

# パケットトレインペアによるインターネットの 可用帯域とキャパシティの同時推定方式の提案

○小関 翔斗 加藤 陽介 小原 仁

秋田大学工学資源学研究所 電気電子工学専攻 〒010-8502 秋田県秋田市手形学園町 1-1

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

キーワード PTP方式, 可用帯域, キャパシティ, アクティブ計測, プローブパケット,

## Simultaneous estimation of available bandwidth and link capacity of a path in the Internet

○Shoto KOSEKI Hitoshi OBARA and Yosuke KATO

Graduate School of Engineering and Resource Science, Akita University

1-1 Tegata Gakuen-machi, Akita City, Akita, 010-8502 Japan

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

**Keyword** PTP(packet train pair), Available bandwidth, Link capacity, Active measurement, Probe packet

### 1. はじめに

近年, インターネットの急速な発展に伴い, 高速かつ大容量の通信が行われるようになってきている[1]. また, IP 電話や映像配信など通信サービス品質(Quality of Service, QoS)に敏感なアプリケーションも多く展開されている. このようなアプリケーションではパケットが通信経路の途中で遅延や損失などを起こすと, 音ずれや映像データの消失といった品質劣化を招く. そこで, このような事態が起こらないようにQoSの保証が重要視されている[2].

現在, ユーザに対し通信品質を保証するSLA(Service Level Agreement)制度が展開され始めている[3]. SLAは通信回線の最低速度(可用帯域)や平均遅延時間, パケット損失率などを保証し, それらを実現できなかった場合の利用料金の減額に関する規定などを含めて契約を行う制度である.

可用帯域の推定はこのSLAにおいて重要な項目の一つであるが, 現在のインターネットは異なるプロバイダ(Service Level Agreement, ISP)の管理するネットワークの集合体であるため, End-to-End通信路における品質保証は十分とは言えない. したがって, エンドユーザ自身が可用帯域をモニタリングできる技術の確立が必要である.

一般的に, 可用帯域の測定技術はパッシブ計測とアクティブ計測に大別される. パッシブ計測[4][5]はネットワーク内にある計測用のルータを使用するためその

ルータの管理情報にアクセスする必要があり, エンドユーザは通常その情報を利用できない. また, パッシブ計測は情報の収集と解析にかなりの時間を有するため, リアルタイムでの可用帯域の計測に適さない. 一方, アクティブ計測[6]はエンドユーザがプローブと呼ばれる試験用パケットをネットワーク内に送信し, その遅延を観測することで, 可用帯域を容易に測定できる. しかし, アクティブ計測では, 測定に使用するプローブがネットワークの負荷を上昇させる(侵襲性). このため, 少ないプローブ量で精度の高い推定を行う技術が必要である.

本報告ではアクティブ計測に注目し, 筆者らが提案した可用帯域推定方式PTP(Packet Train Pair)方式を基に, インターネットの可用帯域とキャパシティを同時に推定する改良方式について述べる. また, オリジナルのPTP方式よりも使用するプローブ量を減らし, かつ誤差の小さい推定方式を提案する. 次に, 提案方式と従来のPTP方式を, シミュレーションによって比較し, 性能を評価する. 最後に, 本報告で得られた知見をまとめる.

### 2. 可用帯域とキャパシティの定義

本報告では簡単のため, IHOPのネットワークを対象とする. インターネットにおいて, ネットワークリンクの全帯域幅をキャパシティと呼ぶ. また, ネットワーク内を流れているパケットをクロストラヒックと

呼び、クロストラヒックが流れていない空き帯域を可用帯域と呼ぶ。可用帯域がネットワークパスのスループットの上限となる。

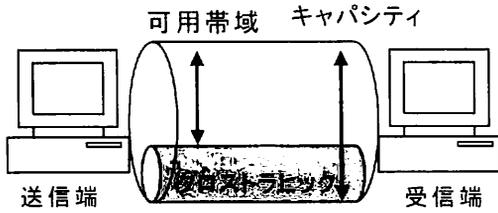


図 1. 1リンク区間における可用帯域とキャパシティ

以下に、従来のアクティブ計測による可用帯域の代表的な推定技術をいくつか紹介する。

- C-probe** C-probe[7]は 1996 年、Robert L. Carter らによって提案された方式である。C-probe は可用帯域を推定する最も初期のツールとされている。C-probe は、8 個のプローブで構成された 1 つのプローブトレインを用いる。ICMP エコーパケットを受信し、最初のパケットと最後のパケットの間隔を測定し、可用帯域を推定する。
- ADR** 2001 年に、C. Dovrolis らによって、C-probe の受信間隔から計算された値は、可用帯域でなく ADR(Average Dispersion Rate) [8]であることが証明された。ADR は 1 トレインのみで測定が可能な方式であり、プローブトレインの受信間隔から求めることができる。しかし ADR は可用帯域ではなく、可用帯域よりも大きな値が得られる特徴を持つ。
- Pathload** Pathload[9] は、2002 年に、M. Jain らによって、プローブトレイン方式を用いた推定方式として提案された。トレイン内の OWD (One Way Delay) に着目し、OWD の増加傾向を見ながら複数のプローブトレインを送信し、可用帯域を絞り込みながら推定する方式である。プローブ使用量は多いが推定精度は高い。
- IGI** IGI(Initial Gap Increasing)[10]は、2003 年に N.Hu らによって提案された方式である。プローブトレイン送信間隔を増加させながら、送受信間隔が釣り合うまで、トレインを多数回送信するスイープ性プローブ方式である。Pathload と比較すると使用プローブ量は少ないが、推定精度では劣る。
- PathChirp** PathChirp[11]は、2003 年に Vinay J. Ribeiro らによって提案された方式である。PathChirp はトレイン内のプローブ間隔を指数関数的に減少させていく。これによってトレイン内の速度は増加していき、可用帯域の速度を越えた

間隔から遅延が発生していくことになり、この遅延発生の臨界点のプローブ速度を可用帯域と推定する。原理的には 1 トレインのみで推定が可能であるが、臨界点を明確にするため実際の推定では、何度もプローブトレインを送信する。プローブ使用量は Pathload や IGI よりも少ないが、推定精度では劣る。

### 3. PTP 方式の推定原理

図 2 に示すように、PTP 方式[13]はネットワーク内に異なる速度のプローブトレインを送信し、受信側でそれぞれの間隔を測定する。以下に必要なパラメータを定義する。

- $v_1$  : 1st トレイン速度
- $v_2$  : 2nd トレイン速度
- $t_1$  : 1st トレイン長
- $t_2$  : 2nd トレイン長
- $t'_1$  : 1st トレイン長
- $t'_2$  : 2nd トレイン長
- $v_{ct}$  : 被測定リンクのクロストラヒック速度
- $v_a$  : 被測定リンクの可用帯域
- $v_w$  : 被測定リンクのキャパシティ

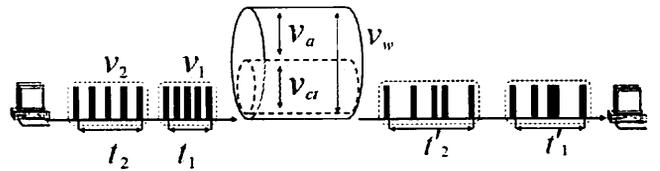


図 2. PTP 方式による可用帯域の推定原理

1st トレインについて考えると、プローブトレインの送信時間  $t_1$  の間にリンクに流入するパケットの総情報量は、 $v_1$  速度のプローブトレインの情報量と、平均速度  $v_{ct}$  のクロストラヒックの情報量の合計である。被測定リンクのクロストラヒック速度が  $v_{ct}$ 、可用帯域が  $v_a$  の場合、これらの情報量は、 $t_1$  上に広がることとなる。したがって 1st トレインに関して式(1)が成り立つ[2]。

$$(v_1 + v_{ct}) \cdot t_1 = (v_a + v_{ct}) \cdot t'_1 \quad (1)$$

異なる速度で送信した 2nd トレインについても同様に次式が成り立つ。

$$(v_2 + v_{ct}) \cdot t_2 = (v_a + v_{ct}) \cdot t'_2 \quad (2)$$

式(1)及び(2)より、可用帯域  $v_a$  について解くと、次式が得られる。

$$v_a = \frac{(t_1 - t'_1) \cdot t_2 \cdot v_2 + (t'_2 - t_2) \cdot t_1 \cdot v_1}{t_1 \cdot t'_2 - t_2 \cdot t'_1} \quad (3)$$

以上がPTP方式の基本的な可用帯域の推定原理であり、原理的に2つのプローブトレインのみで可用帯域を推定することが可能であり、高速、かつ少ないプローブでの推定が可能である。

PTP方式による可用帯域の推定を行う上で、1stトレイン速度と2ndトレイン速度は重要なパラメータであり、従来、

$v_1$  = 最大速度

$v_2$  = 可用帯域

と設定することが最適と言われている。この最適推定条件に近いほど高精度な推定ができる。従来のPTP方式では、2ndトレイン速度をこの条件に近づけるために、以下の3つのアプローチがとられている。

- ① 1stトレイン送信時に測定できるADRを2ndトレインの速度に設定する。
- ② 1stトレインとADRで決定した2ndトレインにより式(3)で可用帯域を求め、この速度を2ndトレインの速度に設定する
- ③ ②を2ndトレインの速度が可用帯域に収束するまで繰り返す。

以上の処理ステップを図3に示す。

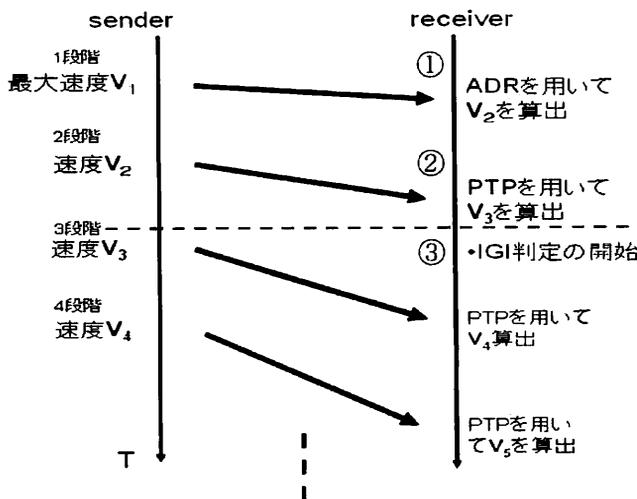


図3. 2ndトレイン速度決定の流れ

まず、①のステップにおいて、ADRとは式(4)で求められる速度である。

$$ADR = \frac{(N-1) \cdot L}{t_1} \quad (4)$$

$N$ はトレイン内のプローブの数、 $L$ はプローブ1つあたりの情報量である。ADRは送信したトレインの速度より遅く、可用帯域よりも速い速度になることが知られている。③のステップにおいて、トレインが可用帯域に収束したかどうかを調べる方法として、IGIの収束判定式を用いる。

$$\frac{|\text{送信間隔} - \text{受信間隔}|}{\text{MAX}(\text{送信間隔}, \text{受信間隔})} < \delta \quad (5)$$

この式は、送信したトレインの間隔の変化の割合を示すもので、その割合が閾値 $\delta$ を下回った時に、トレインが可用帯域に収束したと判定する。

#### 4. 提案方式の原理

本研究では上で述べたPTP方式を基に、新たな推定方式を提案する。提案する方式は

- i. 可用帯域とキャパシティを同時に推定する。
  - ii. 従来方式よりも少ないプローブで、かつ従来方式よりも誤差の小さい推定を実現する。
- ということを目的とする。

この2つの目的を実現するアプローチを以下に示す。

- ① PTP方式の可用帯域推定式の特徴を利用し、キャパシティを同時に計算する。
- ② 最適条件：1stトレイン速度 $v_1$ =最大速度を満たすため、①で推定されたキャパシティを $v_1$ に設定する。
- ③ 複数回の推定を行う場合に、全ての1stトレインについて全ての2ndトレインとペアを組む「全組み合わせ方式」を導入する。
- ④ 全組み合わせ方式を、クロストラヒックが時間によって変動する場合に対応させる方法「フリート・スライディング方式」を適用する。
- ⑤ 複数回の推定を行う場合に、推定された可用帯域を次の2ndトレイン速度にフィードバックする。

##### 4.1 可用帯域とキャパシティの同時推定

PTP方式は2つの式から成る連立方程式を立てて、可用帯域を計算している。式(1)、(2)より可用帯域の他に、クロストラヒックの速度 $v_{ct}$ を求めることができる。

$$v_{ct} = \frac{t_1 \cdot t_2 \cdot v_1 - t_1 \cdot t_2 \cdot v_2}{t_2 \cdot t_1 - t_1 \cdot t_2} \quad (6)$$

図2からわかるとおり、 $v_a$ と $v_{ct}$ の和はリンクのキャパシティ $v_w$ となる。

$$v_w = \frac{v_1 - v_2}{t_1/t_1 - t_2/t_2} \quad (7)$$

これより式(3)と(7)を同時に計算することで、可用帯域とキャパシティを同時に推定することができる。

##### 4.2 1stトレイン速度の最適条化

従来方式では、1stトレインの速度は最大速度に固定して推定を行っている。この場合の最大速度とは、送信側のコンピュータが実現できる送信速度の上限である。しかし、この最大速度がネットワークのリンクの

キャパシティを上回っている場合、ネットワークにかかる負荷が増大し、パケット遅延、パケット損失を引き起こす原因となる。

そこで新たな方法として 1st トレインの速度を、前の推定で得られたキャパシティの速度に設定する。これにより、最大速度がキャパシティを上回ることを避けることができる。

### 4.3 全組み合わせ方式

従来方式は  $N$  個のペアにつき  $N$  個の推定値のみを式(3)により求める方式であった。今回新たに提案する全組み合わせ方式は、1つの 1st トレインに対して全ての 2nd トレインとペアを組み、式(3)の計算を行うことで、 $N$  個のペアに対して  $N^2$  個の推定値を得ることができる。

これにより、プローブを増やすことなく、より多くの推定値を求めることが可能になる。その平均値を求めることにより、一回の推定値の信頼性が高くなると考えられる。

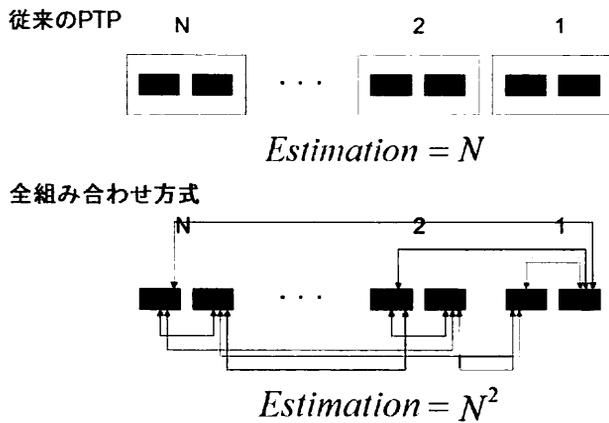


図 4. 従来方式と全組み合わせ方式

### 4.4 フリート・スライディング方式

従来の PTP 方式は、原理的に 2つのトレインのみで可用帯域を推定でき、1回の推定をかなり短い時間で行うことが可能な方式である。この特徴から、複数のトレインペアのストリームを一定時間送信し続けることにより、時間で変動するクロストラヒックおよび可用帯域をトレースして推定を行うことができる。一方、全組み合わせ方式は、複数のトレインペアを送信して推定を行う方式であり、従来方式と比較してリアルタイム性に欠ける。

この問題の解決策として、「フリート・スライディング方式」を新たに提案する。この方式は、複数のトレインペアを1つのフリートという単位で考える。図5のように、一定時間内にトレインペアのストリーミングがある場合を考える。初めの  $m$  個のペアをフリート1とした場合、フリート1の中で「全組み合わせ方

式」による計算を行い、 $m^2$  個の推定値の平均を求める。次の推定を行う場合は、フリート1を1ペアだけスライドさせて、それフリート2として同じように推定値を求める。

この方法を適用することで、従来方式と同じだけの時間間隔で、可用帯域をトレースしながら推定を行うことができると考えられる。

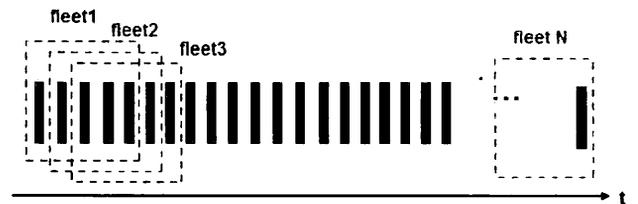


図 5. フリート・スライディング方式

### 4.5 2nd トレイン速度のフィードバック

複数回の推定を行う場合、従来方式は 2nd トレイン速度を可用帯域に収束させる工程を、推定毎に行っている。今回提案する方法は、クロストラヒックの平均速度がある程度の時間一定の場合に、2回目以降の推定の 2nd トレイン収束工程のプローブ送信を省き、前の推定で求められた可用帯域を次の推定の 2nd トレインにフィードバックする。この方法により、2nd トレイン速度が可用帯域収束するまでに複数回速度の更新を重ねなければいけない場合に、送信プローブを削減できる。

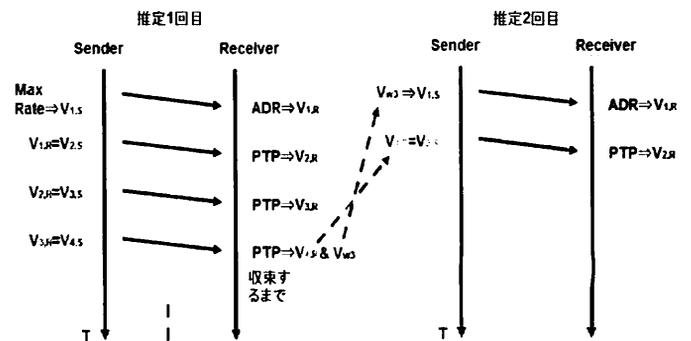


図 6. 2nd トレインのフィードバック

## 5. 性能評価

従来方式と提案方式をシミュレーションによって比較する。提案方式とは、従来方式に前章の 4.1 から 4.5 を取り入れた方式である。シミュレーションソフトは Visual SLAM を使用する。本シミュレーションで用いるプローブおよびクロストラヒックのパラメータを表1に示す。

図7にシミュレーションモデルを示す。被測定リンクのキャパシティを 100[Mbps]とする。クロストラヒ

ック負荷は、キャパシティに対して 10, 30, 50, 70, 90%とし、それぞれの場合のシミュレーションを行う。

シミュレーション結果を図 8 から図 12 示す。図 8 と図 9 を比較すると、従来方式に比べ提案方式の方が、ばらつきが少なく理論値からの誤差も小さくなっている。これは図 10 の平均誤差の比較や、図 11 の標準偏差の比較からも明らかである。特にネットワーク負荷が 10%の推定において、平均誤差は、提案方式は従来方式の約 20%、標準偏差は 6%である。また図 10 より、提案方式の方が従来方式に比べて、プローブ量が全体的に少なく、平均誤差も小さい。特にネットワーク負荷が 90%の場合に、提案方式は従来方式の約 60%のプローブ量での推定を実現した。

全体的に誤差や標準偏差が小さくなったのは、アプローチ③の「全組み合わせ方式」効果であると考えられる。従来方式はトレインペア 1 つに対して 1 推定値のみを計算するのに対して、提案方式はフリート 1 つ (トレインペア 10) に対して 100 個の可用帯域を計算し、その平均値を推定値としているためである。またプローブ量が削減されたのは、アプローチ⑤の「2nd トレイン速度のフィードバック」の効果であると考えられる。特に、従来方式では 2nd トレインが可用帯域に収束するまでに複数回の速度の更新を重ねなければならない場合(ネットワーク負荷が 70%、90%の場合)に効果的である。ネットワーク負荷が 70%、90%の場合に、従来方式よりもそれぞれ、約 6, 10[MB]のプローブを削減した。

図 12 は提案方式によるキャパシティの推定を示している。キャパシティの推定については、特にネットワーク負荷が 50%、70%、90%の場合の推定精度がよく、それぞれ平均誤差が 8%、7%、3%、標準偏差が 6, 5, 3[Mbps]であった。その理由は、ネットワーク負荷が 10%、30%の場合の推定に比べて、負荷 50%、70%、90%の場合の推定は、式(7)の分母の値が大きくなり、推定値が安定するためだと考えられる。

表 1. シミュレーション条件

プローブパッケージサイズ	1500[B]
1トレインのプローブ数	50
1フリートのトレインペア数	10
推定回数(トレインペア数)	100
クロストラフィック条件	100[B]と 1500[B]の パッケージを 6:4の比率で 指数分布に従い ランダムに送信する

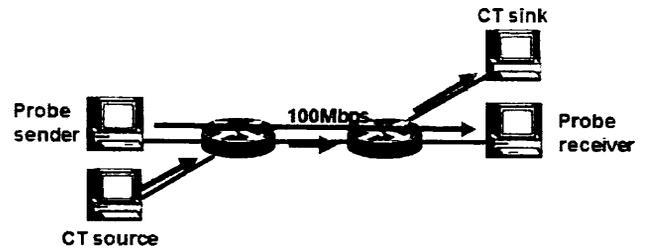


図 7. IHOP シミュレーションモデル

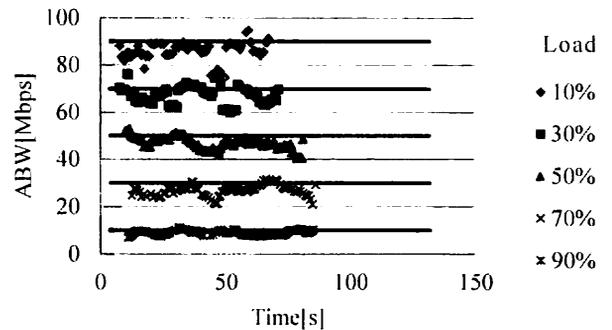


図 8. IHOP における提案方式の可用帯域推定

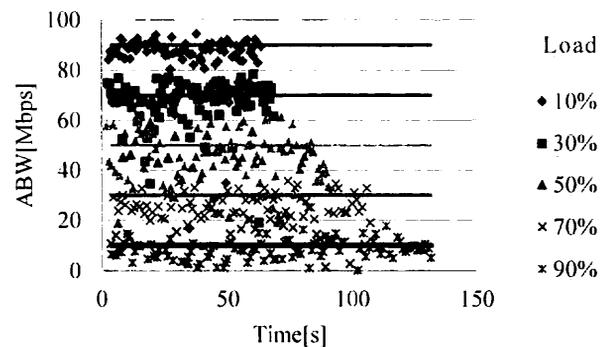


図 9. IHOP における従来方式の可用帯域推定

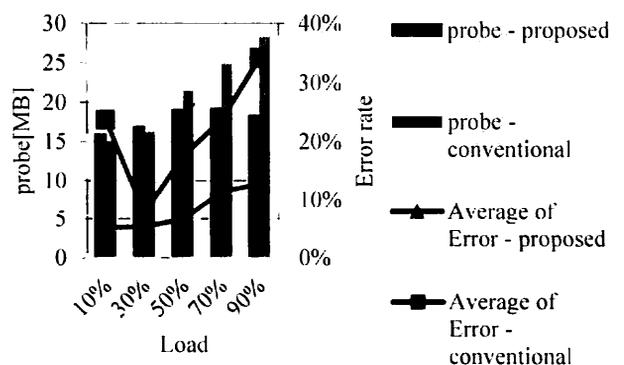


図 10. プローブ量と可用帯域推定の平均誤差の比較

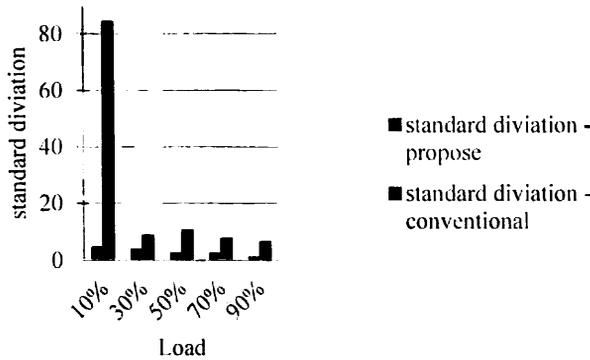


図 11. 可用帯域推定の標準偏差の比較

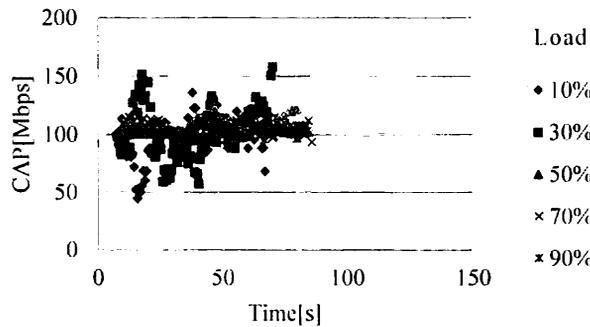


図 12. 1HOP における提案方式のキャパシティ推定

## 6. まとめ

オリジナルの PTP 方式に以下の 5 つの改良を加えた、新たな推定方式を提案した。

- ① 可用帯域とキャパシティの同時推定
- ② 1st トレインの最適化
- ③ 全組み合わせ方式
- ④ フリート・スライディング方式
- ⑤ 2nd トレイン速度のフィードバック

可用帯域の推定の性能評価を行った。提案方式と従来方式の比較結果より、提案方式は従来方式よりも低プローブで低誤の推定を実現した。平均誤差は最大で 20% 小さく、標準偏差は最大で 80 [Mbps] 小さく、プローブ量は最大で 10 [MB] 小さいという結果を得た。

また、キャパシティの推定の性能評価も行った。特にネットワーク負荷が 50%, 70%, 90% の場合に高精度な推定を実現し、それぞれ平均誤差が 8%, 7%, 3%, 標準偏差が 6, 5, 3 [Mbps] であった。

## 謝辞

本研究は科研費(12000835)の補助を受けて実施されたものである。

## 文献

- [1] 福田健介,長健次郎,江崎浩,加藤朗,“国内ブロードバンドトラフィックの動向”,電気電子情報通信学会誌, Vol.93 No.4 ,pp.276-279, 2010.
- [2] Ahmed Ait Ali, Fabien Michaut, Francis Lepage, “End-to-End Available Bandwidth Measurement Tools: A Comparative Evaluation of Performances”, IPS-MoMe, 2006
- [3] R.Prasad, C.Dovrolis, M.Murray, and K.Claffy. Bandwidth “Estimation: Metrics, Measurement Techniques, and Tools.” IEEE Network, pp.27-35, 2003
- [4] 小林淳史,石橋圭介,IP フロー計測技術と標準化 NetFlow, sFlow, IPFIX, PSAMP 技術 電気電子情報通信学会誌, Vol.93 No.4 ,pp.280-286, 2010.
- [5] 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.
- [6] 鶴正人,中村勝一, “アクティブ計測によるネットワーク品質計測”, 電子情報通信学会誌, Vol.93 No.4,pp.298-303, 2010.
- [7] R. L. Carter and M. E. Crovella, “Measuring bottleneck link speed in packet-switched networks,” Perform. Eval, vol. 27, no. 28, pp. 297-318, 1996.
- [8] C.Dovrolis, P.Ramanathan, and D.Moore. “What do packet dispersion techniques measure?” In Proc. IEEE infocom, Anchorage, Apr.2001
- [9] M.Jain and C.Dovrolis. “Pathload: A Measurement Tool for End-to-end Available Bandwidth”. In Proceedings of 3rd Passive and Active Measurements Workshop, March 2002.
- [10] N.Hu and P.Steenkiste, “Evaluation and Characterization of Available Bandwidth Probing Techniques,” IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 21, no .6, pp. 879-894, Aug. 2003
- [11] V.Ribeiro, R.Riedi, R.Baraniuk, J.Navratil, and L.Cottrell. “PathChirp: Efficient available bandwidth estimation for network paths.” In Proc. PAM workshop, La Jolla, California, Apr. 2003
- [12] B.Melander, M.Bjorkman, and P.Gunningberg. “A new end-to-end probing and analysis method for estimating bandwidth bottlenecks.” In Proc. Globecom, San Francisco, USA, Nov. 2000
- [13] 長谷川和音, “異速度パケットトレインを用いた通信路可用帯域のアクティブ測定方式に関する研究”,秋田大学修士論文,2009.