．物理帯域はすべて 100 [Mbps] とし、1 段目のリンクである n4-n5 間のリンクの利用可能帯域を $A(1)$ 、2 段目のリンクである n5-n6 間のリンクの利用可能帯域を $A(2)$ とする．n1 から n8 への背景トラフィック、および n7

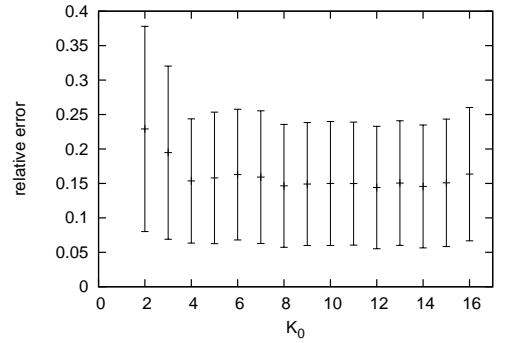


図 7 提案方式における利用可能帯域の計測誤差

から n3 への背景トラフィックのレートを変化させることにより、 $A(1)$ および $A(2)$ の大きさや大小関係を様々に変化させる．背景トラフィックは、指数分布に従った送信間隔で送信する．このとき、3.3 節で示した提案手法を 2 段目のリンクの区間に対して適用し、利用可能帯域の計測を行った．提案方式のパラメータである R_0 は 1 [Mbps] とした．

4.2 評価結果

図 6 に提案手法の計測精度を評価したシミュレーション結果を示す．図は、1 段目のリンクの利用可能帯域 $A(1)$ が異なる場合において、2 段目のリンク $A(2)$ が変動した場合の、提案手法の計測結果の平均値を、 $K_0 = 2, 6, 10$ の場合について示している．

図から、 $A(1)$ および $A(2)$ の値にかかわらず、提案方式が 2 段目のリンクの利用可能帯域を高い精度で計測できていることが分かる．特に、 $A(2) < A(1)$ の場合、すなわち、式 (5) が成立する場合には、計測精度が非常に高い．一方、 $A(2) > A(1)$ の場合においても、 $A(2)$ が比較的小さい場合においては、計測精度はほとんど低下していない．これは、式 (5) が成立しない場合においても、利用可能帯域の計測が可能であることを表している．一方、 $A(2)$ が $A(1)$ よりも大きくなり、物理帯域である 100 [Mbps] に近づくにつれ、計測精度が低下することが分かる．これは、 $A(2)$ を正確に計測するためには、 $A(2)$ よりも大きなレートで計測パケットが区間へ流入する必要があるのに対し、 $A(2)$ が物理帯域に近づく、そのような計測パケットが減少するためである．

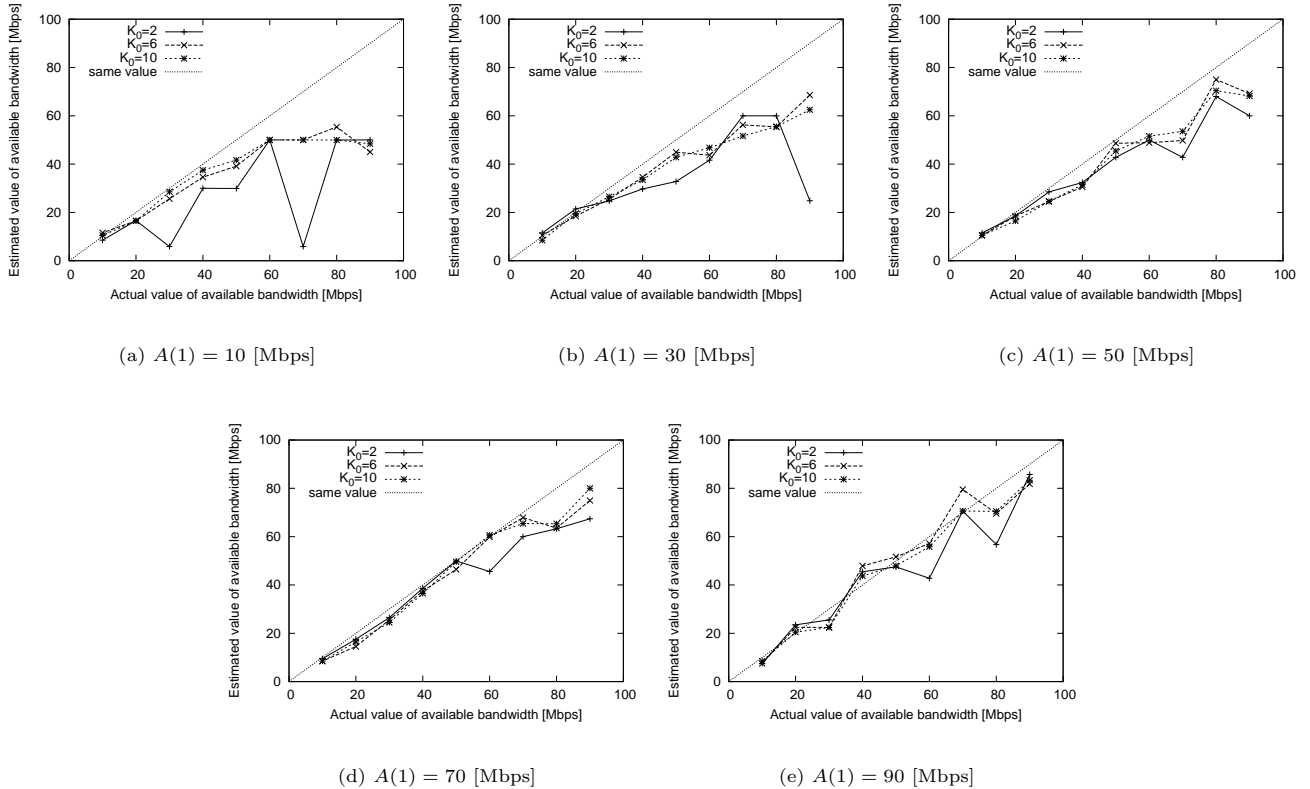


図 6 シミュレーション上の利用可能帯域計測結果

図 7 に、 K_0 の値に対する、シミュレーションによって得られた計測誤差の平均値の変化を示す。ここで、計測誤差を真の利用可能帯域 A ，推定した利用可能帯域 \bar{A} を用いて、以下のように定義する。

$$e = \frac{|A - \bar{A}|}{A} \quad (10)$$

図中のエラーバーは標準偏差の大きさを表している。図より、 $K_0 \leq 3$ のときは $K_0 \geq 4$ の場合と比べて、計測誤差が大きくなっていることが分かる。これは、 K_0 が小さい場合には、計測パケットの間隔が背景トラフィックの変化に影響を受けて大きく変動するのに対し、 K_0 を大きくした場合には計測パケットの間隔が平均化され、3. 章で示したモデルに近づくためであると考えられる。一方、 K_0 が 4 以上の場合には、計測誤差には大きな変化は見られない。計測パケットがネットワークに与える負荷を低減することを考慮すると、 K_0 は小さいほうが望ましい。今後は、これらの性質を考慮し、計測精度を保ちつつ計測負荷を低減する計測手法について検討したい。

5. おわりに

本稿においては、既存の利用可能帯域手法の計測原理を応用し、エンド端末間パス上における複数かつ任意のネットワーク区間を同時に計測する手法を提案した。シミュレーションによる評価の結果、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から近いネットワーク区間より大きい場合においても、各区間の利用可能帯域を約 15% 以内の誤差で計測が可能であることを示した。

今後の課題として、計測精度と計測負荷の両面を考慮した、

計測パケットの送出レートの決定方法の検討が挙げられる。

文 献

- [1] “Hobbes’ Internet Timeline.” available at <http://www.zakon.org/robert/internet/timeline/>.
- [2] E. Ko, D. An, and I. Yeom, “Dealing with Sudden Bandwidth Changes in TCP,” in *Proceedings of IEEE ICC 2008*, pp. 3007–3011, May 2008.
- [3] J. Strauss, D. Katabi, and F. Kaashoek, “A Measurement Study of Available Bandwidth Estimation Tools,” in *Proceedings of IMC 2003*, pp. 39–44, October 2003.
- [4] M. Portoles-Comeras, A. Cabellos-Aparicio, J. Mangues-Bafalluy, A. Banchs, and J. Domingo-Pascual, “Impact of Transient CSMA/CA Access Delays on Active Bandwidth Measurements,” in *Proceedings of ACM SIGCOMM IMC 2009*, pp. 397–409, November 2009.
- [5] C. L. T. Man, G. Hasegawa, and M. Murata, “A New Available Bandwidth Measurement Technique for Service Overlay Networks,” in *Proceedings of E2EMON 2003*, pp. 436–448, September 2003.
- [6] “ns-2 web page.” available at <http://isi.edu/nsnam/ns/>.
- [7] C. Robert L and M. E. Crovella, “Dynamic Server Selection using Bandwidth Probing in Wide-Area Networks,” tech. rep., Boston University, 1996.
- [8] M. Jain and C. Dovrolis, “End-to-End Available Bandwidth: Measurement Methodology, Dynamics, and Relation with TCP Throughput,” in *Proceedings of ACM SIGCOMM 2002*, pp. 295–308, August 2002.
- [9] 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*, pp. 1–11, April 2003.
- [10] C. Dovrolis, P. Ramanathan, and D. Moore, “What do packet dispersion techniques measure?,” in *Proceedings of INFOCOM 2001*, vol. 2, pp. 905–914, April 2001.