

## インパルス型プロービングによるインターネットの可用帯域のアクティブ測定

### Available Bandwidth Measurement Technique Using Impulsive Packet Probing for Monitoring End-to-End Service Quality in the Internet

パベル セリン 長谷川 和音 小原 仁  
Pavel Selin Kazune Hasegawa Hitoshi Obara

秋田大学 工学資源学研究所 電気電子工学専攻  
Department of Electrical and Electronic Engineering,  
Graduate School of Engineering and Resource Science, Akita University

〒010-8502 秋田市手形学園町 1-1

E-mail: obara@ee.akita-u.ac.jp

キーワード： インターネット， 可用帯域， アクティブ測定， プローブパケット， パケット分散

#### 1. まえがき

近年，インターネットは社会インフラの一つと位置づけられるようになり，ブロードバンドサービスやリアルタイム通信サービスなどが広く普及したことで，エンド・エンド間のユーザ回線の品質モニタに対するニーズが高まっている．実際，エンド・エンド回線のスループットやパケットロス率などの様々な特性を測定する試みが始まった[1][2]．

本報告は，ユーザ回線のスループットの上限を与える，ネットワークのエンド・エンド間の可用帯域（以下， Available Band-Width: ABW と略記）の測定技術に焦点を当てる．ABW の定義は周知の通り次のように与えられる[3]．インターネット内の複数の伝送リンクに跨って設定されたユーザ回線を考える．それぞれのリンクは，ある最大情報伝送速度（以下，ワイヤレートと呼ぶ）を有しており，平均的に見ればその帯域の一部が実際に使用されている．ワイヤレートから使用帯域を引いたものが，そのリンクの空き容量となる．あるエンドユーザ間を結ぶ経路上の，すべてのリンクの空き容量の集合の中で最小のものが ABW である．

ABW の測定技術はパッシブ測定とアクティブ測定の 2 つに大別される[4]．パッシブ測定では，回線の経路に設置されたルータの管理情報にアクセスする必要があり，通常，一般ユーザはその情報を利用できない．一方，本論文で対象とするアクティブ測定は，ユーザ自身が試験用のパケット（以下，Probe Packet : PP と略記）を送受信することで容易に測定できる．ABW のアクティブ測定は 2000 年頃から世界的に研究が盛んに行われ，多くの測定法が提案されてきた[1]．現在はフリーの測定ツールも利用できる状況である．

ABW 測定法は，測定ポイントの形態からシングルエンド形やダブルエンド形などの分類[5]の他，プローブパケットの形態から単一パケット形，パケットペア形，パケットトレイン形などの分類[5]，あるいは，測定対象となる物理量からレートモデル（パケットの速度）やギャップモデル（パケットの時間間隔）などの分類[6]のように外見的特徴で類型化されている．しかし，原理的な側面からの考察に基づく分類や，それらの関連性などを明らかにする体系化の試みに関しては，筆者らの知

るかぎり殆ど例がない．

以上で述べた背景から，本報告では最初に ABW のアクティブ測定の分類に関して，インパルス測定とスイープ測定という新たな分類の視点を提示する．従来の回路解析技術とのアナロジーから ABW 測定原理の本質的な違いについて考察する．また，インパルス測定に分類される従来方式の問題点を明らかにする．次に，その問題点を解決するため，一対の異速度プローブトレインを用いた新たな測定法を提案する．同時に，その測定精度を上げるための最適な方式パラメータについて考察する．最後に，1 ホップのモデルを対象に，計算機シミュレーションによって，その基本的な特性を評価する．

#### 2. 可用帯域測定のアプローチ：スイープ測定とインパルス測定

##### 2.1 アナログ回線の帯域測定とのアナロジー

ある伝送帯域  $B$  を有するアナログ回線（あるいは回路）を考えてみよう． $B$  を測定する方法は，周知のように原理的に 2 つに大別できる．第一は，周波数領域での測定であり，送信信号の周波数を変化（スイープ）させて回線の伝送損失を測定し，それが急激に増大する臨界周波数を  $B$  とする．第二は時間領域での測定であり，インパルスを送信して受信信号のパルス幅の広がりより間接的に  $B$  を推定する．原理的に，スイープ測定は試験信号をチューニングしながら複数回送信する必要があり，測定時間が長い．反対に，インパルス測定では試験信号の送信は 1 回のみでよく，測定時間は非常に短い．ただし，試験信号として理想的なインパルスを用いることはできないことや位相特性の影響などにより，その測定精度はスイープ測定に劣る．本報告における一つのポイントは，この議論を従来の ABW 測定技術の分類に応用する点である．

##### 2.2 スイープ測定

ABW のスイープ測定は，いくつかのタイプに分けられる．第一のタイプは，Pathload[7]や Pathchirp[8]のようにプローブパケットの速度を変化させ，ABW を越えた場合のパケット伝送遅延の上昇を検出するもので，Self-Loading Packet Sequence

(SLoPS)とも呼ばれる。第二のタイプは IGI[9]のようにプローブパケット間隔を徐々に広げ、送信端と受信端でのパケット間隔が等しくなる点を探す。第一の方式とスイープする方向が反対となる。第三のタイプは Pathtracer[10]のように可変長パケット (VPS: Variable Packet Size) を用いる方式である。VPS 方式は元々、リンクのワイヤレートの測定のために提案されたが、ルータのキューイングモデルを想定することで ABW を推定する。

これらの方式に共通するのは、プローブパケットの速度や長さなどのパラメータを適宜変化させて複数回の測定を行う点である。このため、プローブパケット量が増大し、測定時間が長くなる傾向がある。しかし、そのような犠牲を払うことによって、一般に測定精度はよい。

### 2.3 インパルス測定

ABW のインパルス測定は、プローブパケットの形態から、単一パケット (VPS) を使うタイプ[11], Spruce[12]のようにパケットペアを使うタイプ, c-probe [2]のようにパケットトレインを使うタイプなどに分けることができる。これらは、いずれも受信端におけるプローブパケット到着時間や間隔の変化を測定し、ある推定式に基づいて間接的に ABW を算出する。インパルス測定は原理的に1回の測定でよいが、使用するプローブパケットが比較的少量であることに起因して測定値のばらつきが大きい。このため、同一条件で複数回の測定を行い、測定値の統計処理を行う。

一般に、従来のインパルス測定による ABW の算出には、リンクのワイヤレートの情報が必要であり、その測定が別途必要であった。ワイヤレートの測定はスイープ測定が用いられることが多いため、それらを合計した測定時間は長くなり、インパルス測定のメリットが発揮できない問題があった。

筆者らはこの問題に対して、異なる測定条件でインパルス測定を実行し、それらの測定結果を連立させて解析することでワイヤレート測定を必要としない手法を2006年に提案し[13], 研究を継続してきた[14][15][16]。具体的には、プローブ信号として一对の異速度パケットトレインを用い、そのパケット間隔の広がり (以下、「分散 (dispersion)」と呼ぶ) を測定する方式である。この方式では、1回の測定に要するパケット数はパケットペア方式より増えるものの、それによって測定精度が向上し、全体の測定回数減少が期待できる。なお、最近になって、プローブパケットの形態は異なるものの、本研究と類似のアプローチを採用した方式も提案されている[17]。

## 3. 一对の異速度パケットトレインを用いた可用帯域のインパルス測定の原理

### 3.1 測定対象のモデルと測定パラメータ

議論を簡単にするために、測定対象を2台のルータと1本の伝送リンク (被測定リンク) から構成される1ホップのモデルとする (図1)。中央のリンクが被測定リンクであり、他の複数のユーザからのトラフィック (以下、クロスラフィック) によって、その帯域の一部が占有されている。一般に、クロスラフィックはバースト状に発生するが、平均的な負荷は一定 (定常) とする。この基本的なモデルは、従来の研究でも広く用いられている。提案方式では、複数の PP を含むプローブトレイン (Probe Train: PT と略記) を発生する送信部と、それらを受信して PT の分散を測定し、ABW を算出する受信部を含む。提案

方式で用いる PP の概略を図2に示す。速度の異なる1対の PT を用いる点が特徴である。提案方式に関連するパラメータを以下で定義する。

#### (a) 送信部

従来と同様に、UDP レベルで試験用パケット (PP) を発生する。一番目に送信する PT (1st PT) において、1つの PP に含まれるビット数 (PP 長) を  $l_1$  (bits), 1つのトレインに含まれる PP 数 (PT 長) を  $n_1$  とする。また、1つの PT の中で、その最初の PP の先頭から、最後の PP の先頭までの時間 (トレイン時間) を  $t_1$  (sec) とする (図1参照)。同様に、二番目に送信する PT (2nd PT) において、PP 長を  $l_2$  (bits), PT 長を  $n_2$  とする。また、そのトレイン時間を  $t_2$  (sec) とする。1つのトレイン内では PP の間隔は一定とする。この場合、送信部における PT の速度は以下のように定義される。

$$v_1 = \frac{l_1 \cdot (n_1 - 1)}{t_1} \quad (1)$$

$$v_2 = \frac{l_2 \cdot (n_2 - 1)}{t_2} \quad (2)$$

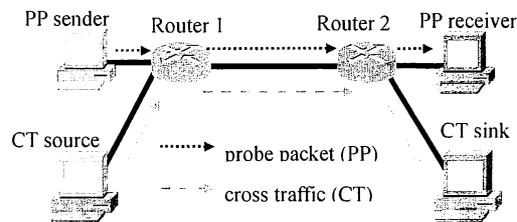


図1 測定対象のモデル

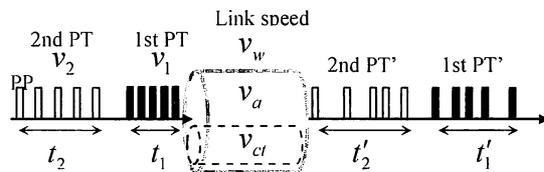


図2 提案方式に関連するパラメータ

#### (b) 被測定リンク

クロスラフィックの帯域を  $v_{ct}$  とする (図2参照)。未使用のまま残されている可用帯域を  $v_a$  とする。被測定リンクのワイヤレート  $v_w$  は  $v_a + v_{ct}$  となる。

#### (c) 受信部

受信したプローブトレイン (1st PT' および 2nd PT') において、その PP 長と PT 長は、それぞれ送信部の PP 長と PT 長に等しい。ただし、1st PT' および 2nd PT' は、ともにクロスラフィックの影響を受け、そのトレイン時間は、それぞれ  $t_1'$  および  $t_2'$  に変化する (図2参照)。

### 3.2 可用帯域推定の基本原理

図2において1st PTに注目すると、 $t_1$  時間内に被測定リンクに注入される平均のビット数は、プローブ信号が  $v_1 t_1$  となり、

クロストラヒックが  $v_{ct}t_1$  となる。よって、 $t_1$  時間内の合計ビット数は  $(v_{ct} + v_1)t_1$  となる。被測定リンク上では、これらのビットが直列に並ぶことになり、リンクの占有時間が変化する。その後、受信部のルータでプローブ信号とクロストラヒックは分離される。分離された 1st PT の分散は  $t'_1$  で与えられており、その時間内に存在するプローブ信号とクロストラヒックの合計ビット数は  $(v_{ct} + v_a)t'_1$  で与えられる。被測定リンクに入力されたビット数と出力されたビット数は等しくなるから、次式が成立する。

$$(v_1 + v_{ct}) \cdot t_1 = (v_a + v_{ct}) \cdot t'_1 \quad (3)$$

同様の議論から 2nd PT に関して次式が成立する。

$$(v_2 + v_{ct}) \cdot t_2 = (v_a + v_{ct}) \cdot t'_2 \quad (4)$$

式(3)と(4)において、 $v_a$ と $v_{ct}$ の2つが未知数であり、それ以外のパラメータはすべて既知である。よって、 $v_a$ と $v_{ct}$ は $v_1 \neq v_2$ が満たされる場合、式(3)と(4)の連立方程式より容易に求めることができる。本報告で評価対象としている $v_a$ は次式で与えられる。

$$v_a = \frac{\begin{pmatrix} t'_1 & -1 \\ t_1 & \end{pmatrix} \cdot v_2 - \begin{pmatrix} t'_2 & -1 \\ t_2 & \end{pmatrix} \cdot v_1}{\begin{matrix} t'_1 & -t'_2 \\ t_1 & -t_2 \end{matrix}} \quad (5)$$

以上より、速度の異なる1対のPTを用い、その分散を測定することにより、原理的に1回の測定でABWを求めることができる。

従来のABW測定では、同一条件で複数回の測定を行い、その平均を求めることで測定精度を上げている。提案方法に関して複数回の測定を行う場合、次の2つのアプローチが考えられる。第一は、図2に示した1対のPTによる測定を単純に $k$ 回繰り返し、 $k$ 個の $v_a$ の推定値を得てから、その平均をとる方法である。第二は、図2に示した1つのPTを $m$ 個のPTに置き換えて、 $t'_1$ および $t'_2$ の測定をそれぞれ $m$ 回実行し、 $t'_1$ および $t'_2$ の平均値を求めてから式(5)による推定を行う方法である。それらを組み合わせて一般化した測定形態を図3に示す。 $m$ 個のPTを1セットとし、それらの1対のセットを用いて1回のABW測定を第二の方法で行う。さらに第一の方法で合計 $k$ 回のABW測定を行う。

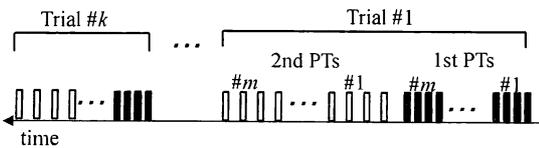


図3 繰り返し測定の実現方法

### 3.3 提案方式の測定条件の最適化

式(3)に関連して、提案方式を特徴づける最も基本的なパラメータは、1対のPT速度 $v_1$ および $v_2$ であり、それらはABWの測定性能に大きな影響を及ぼす。以下、その最適な設定条件について述べる。

#### (a) プローブトレイン速度の要求条件

式(3)において $v_1 \leq v_a$ と設定すると、プローブ速度はABWより小さいため分散は発生しない。すなわち、 $t'_1 = t_1$ となる。これは $v_2$ についても同様である。この結果、式(5)において分母が0となり、計算不能となる。このため、 $v_1$ と $v_2$ は $v_a$ より大きく設定する必要がある。厳密に言えば、少なくとも $v_1 > v_a$ の条件を満たす必要がある。 $v_2$ に関しては $v_2 \neq v_1 \cap v_2 \geq v_a$ の場合は推定が可能となる。 $v_2 \neq v_1 \cap v_2 < v_a$ の場合は、式(6)より $v_a = v_2$ が得られ、計算は可能であるがABWの正確な値が得られない。以上の議論から、 $v_1$ と $v_2$ の範囲は $v_w$ と $v_a$ の間に設定すればよい。ただし、 $v_1$ と $v_2$ は同一の値をとる事はできない。

以下では、議論の見通しをよくするため $t_1 = t_2$ と仮定する。式(5)の分母より $v_1$ と $v_2$ が互いに近い値を取った場合、 $t_1 = t_2, t'_1 \cong t'_2$ となるため分母 $\rightarrow 0$ および分子 $\rightarrow 0$ となり、測定系の誤差の影響を大きく受け、正確な測定が困難になる。この問題を避けるためには $t'_1$ と $t'_2$ の差が最大になるように $v_1$ と $v_2$ を設定すればよい。具体的には、 $v_1$ を送信部の最大速度となる $v_w$ に設定すればよい。これは容易に実現できる。また、 $v_2$ をその許容範囲の最小となる $v_a$ に設定すればよい。しかし、 $v_a$ はもともと未知数であり、測定前にその値を知ることはできない。この矛盾を解決するため、本報告では以下に述べる解決法を提案する。

#### (b) ADR (Synchronous Dispersion Rate) の利用

上記の議論より、1st PTの速度 $v_1$ を送信部の $v_w$ に設定する。この場合、受信側でプローブの分散が観測されなければ、ABWはその $v_w$ より大きいことがわかり、その後の測定は不要である。一般に、送受信部が含まれるLANの帯域は、被測定リンクが含まれるWANの帯域より大きいため、通常は $t'_1 > t_1$ となる。この場合、 $t'_1$ を用いて、ABWを次の式で推定する。

$$v_{ADR} = \frac{(n_1 - 1)t_1}{t'_1} \quad (6)$$

$v_{ADR}$ はADR (Synchronous Dispersion Rate) と呼ばれる帯域であり、真のABWより大きな値となる[6]。この性質は、ADRを $v_2$ として用いるために好都合である。なお、提案方式において、 $v_1$ を用いた $t'_1$ の測定はもともと必要であるが、受信側で式(7)を計算し、その結果を送信側へ返送するというオーバーヘッドが生ずる。しかし、ADRの計算は非常に単純である。また、送信側の1対のPTは、ある程度の時間間隔がもともと必要であり、その時間を利用して受信側から送信側にADRを返送すればよい。

#### (c) 測定精度向上のための改良方式

提案方式はインパルス測定であり、原理的に1回の測定でよい。もちろん、測定値のばらつきを抑えるため、同一条件で複数回の測定を行い、その平均を取ることで測定精度の改善が見込める。しかし、従来のスイープ測定と同等以上の高い測定精

度が求められる場合も想定される。このようなニーズに応えるための改良方式を次に提案する。その測定手順を時系列で記述すると次のようになる。

①送信部は  $v_w$  に設定された 1st PT を送出し、受信部はその分散  $t_1'$  を計測する。

②受信部は式(6)に基づいて ADR を算出し、送信部に通知する。

③送信部は  $v_2$  を ADR に設定して送出する。受信部では、その分散  $t_2'$  を計測し、①で得られた  $t_1'$  を用いて式(5)より ABW を算出する。

④受信部は③で算出した ABW を送信部に通知する。

⑤送信部は、あらためて 2nd PT を送信するが、その速度は④で受信した ABW に設定する。

⑥受信部は、③と同様に 2nd PT の分散  $t_2'$  を計測し、ABW を算出する。また、次の条件が満たされているかどうかを判定する。

$$\frac{|t_2' - t_2|}{t_2} \leq \varepsilon \quad (7)$$

ここで、 $\varepsilon$  は収束判定のための微小量であり、IGI 方式で定義されたものと同じである。

⑦式(7)が満たされる場合は測定を終了し、⑥で算出された ABW を最終的な推定値として出力する。式(7)が満たされない場合は、④に戻って測定を継続する。この測定ループを繰り返すことで、最適な測定条件に近づけることができる。その測定精度は式(7)で規定される。

## 4. 提案方式のシミュレーションによる性能評価

### 4.1 シミュレーション条件

#### (a) ネットワークモデル

シミュレーションによる解析の対象は、図 1 に示した 1 リンクのモデルである。図 1 の被測定リンクの  $v_w$  や伝送距離は本質的なパラメータではないが、モデル作成のために 100Mb/s、10km とした。送信部と受信部については 100Mb/s、0.1km とした。シミュレーションモデルは VisualSLAM[18]を用い、グラフィカルに記述した。インターネットにおける最近の観測結果[19]を基に、クロストラフィックの packetsize を 100Byte と 1500Byte の 2 種類とし、トラフィック量は 6 対 4 の比率とした。それらの packetsize 間隔は指数分布とし、それぞれ独立に発生した後、1つの FIFO キューに合流させ、その出力をクロストラフィックとして図 1 のルータに接続した。ルータのバッファは FIFO 動作であり、その容量は無限大とした。送信部における 1st PT と 2nd PT の時間間隔は、1st PT によるルータのバッファの過渡的な負荷上昇が定常状態に戻るまでの十分な時間とした(今回のモデルでは 100ms)。

### 4.2 最適な測定パラメータ条件の検証

#### (a) PT 速度 ( $v_1$ と $v_2$ ) の最適条件

図 1 において、被測定リンクの  $v_a$  が 90Mb/s、50Mb/s、10Mb/s の 3 つのケースについて、 $v_1=100Mb/s$ 、 $v_2=90Mb/s$  と設定し、ABW の推定を行った結果を図 4 に示す。PP 長  $l=1500Bytes$ 、PT 長  $n=50$  として 100 回の測定(推定)を実施した結果をプロットした。また、それと同一条件で  $v_2$  を ABW

と等しく設定した場合の推定結果を図 5 に示す。なお、図 4 では推定値の上限と下限をそれぞれ 100Mb/s と 0Mb/s とし、その範囲を超える推定値が得られた場合は上限(100Mb/s)または下限(0Mb/s)とした。図 4 では  $v_1$  と  $v_2$  が近い値であり、最適条件に該当する  $v_a=90Mb/s$  では誤差が小さく、それ以外では誤差が大きいことがわかる。一方、図 5 では  $v_2=v_a$  の最適条件が常に満たされており、全てのケースで誤差が小さくなる。この結果より、3.3 で述べた最適な測定条件の有効性が示された。

#### (b) 可用帯域の逐次更新方式の効果

3.3(c)で述べた提案方式について、その性能を評価した。測定パラメータは  $v_1=100Mb/s$ 、 $l=1500bytes$ 、 $n=50$ 、 $m=2$ 、 $k=1$  とした。式(7)で定義された  $\varepsilon$  は IGI 方式と同じく 10%に設定した。図 6 の横軸に更新回数  $r$  を、縦軸に ABW 推定値の軌跡を示す。 $r=0$  の点は 1st PT による ADR の計算値に相当する。図 6 より、ABW が小さいほど更新回数は増える傾向にあるが、1回目の更新で急速に目的値に近づく。また、ABW の更新回数は高々 3 回であり、早く収束する。 $v_a=10Mb/s$  のケースに注目すると、IGI 方式では ADR に相当する 50Mb/s からスタートし、5Mb/s の固定ステップでスイープした場合は 7 回以上の試行が必要である。一方、提案方式では 1 回の更新で誤差が 5Mb/s 以下に収まる。これより、提案方式は IGI 方式の 7 分の 1 程度のプローブパケット量で同等の精度が得られる可能性がある。

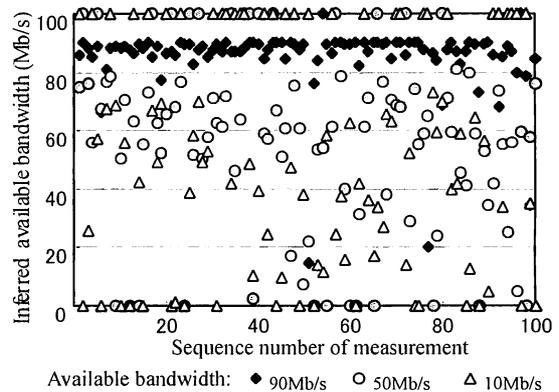


図 4  $v_1=100Mb/s$ 、 $v_2=90Mb/s$  の場合のシミュレーション結果

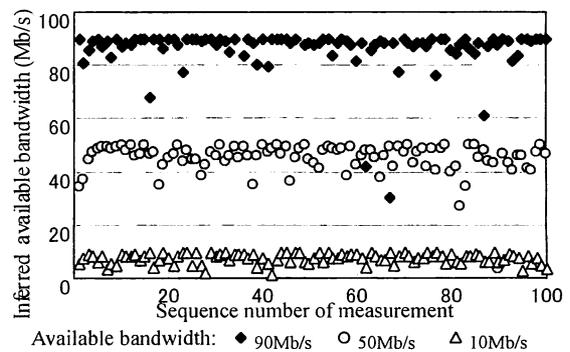


図 5  $v_1=100Mb/s$ 、 $v_2=v_a$  の場合のシミュレーション結果

#### (c) 提案方式による可用帯域の評価例

図 6 と同一条件で、クロストラフィック量を変化させ、1つの ABW について 100 回の測定を行った。その推定値のヒストグラムからモード(最頻値)をドットで表し、最小値と最大値をエラーバーでプロットした結果を図 7 に示す。モードは理論値の

3%以下の誤差となった。図5と同様に、ABWの推定値は全般的に理論値より小さくなる傾向が見られた。また、従来の測定結果と同様に、ABWが小さくなるほど、推定値の相対的なばらつきが大きくなる傾向が見られた。クロストラフィック条件やPPのビット数が異なるが、提案方式のばらつきは従来の1ホップのシミュレーション結果[9]の半分程度となった。

### 5. むすび

本報告では、可用帯域のアクティブ測定技術の分類に関する議論から始め、インパルス測定という新たな分類の視点を提案した。その妥当性については今後さらに議論を要するものの、それによって従来の外観的な特徴による分類に代わり、原理的な特徴を明確に表すことができたと考えられる。次に、従来のインパルス測定方式は、それが本来有する短時間での測定という特徴を活かしていない問題点を指摘した。それを解決するため、1対の異速度プローブトレインを用いる方式を提案し、その最適な測定条件を明らかにした。従来技術と同等の測定精度を得るため、提案方式をベースとし、可用帯域の推定値を更新する改良方式を新たに提案した。この方式は1~3回の繰り返し測定で、数%程度の誤差で測定が可能であることをシミュレーションにより実証した。また、その場合のプローブ信号のビット数は、従来のIGI方式の数分の1でよいことを示した。要約すれば、本論文は可用帯域のアクティブ測定技術に関して、インパルス測定という新たな視点からの展開の可能性を、その具体的な実現例によって示した。本文中で言及したいいくつかの課題については今後も研究を継続し、他の機会に報告したい。

- [1] T. Chen and L. Hu, "Internet performance monitoring," Proc. of the IEEE, vol. 90, no. 9, pp.1592-1603, 2002.
- [2] V. Paxson, "End-to-end Internet packet dynamics," IEEE Trans. on Networking, vol. 7, no. 3, pp.277-292, 1999.
- [3] R. L. Carter and M. E. Crovella, "Measuring bottleneck link speed in packet switched networks," Boston Univ. Computer Science Technical Report, BU-CS-96-006, 1996.
- [4] 鶴正人, 尾家祐二, "インターネット品質管理における計測技術の最新動向", 信学技報, NS2003-153, 2003.
- [5] R. Prasad, C. Dovrolis, "Bandwidth estimation: metrics, measurement techniques, and tools," IEEE Network, 2003.
- [6] Q. Wang, L. Cheng, "FEAT: Improving accuracy in end-to-end available bandwidth measurement," Lehigh University Technical Reports, LU-CSE-06-002, 2006.
- [7] M. Jain, C. Dovrolis, "Pathload: A measurement tool for available bandwidth estimation," PAM, 2002.
- [8] V. Ribeiro, R. Riedi, R. Baraniuk, J. Navratil, L. Cottrell "PathChirp: Efficient available bandwidth estimation for network paths," PAM, 2003..
- [9] N. Hu, P. Steenkiste, "Evaluation and characterization of available bandwidth probing techniques," J. on Selected Areas on Communi., vol. 21, no. 6, pp.879-894, 2003.
- [10] S. Shioda, T. Yagi, K. Mase, "A new approach to the bottleneck bandwidth measurement for an end-to-end network path," ICC, Vol. 1, pp.59 - 64, 2005
- [11] A.B. Downey, "Using pathchar to estimate Internet link characteristics," ACM SIGCOMM, pp. 222-23, 1999.
- [12] J. Strauss, D. Katabi, F. Kaashoek, "A measurement study of available bandwidth estimation tools," ACM SIGCOMM Conf. on Internet measurement, pp. 39 - 44, 2003
- [13] NEDO, 平成 18 年度 地域研究開発技術シーズ育成調査委託事業, "インターネットプロビング技術に基づく次世代ネットワーク測定装置の実現性調査", 報告書 No. 06003088-0, 2006.
- [14] 長谷川和音, "パケットギャップによる通信路の可用帯域測定法の研究", 秋田大学卒業論文, 2007.
- [15] 長谷川, 加藤, 小原, "パケットトレインペアの分散を用いた可用帯域のアクティブ測定法の提案", 平成 20 年度電気関係学会東北支部連合大会, 2H18, 2008.
- [16] 長谷川, 加藤, 小原, "異速度パケットトレインを用いた可用帯域のアクティブ測定法の提案", 計測自動制御学会東北支部 251 回研究集会, No.251-4, 2009
- [17] 滝田, 杉崎, 山口, 浅谷 "RTT を用いたボトルネックリンクの可用帯域推定法", 信学技報 NS2009-108, pp. 245-249, 2009.
- [18] 森戸, 相澤, 貝原, "Visual SLAM によるシステムシミュレーション", ㈱構造計画研究所, 2001
- [19] CAIDA の HP など (<http://www.caida.org/home/>)

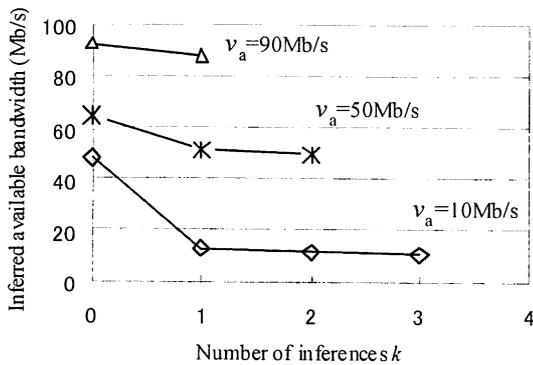


図6 提案方式における可用帯域推定の逐次更新の効果

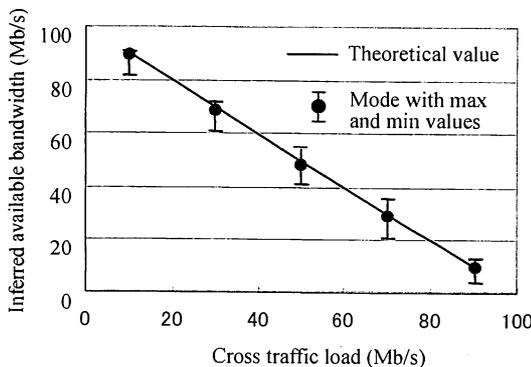


図7 可用帯域の測定結果